

# 基于级数反演法的变速运动 SAR 回波二维频域模拟算法

刘 昕, 张林让, 刘 楠, 刘高高

(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:** 针对变速运动平台,提出了一种基于级数反演法的 SAR 回波模拟二维频域的算法。建立了变速运动模式 SAR 的几何模型,利用级数反演法,得到了较为准确的信号 2 维频谱表达式,并对由变速运动引入的大场景空变性进行了分析,给出了空变性相位误差补偿因子,实现了回波信号的精确仿真。分析表明该算法能够在保证较高的相位精度情况下大大的提高 SAR 回波的仿真速度。仿真结果证明了该算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达 (SAR); 变速运动; 回波仿真; 二维频域; 级数反演法

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2014)07-0827-07

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.07.012

## 2-D Fourier Domain Algorithm for Side-Looking SAR with Variable Velocity Based on Reversion of Series

LIU Xin, ZHANG Lin-rang, LIU Nan, LIU Gao-gao

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

**Abstract:** Considering the platform with variable velocity, a 2-D frequency domain algorithm for SAR echo signal simulation is presented. Because it is difficult to obtain its two-dimensional frequency spectrum by use of a curvilinear trajectory with varying velocity, based on the geometric model of a side-looking SAR and reversion of series, the 2-D spectrum can be derived accurately. Moreover, the range-variant problem is analyzed and effectively solved by introducing a new compensation function. The results show that the efficiency of SAR echo signal simulation can be improved with high phase accuracy. Several simulation and processing results are presented to demonstrate the validity of the proposed algorithm.

**Key words:** Synthetic aperture radar (SAR); Variable velocity; Echo signal simulation; 2-D frequency domain; reversion of series

### 0 引 言

合成孔径雷达能够全天时、全天候获得高分辨图像,从二十世纪 50 年代合成孔径雷达的概念被提出,一直是国内外研究的热点课题。早期的成像算法均是以理想的匀速直线飞行为前提的,但在实际的飞行过程中,存在大量的变速飞行情况,比如弹载 SAR 等。为了在各种外部条件下获得高分辨的 SAR 图像,则需要有大量符合特定条件下的 SAR 原

始回波信号来验证成像算法是否合适,这些数据全部通过雷达载体飞行获得往往不太实际,所以通过仿真模拟来获得所需要的原始回波信号是一个重要的解决手段。国内外对 SAR 回波仿真算法均做了大量的研究,基本上可分为时域算法<sup>[1-2]</sup>和二维频域算法<sup>[3-7]</sup>,时域算法是依照真实的回波生成流程生成的回波,物理概念清晰,算法精度高,但计算复杂度较高,不利于大场景面目标的回波仿真;二维频域算法直接推导了系统传递函数的二维频域表达

式,利用频域内的 FFT 代替了时域卷积,大大提高了仿真速度,但这种算法当 SAR 系统几何模型较为复杂时,很难得到系统传递函数准确的二维频域表达式。文献[4] Franceschetti 等人虽然针对变速模式下 SAR 原始回波数据仿真进行了大量的研究,但其仿真结果是在窄波束及运动误差慢变化假设下进行的,文献[5]进一步放宽了假设条件,但其对参数仍有一定约束。文献[6]对曲线轨迹 SAR 原始回波也进行了研究,但其算法是针对匀变速情况,采用等效中值的方法,对于一般情况并不适用。文献[8]采用混合域的方法可以较为容易的实现曲线运动的 SAR 回波数据模拟,但其模拟过程有一部分是在时域进行,仿真效率远远不如二维频域算法。

本文研究了变速运动模式下 SAR 回波模拟方法,提出了一种变速运动模式 SAR 回波快速算法,算法采用级数反演法<sup>[9]</sup>求得回波信号在二维频域

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{\left(x_0 + V_x t_m + \frac{1}{2} a_x t_m^2\right)^2 + \left(V_y t_m + \frac{1}{2} a_y t_m^2\right)^2 + \left(H + V_z t_m + \frac{1}{2} a_z t_m^2\right)^2} \quad (1)$$

当  $a_y = 0 \text{ m/s}^2$ ,  $V_z = 0 \text{ m/s}$ ,  $a_z = 0 \text{ m/s}^2$  时, (1) 式可以转化为:  $R(t_m; R_0) = \sqrt{H^2 + x_0^2 + (V_y t_m)^2}$ , 此时相当于飞行器匀速直线飞行。可以看出,匀速直线飞行是式(1)的一个特例。从式(1)可以看出,变速模式下点目标斜距历程较匀速直线飞行要复杂的多,用驻相点法很难得到系统传递函数精确的多普勒域解析表达式,下面采用级数反演法来计算目标的二维频谱。

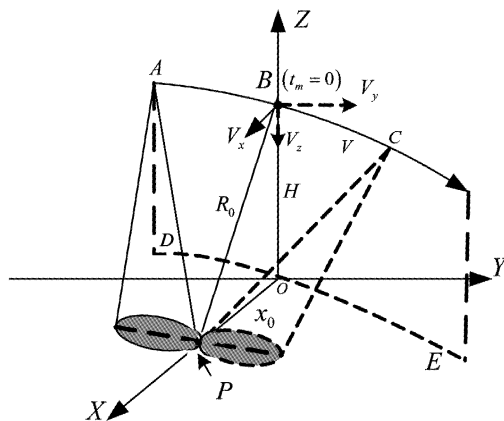


图 1 变速运动 SAR 几何模型

Fig. 1 The geometric model of side-looking SAR with variable velocity

将式(1)在合成孔径中心时刻  $t_m = 0$  处进行

的高阶泰勒级数近似式,并补偿了空变性带来的影响,精度较高,计算量很小。对算法复杂度及性能仿真结果表明,本算法能够在保证较高相位精度的情况下大大的提高回波的仿真效率。

## 1 变速运动模式下 SAR 频域模拟算法原理

### 1.1 系统传递函数

变速模式下 SAR 几何模型见图 1 所示,弧  $\widehat{ABC}$  为飞行器的飞行轨迹,虚线  $DE$  为飞行轨迹在地面上的投影,  $t_m$  为方位慢时间,场景中心  $P$  为点目标,位于  $X$  轴上,坐标为  $(x_0, 0, 0)$ 。假设在  $t_m = 0$  时刻,飞行器位于  $B$  点,高度为  $H$ ,飞行速度为  $V = (V_x, V_y, V_z)$ ,加速度  $a = (a_x, a_y, a_z)$ ,雷达到目标的参考斜距为  $R_0$ 。

由图 1 可知,任意时刻  $t_m$ ,系统的瞬时斜距为

Taylor 展开,有

$$R(t_m; R_0) = R_0 + k_1 t_m + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 + \dots \quad (2)$$

令  $D = V_x^2 + x_0 a_x + V_y^2 + V_z^2 + H a_z$ ,  $E = x_0 V_x + H V_z$ ,  $F = V_x a_x + V_y a_y + V_z a_z$ , 则

$$R_0 = \sqrt{x_0^2 + H^2} \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{x_0 V_x + H V_z}{\sqrt{x_0^2 + H^2}} = \frac{E}{R_0} \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_x^2 + x_0 a_x + V_y^2 + V_z^2 + H a_z}{x_0^2 + H^2} - \frac{(x_0 V_x + H V_z)^2}{(x_0^2 + H^2)^{3/2}} \right) = \frac{2D}{R_0} - \frac{2E^2}{R_0^3} \quad (5)$$

$$k_3 = \frac{3F}{R_0} - \frac{3DE}{R_0^3} + \frac{3E^3}{R_0^5} \quad (6)$$

一般来说  $R(t_m; R_0)$  展开阶数越多越精确,成像误差越小。然而随着展开阶数增加,运算量大幅上升,同时当  $R(t_m; R_0)$  引入的相位误差小于  $\pi/4$  时,对 SAR 图像的影响可以忽略。雷达工作在  $X$  波段瞬时,斜距的展开误差应小于  $\Delta R \leq 1.87 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。由文献[10],有  $R(t_m; R_0)$  的二阶展开误差图和三阶展开误差图。二阶展开误差小于  $6 \times 10^{-3} \text{ m}$  而三阶展开误差约达到  $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。因此本章将  $R(t_m; R_0)$  展开到三阶即可获得精确的 SAR 回波。

下面推导变速运动 SAR 二维谱的准确表达式。

假设雷达发射线性调频信号

$$p(\hat{t}) = a_r(\hat{t}) \exp(j2\pi(f_0\hat{t} + j\frac{\gamma}{2}\hat{t}^2)) \quad (7)$$

则雷达接收的回波基带信号可写为

$$h(\hat{t}, t_m; R_0) = a_r\left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_0)}{c}\right) a_a(t_m) \cdot \exp\left(j\pi\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_0)}{c}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_m; R_0)\right) \quad (8)$$

式中:  $a_r(\cdot)$  和  $a_a(\cdot)$  分别为雷达回波信号的距离窗函数和方位窗函数,  $\hat{t}$  为距离快时间,  $c$  为光速,  $\lambda = c/f_0$  为中心频率对应的波长,  $\gamma$  为线性调频率。利用级数反演法<sup>[8]</sup>, 对(8)式做二维傅里叶变换, 可得点目标回波  $h(\hat{t}, t_m)$  的二维频谱为

$$H(f_\tau, f_a) = a_r(f_\tau) a_a(f_a) \exp\{j\psi(f_\tau, f_a)\} \quad (9)$$

式中:

$$\psi(f_\tau, f_a) = \psi_0(f_a) + \psi_1(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2 \quad (10)$$

$$\psi_0(f_a) = -2\pi f_0 \frac{2R_s}{c} + \frac{\pi c f_a^2}{4f_0 k_2} + \frac{\pi k_1 f_a}{k_2} + \frac{\pi f_0 k_1^2}{c k_2} +$$

$$\frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{16f_0^2 k_2^3} + \frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{8k_2^3 f_0} + \frac{3\pi k_1^2 k_3 f_a}{4k_2^3} + \frac{\pi f_0 k_1^3 k_3}{2c k_2^3}$$

$$\psi_1(f_a) = -\frac{4\pi R_s}{c} - \frac{\pi c f_a^2}{4k_2 f_0^2} + \frac{\pi k_1^2}{c k_2} - \frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{8k_2^3 f_0^3} -$$

$$\frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{8k_2^3 f_0^2} + \frac{\pi k_1^3 k_3}{2c k_2^3}$$

$$\psi_2(f_a) = -\frac{\pi}{\gamma} + \frac{\pi c f_a^2}{4k_2 f_0^3} + \frac{3\pi c^2 k_3 f_a^3}{16k_2^3 f_0^4} + \frac{3\pi c^2 k_1 k_3 f_a^2}{8k_2^3 f_0^3}$$

其中, 式(10)中的  $\psi_0$  与  $f_\tau$  无关, 为方位调制项,  $\psi_1$  为  $f_\tau$  线性项的系数, 表征了目标的距离徙动,  $\psi_2$  为  $f_\tau$  平方项的系数, 为目标的距离调频率。

## 1.2 二维频域模拟算法

已知场景的二维复散射系数<sup>[11]</sup>为  $\gamma(y, r)$ ,  $y$  为目标在方位上偏移场景中心的距离,  $r$  为目标在距离上偏离场景中心的距离, 则场景的回波信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = \iint \gamma(y, r) \cdot h(\hat{t}, t_m) dy dr \quad (11)$$

式(11)给出了变速运动 SAR 系统传递函数的二维时域表达式, 则整个场景的 SAR 原始回波信号的二维频谱可表示

$$S(f_\tau, f_a) = \iint \gamma(y, r) \cdot H(f_\tau, f_a) dy dr \quad (12)$$

将  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  带入式(11), 可得

$$S(f_\tau, f_a) = \iint \gamma(y, r) \cdot H(f_\tau, f_a) dy dr = \iint \gamma(y, r) dy dr \cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{y}{V}\right) \cdot \exp(j(\psi_0(f_a) + \psi_1(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2)) = \iint \gamma'(y, r) \exp\left(-j2\pi f_a \frac{y}{V}\right) \exp\left(-j2\pi f_\tau \frac{2r}{c}\right) dy dr \cdot \exp(j(\psi_0'(f_a) + \psi_1'(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2)) \quad (13)$$

其中

$$R_s = R_0 + r$$

$$\psi_0'(f_a) = -2\pi f_0 \frac{2R_0}{c} + \frac{\pi c f_a^2}{4f_0 k_2} + \frac{\pi k_1 f_a}{k_2} + \frac{\pi f_0 k_1^2}{c k_2} +$$

$$\frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{16f_0^2 k_2^3} + \frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{8k_2^3 f_0} + \frac{3\pi k_1^2 k_3 f_a}{4k_2^3} + \frac{\pi f_0 k_1^3 k_3}{2c k_2^3}$$

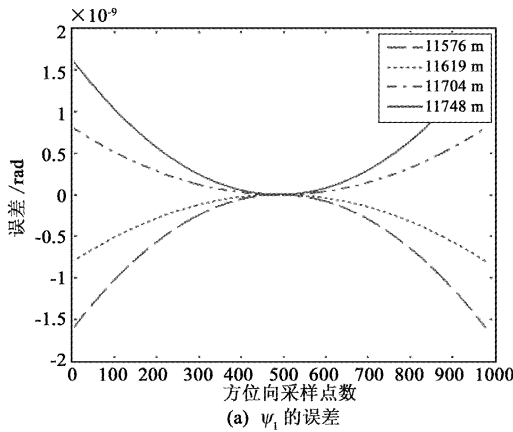
$$\psi_1'(f_a) = -\frac{\pi c f_a^2}{4k_2 f_0^2} + \frac{\pi k_1^2}{c k_2} - \frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{8k_2^3 f_0^3} -$$

$$\frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{8k_2^3 f_0^2} + \frac{\pi k_1^3 k_3}{2c k_2^3}$$

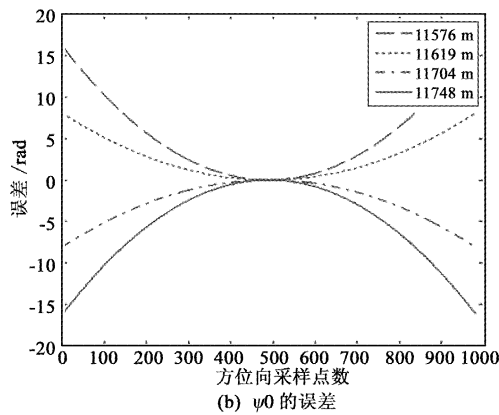
$$\gamma'(y, r) = \gamma(y, r) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$$

从上面的推导基于一定的近似, 在1.1节中, 推导了  $k_1, k_2, k_3$  的表达式, 可以看出  $k_1, k_2, k_3$  均与目标的斜距  $R_s$  有关, 而上式为了降低计算复杂度, 近似的认为  $k_1, k_2, k_3$  中所含的斜距为参考斜距, 下面给出了目标偏离场景中心时,  $\psi_0, \psi_1$  的误差(仿真参数见表1)。

图2给出了斜距分别为11576 m、11619 m、11704 m和11748 m时  $\psi_0, \psi_1$  相对参考斜距下  $\psi_0, \psi_1$  的误差曲线图。从图2(a)中可以看出, 表1所示的仿真参数下,  $\psi_1$  项的误差很小, 几乎可以忽略不计, 所以可用场景中心的斜距来代替目标斜距。图3给出了垂直速度、水平加速度、垂直加速度不同时,  $\psi_1$  带来的相位误差的影响。这里纵轴为相位误差, 横轴表示垂直速度、水平加速度、垂直加速度与主速度(水平速度)的比值, 从图3(a)中可以看出, 垂直速度小于主速度的22%时,  $\psi_1$  所产生的相位误差小于  $\pi/4$ , 其对回波数据产生的准确性产生的影响可忽略, 而当垂直速度大于主速度的22%时, 则会对回波数据产生较大影响, 需要对  $\psi_1$  进行补偿才



(a)  $\psi_1$  的误差

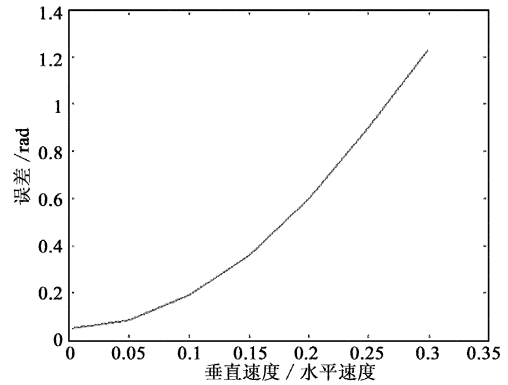


(b)  $\psi_0$  的误差

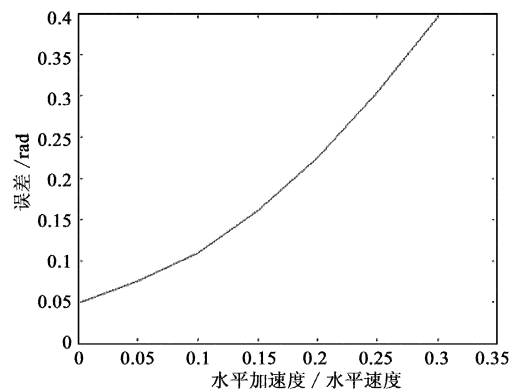
图 2 不同斜距下  $\psi_0, \psi_1$  相对参考斜距下  $\psi_0, \psi_1$  的误差

Fig. 2 Error of  $\psi_0, \psi_1$  with different slant range

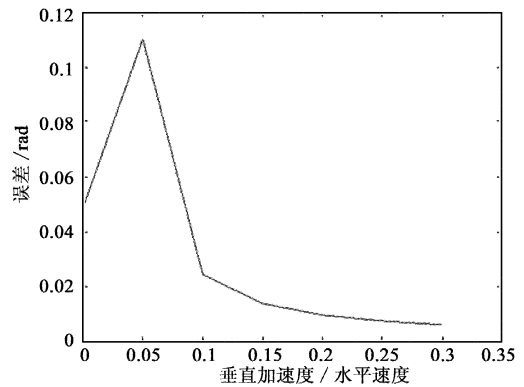
能保证数据的准确性；从图 3(b) (c) 中可以看出水平加速度、垂直加速度小于主速度的 30% 的情况下， $\psi_1$  所产生的相位误差均小于  $\pi/8$ ，而一般加速度的值不会超过速度值的 30%（如导弹等：主速度为 1000 m/s 时，加速度一般不大于 100 m/s<sup>2</sup>），所以由加速度所产生的  $\psi_1$  所带来的相位误差不会对回波数据的准确性有较大影响。综上所述，垂直速度大于主速度的 22% 时，由  $\psi_1$  带来的相位误差会对回波数据的准确性有影响，但在一般情况下，由于飞机晃动所产生的垂直加速度以及弹载 SAR 系统的垂直速度都不会大于水平速度的 20% [6]，所以算法这里忽略  $\psi_1$  产生的影响，而垂直速度很大情况下的回波产生方法将下一阶段进一步研究。图 2(b) 为  $\psi_0$  项的误差，这里斜距对  $\psi_0$  代表的方位调制项有较大影响，当目标沿距离向远离场景中心时，其方位向会出现散焦，所以对  $\psi_0(f_a)$  项需要补偿才能得到较为准确的 SAR 回波，这里设  $\Delta\psi_0(f_a,$



(a)  $\psi_1$  带来的相位误差随垂直速度的变化



(b)  $\psi_1$  带来的相位误差随水平加速度的变化



(c)  $\psi_1$  带来的相位误差随垂直加速度的变化

图 3 不同速度、加速度下  $\psi_1$  产生的相位误差

Fig. 3 Phase error with variable velocity

$R_S) = \psi'_0(f_a, R_S) - \psi'_0(f_a, R_0)$  注意到  $\psi'_0(f_a)$  项不含  $f_\tau$ ，所以，式(12)可推导为

$$S(f_\tau, f_a) = \iint \gamma'(y, r) \exp\left(-j2\pi f_a \frac{y}{V}\right) \cdot$$

$$\exp\left(-j2\pi f_\tau \frac{2r}{c}\right) dy dr \cdot$$

$$\exp(j(\psi'_0(f_a; R_S) + \psi'_1(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2)) =$$

$$\int F_{f_a}[\gamma'(\hat{t}, t_m)] \cdot \exp(j(\Delta\psi'_0(f_a; R_S)) \cdot$$

$$\exp\left(-j2\pi f_\tau \frac{2r}{c}\right) dr \cdot \exp(j(\psi'_0(f_a; R_0) + \psi'_1(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2)) \quad (14)$$

这里  $F_{f_a}[\cdot]$  代表方位维 FFT, 令

$$H_0(f_\tau, f_a) = \exp(j(\psi'_0(f_a; R_0) + \psi'_1(f_a)f_\tau + \psi_2(f_a)f_\tau^2)) \quad (15)$$

综上所述,变速运动 SAR 系统二维频域快速模拟算法的流程图如图 4 所示。首先获取场景的二维复散射系数为  $\gamma(y, r)$ , 对二维复散射系数做方位 FFT, 在方位频域 - 距离时域上乘以  $\exp(j(\Delta\psi'_0(f_a; R_s)))$ , 从而模拟出回波的距离空变性, 再将其变换到二维频域, 乘以传递函数  $H_0(f_\tau, f_a)$ , 即得到回波的二维频谱, 最后对回波二维频谱做二维逆傅里叶变换生成所需的原始回波数据, 完成回波模拟。

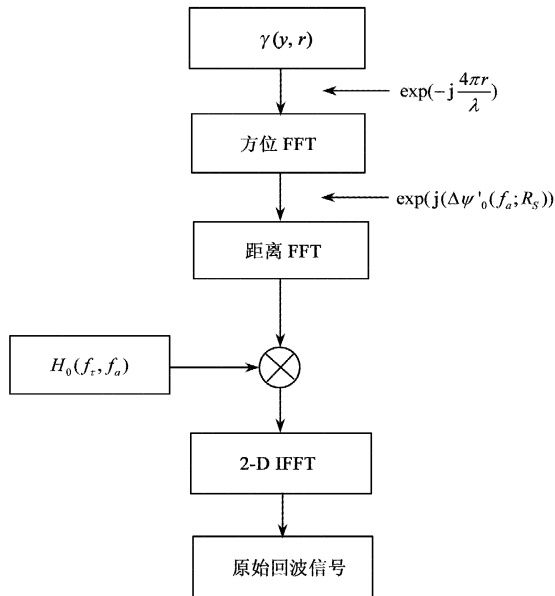


图 4 算法流程图

Fig. 4 Block scheme of proposed simulation approach

## 2 运算量分析

算法的运算量一般用算法中的复乘次数来评估<sup>[12]</sup>, 设回波数据矩阵方位向的采样点数为  $N_a$ , 距离向采样点数为  $N_r$ , 散射系数  $\gamma(y, r)$  与回波矩阵大小相同, 则时域算法需要  $N_t = (N_a N_r)^2$  次复乘运算, 根据图 4 的流程图可知二维频域算法需要的复乘次数为

$$N_{ff} = 3N_a N_r + N_a N_r \lg(N_a N_r) \quad (16)$$

其中第一项为乘以两次相位函数所需复乘次

数, 第二项为二维 FFT 和 IFFT 所需复乘次数, 可以看出, 二维频域算法比时域算法提高了约

$$N_t/N_{ff} = N_a N_r / (3 + \lg(N_a N_r)) \quad (17)$$

可以看出随着散射系数矩阵即场景目标点数的增加, 二维频域算法相对于时域算法的计算效率会越来越高, 大约提高了  $O(N_a N_r / \lg(N_a N_r))$  个数量级。

图 5 进一步给出了运算量随场景目标点数的变化曲线, 从图中可见, 时域算法的计算量主要决定于点目标的数量, 在点目标较少时, 时域算法仿真的效率优于本文算法, 但对于场景目标仿真, 时域算法运算量将急剧增大。本文提出的仿真算法受点目标数量的影响很小, 适用于场景目标的仿真。

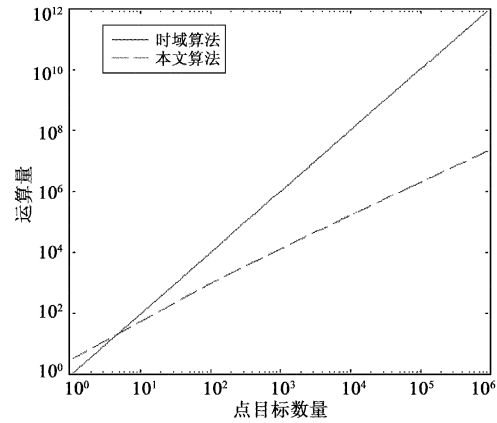


图 5 SAR 回波计算量比较图

Fig. 5 Computation count comparison

## 3 仿真实验及分析

下面基于表 1 的参数进行了回波数据的仿真。

表 1 SAR 参数

Table 1 System parameters

载频	10 GHz	X 方向速度	0 m/s
信号带宽	30 MHz	X 方向加速度	0 m/s <sup>2</sup>
PRF	800 Hz	Y 方向速度	200 m/s
信号脉宽	2 μs	Y 方向加速度	0 m/s <sup>2</sup>
参考斜距	11662 m	Z 方向速度	7 m/s
载机高度	6000 m	Z 方向加速度	3 m/s <sup>2</sup>

分别用时域方法以及本文所述的二维频域方法分别进行了仿真。图 6(a) 为点目标在方位向上的脉冲响应结果。图 6(b) 为点目标在距离向上的脉冲响应结果。曲线为时域算法产生的回波的脉压结果, 实线为本文所述算法所产生的回波的脉压结果。

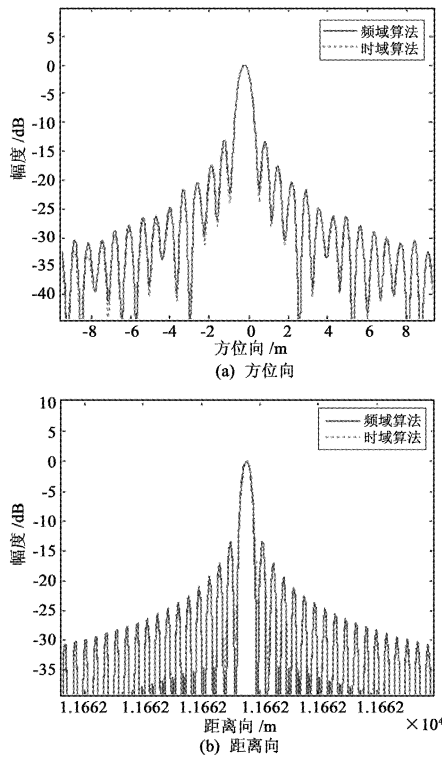


图6 点目标成像结果

Fig. 6 Cuts of the images obtained by processing the single-point raw signals generated by our 2-D FFT method

可以看出,本文的方法所产生的回波与理想状态下的时域方法所产生的回波基本一样,同样能有很好的聚焦以及正确的成像位置。图7给出了本文所述回波产生方法与理论值相比的相位误差,可以看出在孔径范围内,最大距离相位误差为0.3 rad,最大方位相位误差为0.3 rad,均小于 $\pi/8$  rad,其影响可以忽略。表2是时域方法以及本文方法的成像性能统计,可以看出,本文方法在距离向和方位向的峰值旁瓣比(PSLR)以及积分旁瓣比与时域模拟方法的相应数值都比较接近。仿真结果表明本算法能够仿真出较为准确的回波信号。

表2 点目标成像结果性能分析

Table 2 Point target quality measurements

	距离向		方位向	
	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR
时域算法	-13.81	-10.43	-13.84	-10.45
频域算法	-13.44	-9.79	-13.03	-9.98
理论值	-13.26	-9.80	-13.26	-9.80

这里对面目标也进行了仿真,如图8所示,仿真场景大小为 $920 \times 980$ 像素点,图8(a)为对 $\psi_0$ 补偿

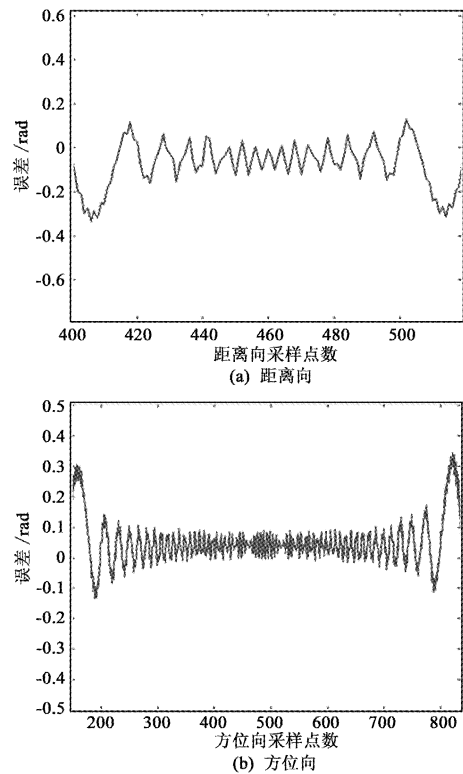


图7 相位误差

Fig. 7 Range and azimuth cuts of the overall phase error

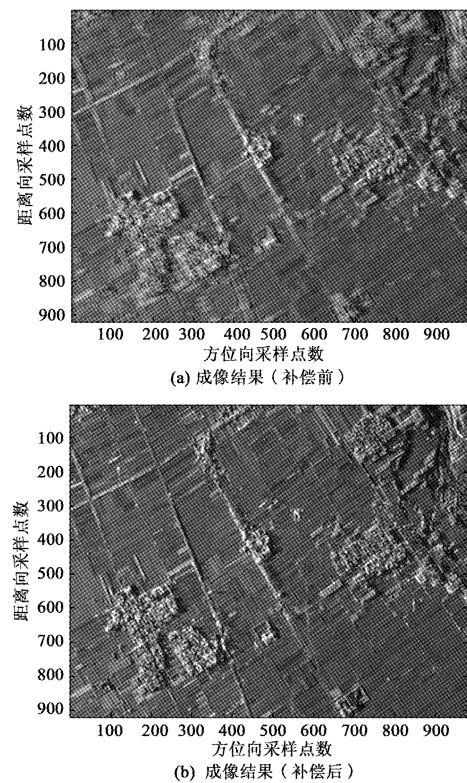


图8 面目标仿真及成像结果

Fig. 8 Imaging result of scene target

前成像结果,图 8(b)为对  $\psi_0$  补偿后成像结果。对比图 8(a)和图 8(b)可以看出,对  $\psi_0$  补偿后,方位向压缩已无空变性,成像质量良好。利用同样的台式计算机,采用 MATLAB2010 运行回波仿真算法程序。二维频域算法耗时约 8 s,时域算法耗时约  $3.3 \times 10^5$  s,这与上一节计算出的理论值相符合。

#### 4 结 论

本文提出了一种适用于变速情况下的 SAR 回波信号仿真的快速算法。算法分析了变速 SAR 系统的几何关系,建立了回波信号模型,推导了其二维频域表达式,补偿了大场景带来的空变性,与时域算法相比,其模拟的点目标回波相位偏差很小,可以忽略,而仿真速度则大大提高。仿真结果验证了本文算法的有效性。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Mori A, Vita F D. A time-domain raw signal simulator for interferometric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1811 - 1817.
- [ 2 ] 汪丙南,陈立福,向茂生. 基于地形起伏的干涉 SAR 回波数据仿真[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 1986 - 1993. [ Wang Bing-nan, Chen Li-fu, Xiang Mao-sheng. InSAR echo data simulation based on undulated terrain [ J ]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9): 1986 - 1993. ]
- [ 3 ] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, et al. SARAS: A SAR raw signal simulator[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1992,30(1):110 - 123.
- [ 4 ] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, et al. SAR sensor trajectory deviations: fourier domain formulation and extended scene simulation of raw signal [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2323 - 2334.
- [ 5 ] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, et al. Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2851 - 2860.
- [ 6 ] Deng B, Li X, Wang H Q, et al. Fast raw-signal simulation of extended scenes for missile-borne SAR with constant acceleration [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2011, 8(1): 44 - 48. .
- [ 7 ] 马兵强,于彬彬,刘畅,等. 条带 FMCW-SAR 回波数据的二维频域模拟算法[J]. 电子信息学报, 2011, 33(2): 375 - 380. [ Ma Bing-qiang, Yu Bin-bin, Liu Chang, et al. A 2-D fourier domain algorithm for stripmap FMCW-SAR raw signal simulation [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 375 - 380. ]
- [ 8 ] 汪丙南,张帆,向茂生. 基于混合域的 SAR 回波快速算法 [ J ]. 电子信息学报, 2011, 33(3): 690 - 695. [ Wang Bing-nan, Zhang Fan, Xiang Mao-sheng. SAR raw signal fast algorithm in mixed domain [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 690 - 695. ]
- [ 9 ] Neo Y, Wong F, Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2007, 4(1): 93 - 96.
- [ 10 ] 刘高高. 单基/双基 SAR 成像算法研究 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学, 2012. [ Liu Gao-gao. Research on imaging algorithm for mono and bistatic synthetic aperture radar [ D ]. Xi'an: Xidian University, 2012. ]
- [ 11 ] 文竹,周荫清,陈杰. 分布式小卫星 SAR 回波信号精确仿真方法研究 [ J ]. 宇航学报, 2006, 27(5): 909 - 914. [ Wen Zhu, Zhou Yin-qing, Chen Jie. Research on distributed satellite SAR echo signal accurate simulation method [ J ]. Journal of Astronautics, 2006, 27(5): 909 - 914. ]
- [ 12 ] 韦立登,李绍恩,吴一戎,等. SAR 原始回波信号生成算法的性能比较研究 [ J ]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 262 - 265. [ Wei Li-deng, Li Shao-en, Wu Yi-rong, et al. Performance comparison of algorithms for SAR raw signal generation [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(2): 262 - 265. ]

作者简介:

刘昕(1983 -),男,博士生,研究方向为 SAR 信号仿真及处理。

通信地址:西安电子科技大学雷达信号重点实验室(710071)

电话:13992872620

E-mail:meteorkx5@ 163.com

(编辑:张宇平)