

大斜视 SAR 原始数据的快速模拟算法研究

刁桂杰 许小剑*

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 该文针对小斜视和大斜视模式合成孔径雷达(SAR)提出了两种高效的原始数据模拟算法: 变尺度傅里叶变换(SCFT)算法和沿距离向积分算法。基于 SCFT 的模拟算法将传统的基于 2 维快速傅里叶变换的 2 维频域算法推广到斜视模式, 采用 SCFT 取代插值操作, 提高了小斜视 SAR 原始数据模拟的计算效率和仿真精度。沿距离向积分算法适用于大斜视 SAR 原始数据模拟, 保证了大斜视 SAR 原始数据的模拟精度并同时提高了计算效率。最后, 通过仿真证明了这两种算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 雷达成像; 斜视 SAR; 原始数据模拟

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0684-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00498

Fast Algorithms for SAR Raw Data Simulation with Large Squint Angles

Diao Gui-jie Xu Xiao-jian

(School of Electronics and Information Engineering Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper presents two efficient algorithms for small squint and large squint mode Synthetic Aperture Radar (SAR) raw data simulation. One is based on Scaled Fourier Transform (SCFT) and the other is based on time-domain integration along range dimension. By SCFT the traditional frequency-domain algorithm with two-dimensional FFT is extended to small squint mode SAR. The algorithm employs SCFT to replace interpolation. The method improves both the computational efficiency and the simulation accuracy. Moreover, the proposed algorithm with time-domain integration along range dimension is applicable to large squint mode SAR. Compared with conventional time-domain technique, it is more efficient while still accurate. Simulation results demonstrate the validity of the two proposed algorithms.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Radar imaging; Squint mode SAR; Raw signal simulation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)原始数据模拟技术在 SAR 技术研究和系统仿真中具有十分重要的作用。基于回波数学模型的时域方法能够精确模拟出 SAR 回波信号^[1,2], 但计算量巨大, 不适用于大场景目标回波模拟。因此, 各种高效的算法被开发出来。这些方法大体可以分为两类: 一类是在时频域实现, 一类是在 2 维频率域实现。在时频域实现的方法一般是对 SAR 回波模型进行适当的近似, 然后在距离频率域或多普勒域通过相位因子相乘模拟出距离徙动的空变性^[3-6], 或者直接对 SAR 成像算法进行逆推得到的原始数据^[7]。基于 2 维频率域方法的思路是利用 SAR 系统 2 维脉冲响应函数与目标后向散射系数矩阵在频率域相乘, 然后利用插值、移位操作模拟出距离徙动的空变性^[8-11]。通过研究, 可以看出快速原始数据模拟技术的难点在于如何通过高效的算

法模拟出距离徙动的空变性, 即距离向和方位向的耦合。

上述各种快速算法的推导主要基于正侧视和小斜视模式 SAR, 随着斜视角增大, 距离向和方位向耦合变大, 采用上述算法将产生较大的误差。因此, 本文采用了 Franceschetti 等人^[11]提出的 2 维频域模拟方法的思路, 根据斜视 SAR 几何关系重新推导系统传递函数, 针对小斜视和大斜视模式分别给出了不同的模拟算法, 使斜视 SAR 原始数据模拟在提高计算效率的同时保证了模拟精度。对于小斜视角, 本文改进了传统的 2 维频域方法, 将其推广到斜视模式, 并利用变尺度傅里叶变换 (SCFT) 取代插值、移位操作, 避免了插值、移位带来的计算效率下降和 SAR 图像失真。该模拟方法的局限性在于数学推导过程中对系统传递函数进行了近似, 随着斜视角增大, 该近似产生的误差急骤变大, 不能保证大斜视 SAR 原始数据的模拟精度。因此, 作为斜视 SAR 原始数据模拟算法的完善, 本文进一步提出了适用于大斜视角的距离向积分算法, 不对系统传递函数

2010-05-18 收到, 2010-11-22 改回

*通信作者: 许小剑 xiaojianxu@buaa.edu.cn

进行 Taylor 展开,采用沿距离向积分的方法保证了模拟精度,该算法通过对计算效率的折中保证了大斜视 SAR 原始数据的模拟精度,其计算效率逊于 2 维频域法但仍远远高于时域模拟方法。

2 斜视 SAR 模式的系统传递函数

斜视 SAR 几何模型见图 1。载机高度为 H ,沿 x 轴方向以速度 v 匀速直线飞行。雷达波束斜视角为 φ ,目标坐标系原点在雷达波束照射的场景中心, (x, r) 平面为数据录取平面。目标坐标系中,点目标的坐标为 (x, r, s) 。其中, r 沿斜距方向垂直于 x 轴, s 垂直于 (x, r) 平面。 O' 为合成孔径中心时刻, x_n 为以 O' 为中心的方位向采样。雷达位于 O' 点时, $x_n = 0$ 。

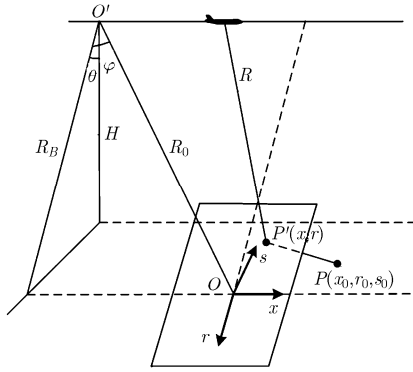


图 1 SAR 斜侧视几何模型

根据图 1,通过坐标映射关系可以把地面目标 $P(x_0, r_0, s_0)$ 映射到数据录取平面上,映射后的目标坐标为 $P'(x, r)$,则目标与雷达相位中心的斜距可以表示为

$$R = \sqrt{(R_0 \cos \varphi + r)^2 + (x_n - R_0 \sin \varphi - x)^2} \quad (1)$$

式中 $x_n = vt_n$, t_n 为方位向时间采样; R_0 为雷达到场景中心点的斜距。

假设雷达发射脉冲宽度为 τ ,调频率为 α 的线性调频信号,场景目标的回波信号是每个方位向时刻,各个点目标回波信号的叠加,去载频后的 SAR 回波信号可以表示为

$$h(x', r') = \iint dx dr \gamma(x, r) g(x' - x, r' - r; r) \quad (2)$$

式中 $x' = x_n$; $r' = ct'/2$; $t' = t - t_n - 2R_0/c$, t 为绝对时间, t' 为快时间采样;

$$g(x' - x, r' - r; r) = \text{rect} \left[\frac{r' - r - \Delta R}{c\tau/2} \right] w^2(x' - x, r) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi(\Delta R + r)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left[-j \frac{2\alpha}{c^2} (r' - r - \Delta R)^2 \right]$$

$\gamma(x, r)$ 为目标后向散射系数; $\Delta R = R - R_0$

$-r$; c 为电磁波传播速度。

式(2)中, $g(x' - x, r' - r; r)$ 为系统的脉冲响应,其频域表达式为系统传递函数。对式(2)进行 2 维傅里叶变换:

$$H(\xi, \eta) = \iint dx dr \gamma(x, r) \exp(-j\xi x - j\eta r) G(\xi, \eta; r) \quad (3)$$

式中 $G(\xi, \eta; r)$ 为系统传递函数。

根据驻定相位原理,系统传递函数可表示为

$$G(\xi, \eta; r) = \text{rect} \left[\frac{\eta}{\Omega_r} \right] \text{rect} \left[\frac{\xi - \xi_d}{\Omega_x} \right] \cdot \sqrt{\cos \varphi + r/R_0} \exp[-j\Psi(\xi, \eta; r)] \quad (4)$$

式中 $\xi_d = \bar{\eta} \sin \varphi$; $\bar{\eta} = (4\pi/\lambda) + \eta$; $\Omega_x = 4\pi X/(\lambda R_0)$; $\Omega_r = 2\alpha\tau/c$; $b = 2\alpha/c^2$; X 为合成孔径长度; $\Psi(\xi, \eta; r) = \xi R_0 \sin \varphi - (\eta^2/(4b)) + (R_0 \cos \varphi + r) \cdot \sqrt{\eta^2 - \xi^2 - \bar{\eta}^2} (R_0 + r)$ 。

由式(4)可以看出, SAR 系统传递函数依赖于斜距 r ,这体现了 SAR 回波的距离空变性。

3 改进的 SAR 原始数据模拟的 2 维频域方法

由于 SAR 系统传递函数的距离空变性,回波信号不能简单表示为频域相乘的形式,为了既能实现快速模拟,又能体现回波的距离空变性,需要对系统传递函数进行近似。首先将系统传递函数分解为两项:其中一项与 r 无关,另一项则依赖于 r 。重写式(4)如下:

$$G(\xi, \eta; r) = G_0(\xi, \eta) \Delta G(\xi, \eta; r) \quad (5)$$

式中 $G_0(\xi, \eta) = G(\xi, \eta; 0)$; $\Delta G(\xi, \eta; r) = \sqrt{\cos \varphi + r/R_0} \cdot \exp(-j\Psi_1)$; $\Psi_1 = (\sqrt{\eta^2 - \xi^2} - \bar{\eta})r$ 。

将式(5)代入式(3)可以得到

$$H(\xi, \eta) = G_0(\xi, \eta) \iint dx dr \gamma_c(x, r) \exp(-j\Psi_1) \quad (6)$$

式中 $\gamma_c(x, r) = \gamma(x, r) \sqrt{\cos \varphi + r/R_0}$ 。

对 Ψ_1 进行 Taylor 展开

$$\begin{aligned} \Psi_1 &\approx \left[\sqrt{(4\pi/\lambda)^2 - \xi^2} - \frac{4\pi}{\lambda} \right] r \\ &+ \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (\xi - (4\pi/\lambda))^2}} - 1 \right] \eta r \\ &- \left[\frac{\xi^2/2}{\sqrt{((4\pi/\lambda)^2 - \xi^2)^3}} \right] \eta^2 r \\ &= \mu(\xi)r + \nu(\xi)\eta r + \zeta(\xi)\eta^2 r \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\mu(\xi)$ 表示聚焦深度; $\nu(\xi)$ 包含了距离徙动的影响; $\zeta(\xi)$ 表示更高次相位的影响,小斜视模式下,高次相位影响很小,可以忽略 $\zeta(\xi)$ 。

将式(7)代入式(6)得

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= G_0(\xi, \eta) \Gamma_c[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)] \\ &= G_0(\xi, \eta) \Gamma_c(\xi', \eta') \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\Omega(\xi) = \nu(\xi) + 1$; $\Gamma_c(\xi, \eta)$ 是 $\gamma_c(x, r)$ 的 2 维傅里叶变换; $\Gamma_c(\xi', \eta')$ 是 $\Gamma_c(\xi, \eta)$ 在 η 方向上随 ξ 变化的非线性映射。

由式(8), SAR 原始数据模拟的一个关键问题是由 $\Gamma_c(\xi, \eta)$ 得到 $\Gamma_c(\xi', \eta')$ 。可以通过 Stolt 插值完成该变换^[11], 但插值法的主要缺点是计算效率较差, 并且会在原始数据的 SAR 图像边缘产生失真。本文采用变尺度傅里叶变换(SCFT)取代插值^[12,13], 提高了计算效率, 避免了 SAR 图像失真。由式(8), $\Gamma_c(\xi', \eta')$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \Gamma_c(\xi', \eta') &= \int dr \Gamma'_c(\xi, r) \exp[-j\Omega(\xi)\eta r] \\ &= \text{SCFT}[\Gamma'_c(\xi, r)] \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\Gamma'_c(\xi, r) = \Gamma_c(\xi, r) \exp[-j\mu(\xi)r]$; $\Gamma_c(\xi, r)$ 为 $\gamma_c(x, r)$ 方位向傅里叶变换。

简单起见, 下面公式中利用 Ω 表示 $\Omega(\xi)$ 。对 $\exp[-j\Omega\eta r]$ 进行展开:

$$\exp[-j\Omega\eta r] = \exp\left[-j\frac{\Omega\eta^2}{2} - j\frac{\Omega r^2}{2} + j\frac{\Omega(\eta-r)^2}{2}\right] \quad (10)$$

将式(10)代入到式(9)

$$\begin{aligned} \text{SCFT}[\Gamma'_c(\xi, r)] &= \exp\left[-j\frac{\Omega\eta^2}{2}\right] \int \Gamma'_c(\xi, r) \\ &\quad \cdot \exp\left[-j\frac{\Omega r^2}{2}\right] \exp\left[j\frac{\Omega(r-\eta)^2}{2}\right] dr \\ &= \exp\left[-j\frac{\Omega\eta^2}{2}\right] \left\{ \left[\Gamma'_c(\xi, r) \exp\left(-j\frac{\Omega r^2}{2}\right) \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \otimes \exp\left[j\frac{\Omega r^2}{2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11), SCFT 由两次相位乘法和一次卷积完成, 卷积可以通过 FFT 快速实现。基于 SCFT 的 SAR 原始数据模拟流程见框图 2。

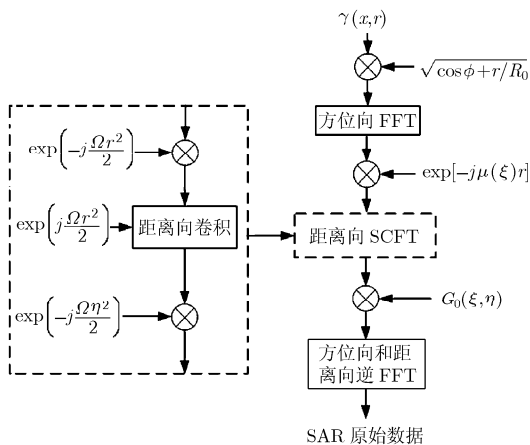


图 2 SCFT 实现 2 维频域原始数据流程

研究表明, 基于 SCFT 的 2 维频域模拟算法, 运算效率高, 能够快速实现大场景目标的 SAR 原始数据模拟, 且运算量与输出数据的大小成正比, 与场景目标大小无关。

4 大斜视 SAR 原始数据模拟的距离向积分方法

基于 SCFT 的 2 维频域方法极大得提高了 SAR 原始数据的模拟速度, 式(7)采用的近似在正侧视和小斜视角下引入的误差较小, 但随着斜视角增大该近似产生的误差急骤增大。假设用 Ψ'_1 表示二阶近似后的 Ψ_1 , 用 $\Delta\phi/r$ 表示误差。

$$\Delta\phi/r = (\Psi_1 - \Psi'_1)/r \quad (12)$$

根据式(12), X 波段的误差 $\Delta\phi/r$ 见图 3。从图中可见随着斜视角增大, $\Delta\phi/r$ 以指数方式急骤增大。对于机载或弹载 SAR, 一般斜视角较大, 故基于 SCFT 的 2 维频域法产生的 SAR 数据误差较大。为了既能高效得完成大斜视 SAR 回波信号模拟, 同时又能保证模拟精度, 将式(3)重写为

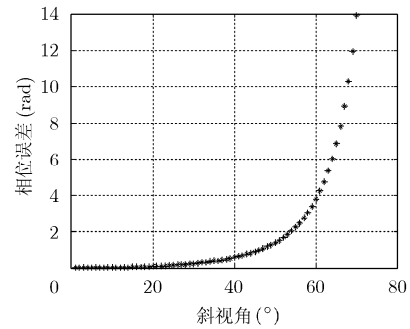


图 3 X 波段相位误差

$$H(\xi, \eta) = \int dr \Gamma(\xi, r) \exp(-j\eta r) G(\xi, \eta; r) \quad (13)$$

根据式(13), 频域回波数据可以表示为沿距离向积分的形式。所以, 先将 $\gamma'(x, r)$ 沿方位向进行傅里叶变换, 再按照式(13)进行积分得到 2 维频域原始数据, 最后进行 2 维逆傅里叶变换就得到了时域原始数据。该算法没有对系统传递函数近似, 误差主要由公式推导过程中的驻定相位原理产生。因此, 该算法能够保证大斜视 SAR 原始数据模拟的精度。同时, 利用方位向傅里叶变换减少了一重积分, 提高了计算效率。该算法流程见图 4。

5 不同方法的计算量分析

通过图 2 和图 4 比较本文提出的两种算法与时域方法的计算量。假设 SAR 录取数据大小为 $N_r \times N_a$, 其中 N_r 为距离向采样点数, N_a 为方位向采样点数。简单起见, 场景大小同样设为 $N_r \times N_a$ 。

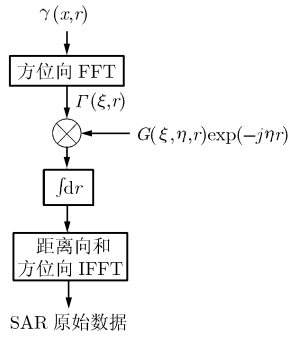


图 4 沿距离向积分的 SAR 原始数据模拟

根据式(2), 时域模拟方法所需要的复数乘法为

$$N_1 \approx (N_r N_a)^2 \quad (14)$$

根据图 2, 2 维频域方法所需的复数乘法为

$$N_2 \approx 6N_r N_a + N_r N_a \log_2 N_a + 2N_r N_a \log_2 N_r \quad (15)$$

根据图4, 沿距离向积分方法所需要的复数乘法则为

$$N_3 \approx N_a N_r^2 + N_r N_a \log_2 N_a + \frac{N_r N_a}{2} \log_2 N_r \quad (16)$$

由式(14)-式(16), 2 维频域方法计算效率最高, 距离向积分方法次之, 两者计算效率均高于时域方法。对于大成像场景的 SAR 原始数据模拟而言, 2 维频域方法和沿距离向积分方法的计算效率具有明显的优势。由于 2 维频域算法的计算效率高于沿距离向积分算法, 在实际应用中还应该根据 SAR 斜视角的大小作进一步区分。

6 算法仿真

为了验证本文提出的斜视 SAR 原始数据模拟方法的有效性, 采用表 1 所列的 X 波段 SAR 系统参数分别对点目标采用时域、距离向积分和 2 维频域法进行了原始数据模拟, 采用非线性 CS 算法对原始数据进行了成像, 并比较了各点目标 SAR 图像的性能。为了验证斜视 SAR 原始数据快速模拟方法对于大场景目标的模拟性能, 点目标设置在距场景中心 1000 m 处的远端, 场景背景的散射强度设置为零。分别仿真斜视角为 10°, 30°和 60°的情况, 见图

5-图 7。图 5-图 7 分别是以点目标为中心, 采用 128×128 的窗口对 SAR 图像进行截取后的结果。表 2 中比较了 3 种情况下点目标 SAR 图像方位向和距离向的分辨率、峰值旁瓣比 (PSLR) 和积分旁瓣比 (ISLR)。

表 1 SAR 仿真参数设置

波长	0.032 m	载机速度	200 m/s
脉冲宽度	2 μs	距离向像素间隔	1 m
距离向分辨率	5 m	方位向像素间隔	1 m
方位向分辨率	5 m	距离向采样点数	2700
雷达与场景中心斜距	20000 m	方位向采样点数	1064

由图 5 可以看出在相同条件下, 斜视角为 10° 时, 3 种方法模拟的原始数据均可得到聚焦良好的 SAR 图像。由表 2 给出的斜视角为 10° 的性能指标可以看出 2 维频域法和距离向积分法得到的原始数据与时域方法精度相当。研究表明, 在本文设置的系统参数条件下, 斜视角小于 20° 时, 这两种方法都可用于 SAR 原始数据模拟。此时, 出于计算效率的考虑, 一般应当选择 2 维频域法。当斜视角达到 30° 时, 2 维频域方法模拟的原始数据的 SAR 图像在距离向出现散焦(见图 6(c)), 该算法产生的误差比较明显。表 2 中, 该方法对应的点目标成像的距离向分辨率变差。由图 6 和表 2, 此时距离向积分法模拟得到的原始数据 SAR 图像的聚焦质量则仍与时域方法相当。斜视角达到 60° 时, 2 维频域方法完全不可用。由图 7(a)和图 7(b), 此时距离向积分法对应的 SAR 图像则与时域方法相当, 表 2 中的性能指标也表明了这一点。

图 8(a)和图 8(b)分别给出了斜视角为 60° 时距离向积分法与时域法模拟结果的方位向截断相位误差和距离向截断相位误差。图 8 表明, 两种方法模拟结果的方位向相位误差小于 16°, 距离向相位误差小于 15°。该相位误差主要是由于数学推导过程中应用驻定相位原理所引入的。图 8(a)和图 8(b)是经过

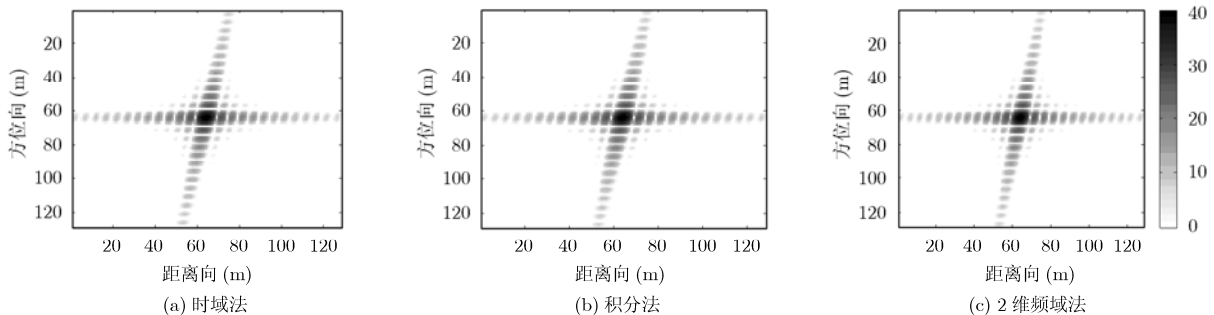


图 5 点目标 SAR 成像(斜视角 10°)

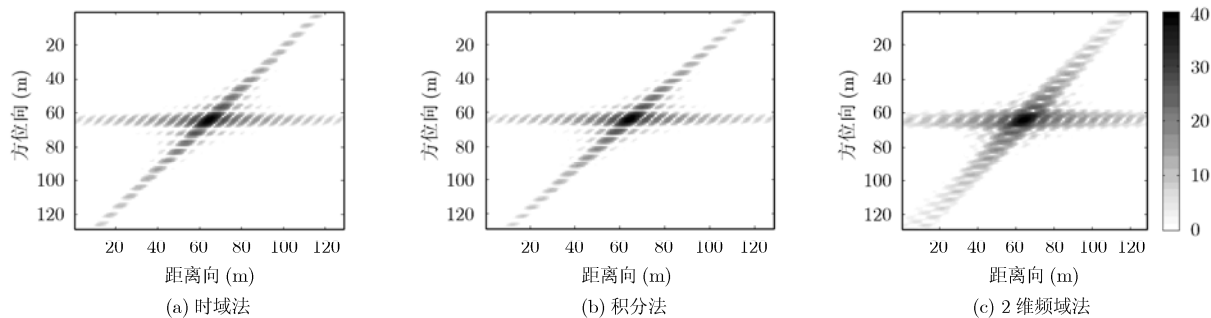
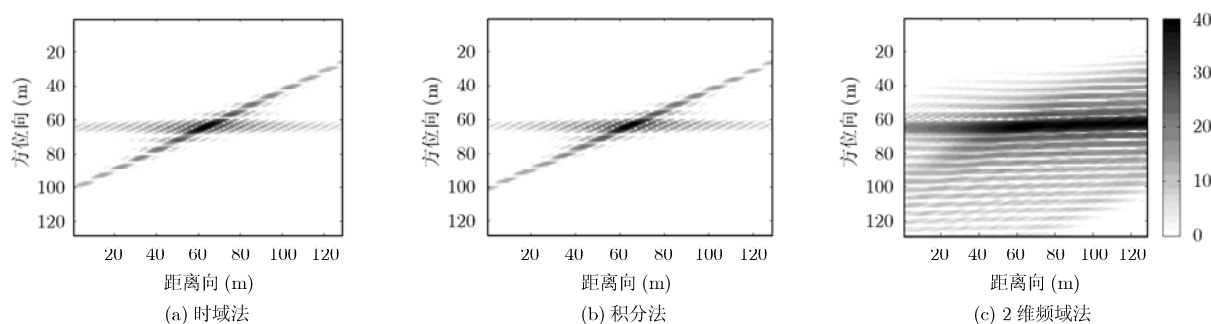
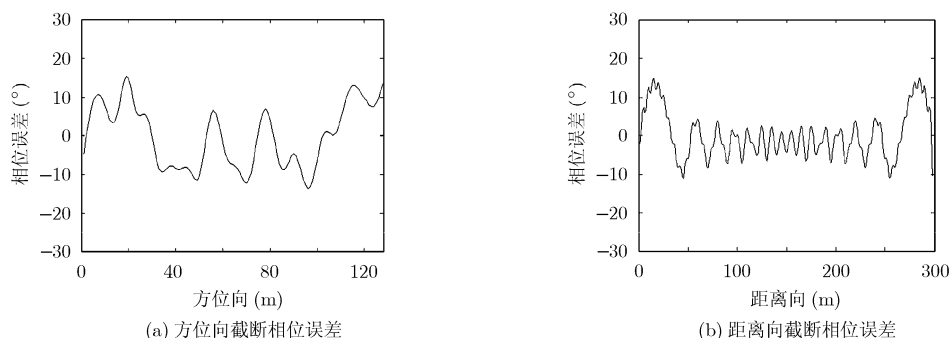
图6 点目标 SAR 成像(斜视角 30°)图7 点目标 SAR 成像(斜视角 60°)图8 距离向积分法与时域法模拟结果的相位误差(斜视角 60°)

表2 斜视角不同时, 点目标 SAR 图像性能比较

斜视角	模拟方法	方位向			距离向		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
10°	时域方法	5.28	-13.27	-11.34	5.03	-13.26	-11.39
	积分方法	5.07	-13.21	-11.22	5.06	-13.24	-11.39
	2 维频域	5.12	-13.21	-11.36	5.13	-13.26	-11.22
30°	时域方法	5.34	-13.16	-11.37	5.06	-13.26	-11.39
	积分方法	5.12	-13.23	-11.23	5.09	-13.23	-11.39
	2 维频域	5.29	-14.29	-12.48	7.50	-14.34	-12.91
60°	时域方法	5.51	-13.28	-11.70	5.09	-13.23	-11.32
	积分方法	5.16	-13.15	-11.64	5.09	-13.23	-11.39
	2 维频域	5.56	-12.93	-11.46	76.12	-5.55	-3.55

以目标所在像素点为中心沿方位向和距离向截断后的相位误差。截断长度分别对应合成孔径长度(128

m)和发射信号脉宽对应的距离向长度(300 m)。由此,证明了沿距离向积分法可以适用于大斜视 SAR

原始数据模拟。

在计算量上, 根据本文参数, 模拟大小为 1064×2700 的场景目标, 在 CPU 为 Intel Core2 2.4 GHz, 内存为 4 G DDR667 的 PC 机上利用式(2)的时域方法(仿真计算中完全按照二重积分计算)模拟一个点目标耗时约为 2 s, 那么完成整个场景模拟的耗时将是巨大的, 而采用基于 SCFT 的 2 维频域法完成整个场景原始数据模拟的耗时仅为 17 s, 采用沿距离向积分法完成整个场景模拟的耗时为 2.3 h。

7 结论

本文提出了两种高效的斜视 SAR 原始数据模拟算法: 基于 SCFT 的 2 维频域法和沿距离向积分法。基于 SCFT 的 2 维频域法具有最高的计算效率, 但其只适用于小斜视 SAR 原始数据模拟(本文系统参数下, 斜视角小于 20°), 对于大斜视 SAR, 该算法的模拟精度变差。沿距离向积分法对计算效率进行了折衷, 但保证了大斜视 SAR 原始数据的模拟精度, 在本文给定系统参数条件下该方法的模拟精度当斜视角达到 60° 时与时域模拟方法相当, 且相对于时域方法仍具有高的计算效率。

参 考 文 献

- [1] 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, and 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.
- [2] Chen Juan, Zeng Da-zhi, and Long Teng. High precision radar echo modeling and simulation method[C]. IEEE Radar Conference, Roma, Italy, 2008: 469-473.
- [3] Cao Ning, Lu Hao, and Hu Ju-rong, *et al.*. Efficient SAR raw data simulation based on parallel computation in hybrid domain[C]. World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, USA, 2009: 186-190.
- [4] Marijke Vandewal, Rainer Speck, and Helmut Süß. Efficient SAR raw data generation including low squint angles and platform instabilities[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 2(1): 26-30.
- [5] Lu Hao, Cao Ning, and Liu Wei-wei, *et al.*. Efficient SAR raw data simulation of extended scenes using chirp scaling principle[C]. International Conference on Information Science and Engineering, Nanjing, China, 2009: 554-557.
- [6] 黄立胜, 王贞松, 郑天垚. 基于 FFT 的快速 SAR 分布目标回波模拟算法[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 128-136.
Huang Li-sheng, Wang Zhen-song, and Zheng Tian-yao. A fast algorithm based on FFT used in simulation of SAR return wave signal[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 128-136.
- [7] Ahmed Shaharyar Khwaja and Laurent Ferro-Famil. Efficient SAR raw data generation for anisotropic urban scenes based on inverse processing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 757-761.
- [8] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 考虑基线抖动的双天线干涉 SAR 原始回波仿真. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1856-1861.
Tang Xiao-qing, Xiang Mao-sheng, and Wu Yi-rong. SAR raw signal simulation of dual-antenna InSAR accounting for baseline oscillations. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8): 1856-1861.
- [9] Xia Wei-jie and Zhou Jian-jiang. A raw signal simulator for bistatic SAR[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22: 434-443.
- [10] 岳海霞, 杨汝良. 一种新颖的 SAR 真实场景原始数据频域模拟方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 11(28): 2015-2018.
Yue Hai-xia and Yang Ru-liang. A novel method of SAR real scenario raw data frequency-domain simulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 11(28): 2015-2018.
- [11] Franceschetti G, Migliaccio M, and Riccio D, *et al.*. SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110-123.
- [12] Franceschetti G and Lanari R. A new two-dimensional squint mode SAR processor[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 854-863.
- [13] Franceschetti G and Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999: 125-141.

刁桂杰: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 回波仿真及雷达成像。

许小剑: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为高分辨率雷达成像、遥感特征处理与识别、电磁散射与辐射建模等。