

## 高效星载 TOPSAR 场景回波信号模拟方法

徐伟<sup>\*①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 星载 TOPSAR 回波信号模拟中时域逐点法运算效率低, 而 2 维频域法又无法直接模拟星载 TOPSAR 回波信号。针对这个问题, 该文提出了一种高效的星载 TOPSAR 模式场景回波模拟方法。该方法在距离向上利用参考点回波与场景散射矩阵卷积完成, 在方位向上采用对逐个慢时间进行模拟和存储。文中详细给出该方法的处理流程, 分析了该方法的运算量, 同时还对比了点目标模拟结果与精确的时域模拟方法的差异, 最后利用模拟回波信号的成像及干涉结果验证了该文方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; TOPS 模式; 回波模拟; 成像算法; 干涉

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0187-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00216

## Efficient Spaceborne TOPS Mode SAR Raw Signal Simulation of Extended Scenes

Xu Wei<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The SAR raw signal simulator in the time domain by the target-by-target method is inefficient, while the simulator in the two-dimensional (2-D) frequency domain can not be directly used to generate the Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) raw data. As for this issue, an efficient TOPS raw data simulation approach is proposed. In the range direction, the 1-D convolution between echoes of referenced point target and scattering coefficient of the imaged scene is introduced, while raw data is simulated and stored by the pulse-by-pulse method in azimuth. The processing steps of the simulator are given in detail, and its computational complexity is analyzed. Simulated echoes of the proposed simulator and the accurate time domain simulator are compared. Finally, the imaging and interferometry results of the simulated data are given to validate the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** SAR; Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) mode; Echo simulation; Imaging algorithms; Interferometry

### 1 引言

回波模拟仿真是研究 SAR 系统参数及其成像算法的有效手段, 尤其在该模式实际 SAR 系统尚未建立, 缺乏真实的回波数据, 回波模拟仿真便成为系统分析和成像算法验证的唯一工具<sup>[1,2]</sup>。对涉及干扰、模糊影响、干涉处理算法时, 通常需要采用场景目标的回波数据。目前 SAR 场景回波信号模拟方法主要分为: 时域逐点法和 2 维频域法<sup>[3]</sup>。时域法模拟的回波信号精确, 但运算量大需要花费大量时间; 频域模拟方法通过已知点的脉冲响应函数和场景散

射系数分布函数的 2 维卷积快速产生回波数据, 该方法运算量小但存在一定误差<sup>[3-7]</sup>。

星载 TOPSAR 作为一种新型的宽幅模式<sup>[8-13]</sup>, 目前只有 TerraSAR-X 具备该模式<sup>[9-13]</sup>。本文主要针对时域法运算量大而 2 维频域法无法直接模拟 TOPSAR 回波信号, 提出了一种高效的混合时频域场景回波模拟方法, 并利用模拟信号的成像结果验证了方法的有效性。

### 2 星载 TOPSAR 模式

星载 TOPSAR 工作几何模型如图 1 所示。在距离向上, 采用 Burst 模式合理分配雷达在各条子测绘带上的工作时序, 最后拼接形成较宽的测绘带;

2011-03-10 收到, 2011-09-13 改回

\*通信作者: 徐伟 iecasxuwei@gmail.com

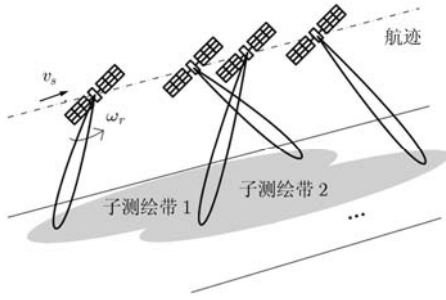


图1 星载 TOPSAR 模式示意图

在方位向上, TOPSAR 通过方位波束扫描加快了获取地面信息的速度, 利用其相对“冗余”时间来观测其它子测绘带, 同时方位波束扫描还克服了 ScanSAR 中的主要缺陷。

星载 TOPSAR 模式在其中一条子测绘带内的回波平面几何模型如图 2 所示。假设雷达发射的是线性调频信号, 则在一个 Burst 数据块内获得的基带回波数据可以表示为

$$ss_r(t, \tau) = \iint_{\text{scene}} \sigma(x, r) \cdot \exp(-j4\pi r / \lambda) \cdot ss(t, \tau; x, r) dx dr \quad (1)$$

$$ss(t, \tau; x, r) = W_a \left[ \frac{v_j t - x}{X} \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t; r, x) \right] \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left[ \tau - \frac{2r}{c} - \frac{2\Delta R(t; r, x)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \text{rect} \left[ \frac{\tau - 2r/c - 2\Delta R(t; r, x)/c}{\tau_p} \right] \text{rect} \left[ \frac{t}{T_b} \right] \quad (2)$$

$$\Delta R(t; r, x) = \sqrt{r^2 + (v_s t - x)^2} - r \quad (3)$$

其中  $\sigma(x, r)$  表示  $(x, r)$  处目标的散射系数,  $t, \tau$  分别对应“慢时间”和“快时间”,  $W_a[\cdot]$  表示方位向天线方向图,  $X$  表示波束“足印”长度,  $K_r$  和  $\tau_p$  分别

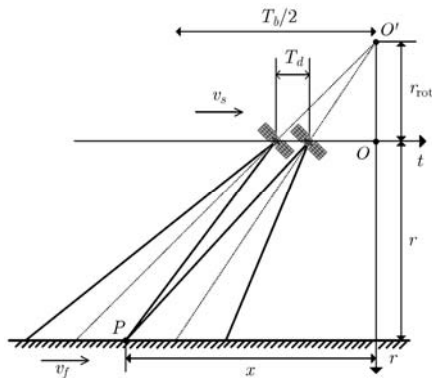


图2 星载 TOPSAR 回波平面几何模型

表示发射信号调频率和脉宽,  $v_s$  和  $v_f$  分别为平台的有效速度和波束在地面的移动速度,  $T_b$  为波束驻留时间,  $c$  表示光速。图 2 中  $T_d$  和  $r_{\text{rot}}$  分别表示方位波束在目标的驻留时间和平台到虚拟旋转中心的最短斜距<sup>[10]</sup>。

如果令  $t' = x/v_s$  和  $\tau' = 2r/c$ , 式(1)可以写成

$$ss_r(t, \tau) = \text{rect} \left[ \frac{t}{T_b} \right] \cdot \iint_{\text{scene}} \gamma(t', \tau') \cdot W_a \left[ \frac{At - t'}{X/v_s} \right] \cdot ss(t - t', \tau - \tau'; \tau') dt' d\tau' \quad (4)$$

其中

$$\gamma(t', \tau') = \sigma(t', \tau') \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{c\tau'}{2} \right] \quad (5)$$

$$A = v_f/v_s = 1 + \omega_r r/v_s \quad (6)$$

$$ss(t - t', \tau - \tau'; r) = \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t - t'; r) \right] \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left[ \tau - \tau' - \frac{2\Delta R(t - t'; r)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \text{rect} \left[ \frac{\tau - \tau' - 2\Delta R(t - t'; r)/c}{\tau_p} \right] \quad (7)$$

$$\Delta R(t - t'; r) = \sqrt{r^2 + v_s^2(t - t')^2} - r \quad (8)$$

其中  $A$  为方位分辨率改变因子, 天线长为  $L_a$  的星载 TOPSAR 系统可获得的方位分辨率约为  $AL_a/2$ 。由式(4)可得, 方位波束扫描使得方位回波的加权方式  $W_a[\cdot]$  发生改变,  $W_a[\cdot]$  不再是  $t - t'$  或者  $t'$  的函数。即使忽略  $ss(t - t', \tau - \tau'; r)$  中的空变性, 星载 TOPSAR 回波信号也无法写成地面散射系数分布函数与 SAR 系统脉冲响应函数的 2 维卷积形式。

在星载 TOPSAR 模式下, 不同方位目标的多普勒历程和合成孔径的起止时间都不相同。因此, 它无法像条带模式利用不同方位向目标共性频谱特征来描述整个场景回波<sup>[3]</sup>, 同时它也无法像聚束模式利用信号截取来获得整个场景回波<sup>[7]</sup>。因此, 星载 TOPSAR 模式无法像传统条带和聚束模式可以直接采用 2 维频域法模拟产生场景回波信号。

### 3 星载 TOPSAR 回波模拟

#### 3.1 回波模拟方法

如果将式(4)中的二重积分拆开, 式(4)可以写成

$$ss_r(t, \tau) = \text{rect} \left[ \frac{t}{T_b} \right] \int W_a \left[ \frac{At - t'}{X/v_s} \right] \cdot \left\{ \int \gamma_1(t', t - t', \tau') ss(t - t', \tau - \tau') d\tau' \right\} dt' \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1(t', t-t', \tau') &= \sigma(t', \tau') \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{c\tau'}{2}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} ss(t-t', \tau-\tau') &\approx \exp\left\{-j\pi K_r \left[\tau-\tau' - \frac{2\Delta R(r_0)}{c}\right]^2\right\} \\ &\quad \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau-\tau' - 2\Delta R(r_0)/c}{\tau_p}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $r_0$  表示场景中心到雷达的最短斜距。在 SAR 成像算法中, 为了保证聚焦深度, 通常要求相位误差小于  $\pi/4$ 。回波模拟作为成像算法的逆过程, 式(11)中约等号成立的条件为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \left| \pi K_r \left[\tau-\tau' - \frac{2\Delta R(r_0)}{c}\right]^2 \right. \\ &\quad \left. - \pi K_r \left[\tau-\tau' - \frac{2\Delta R(r)}{c}\right]^2 \right| < \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (12)$$

则

$$\Delta\varphi \approx \left| 4\pi K_r \left(\tau-\tau' - \frac{2\Delta R(r)}{c}\right) \frac{\Delta R(r_0) - \Delta R(r)}{c} \right| < \frac{\pi}{4} \quad (13)$$

根据 SAR 工作原理, 式(13)满足以下条件:

$$\begin{aligned} \left| \tau-\tau' - \frac{2\Delta R(r)}{c} \right| &\leq \tau_p \quad (14) \\ |\Delta R(r_0) - \Delta R(r)| &\approx \left| \frac{(vt-x)^2}{2r_0} - \frac{(vt-x)^2}{2r} \right| \approx \left| \frac{(vt-x)^2}{2r^2} (r-r_0) \right| \\ &\leq \left| \frac{(0.886\lambda r/L_a)^2}{2r^2} (r-r_0) \right| \leq \left| \frac{1}{2} \left(\frac{0.886\lambda}{L_a}\right)^2 \cdot \frac{W_s}{2} \right| \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $W_s$  表示斜距测绘带宽。这里可以得到式(11)近似成立的条件为

$$W_s \leq \frac{1}{4} \frac{c}{B_r} \left(\frac{L_a}{0.886\lambda}\right)^2 \quad (16)$$

式中  $B_r$  表示发射信号带宽。以 TerraSAR-X 参数为例, 雷达工作频率为 9.65 GHz, 天线长度为 4.8 m, 发射信号带宽为 150 MHz, 可得这种方法所允许的最大斜距测绘带宽约为 15 km。

根据式(9)可得, 星载 TOPSAR 场景回波信号在距离向上可以近似写成地面散射系数分布函数与已知点距离向脉冲响应函数的 1 维卷积形式, 所以在距离向上仍可以采用快速傅里叶变换高效地产生。根据驻点相位原理, 此时系统距离向脉冲响应经傅里叶变换后可以写成

$$\begin{aligned} sS(t-t', f) &= \text{FT}\{ss(t-t', \tau-\tau')\} \\ &= \int \exp\left\{-j\pi K_r \left[\tau - \frac{2\Delta R(r_0)}{c}\right]^2\right\} \\ &\quad \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2\Delta R(r_0)/c}{\tau_p}\right] \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \\ &\approx \frac{f_s \exp(-j\pi/4)}{\sqrt{|K_r|}} \exp\left(-j2\pi f \frac{2\Delta R(r_0)}{c}\right) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi f^2/K_r) \text{rect}\left[\frac{f}{K_r \tau_p}\right] \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $\text{FT}\{\cdot\}$  表示 1 维傅里叶变换,  $f_s$  为距离向采样频率。此时可以将式(9)写成

$$\begin{aligned} ss_r(t, \tau) &= \text{rect}\left[\frac{t}{T_b}\right] \int W_a \left[\frac{A \cdot t - t'}{X/v_s}\right] \\ &\quad \cdot \text{FT}^{-1}\{\Gamma(t', t-t', f) \cdot sS(t-t', f)\} dt' \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\Gamma(t', t-t', f) = \text{FT}\{\gamma_1(t', t-t', \tau')\} \quad (19)$$

式中  $\text{FT}^{-1}\{\cdot\}$  表示 1 维傅里叶逆变换。根据式(18)可以得到星载 TOPSAR 场景回波模拟方法, 如图 3 所示。星载 TOPSAR 场景回波信号, 在距离向采用频域模拟方法, 而在方位向上只能按顺序逐个慢时间时刻模拟和存储, 其模拟过程可以归纳如下:

(1) 设置方位向雷达工作的起始时刻  $t_{\text{be}}$  和终止时刻  $t_{\text{en}}$ , 这主要取决于成像场景大小和场景中心的波束中心时刻  $t_{\text{mid}}$ , 图 3 中  $m$  的初值为 0。起始时刻  $t_{\text{be}}$  和终止时刻  $t_{\text{en}}$  可以写成

$$t_{\text{be}} = t_{\text{mid}} - \frac{X + X_{\text{scene}}}{2v_f} \quad (20)$$

$$t_{\text{en}} = t_{\text{mid}} + \frac{X + X_{\text{scene}}}{2v_f} \quad (21)$$

式中  $X_{\text{scene}}$  表示成像场景方位向尺寸。

(2) 对每个慢时间时刻回波信号进行模拟, 将地面散射系数分布函数  $\sigma(t', \tau')$  与传递函数  $G_1$  相乘得到  $\gamma_1(t', t_m - t', \tau')$ , 其中传递函数  $G_1$  可以表示为

$$G_1(t', t_m - t', \tau') = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{c\tau'}{2}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R\right) \quad (22)$$

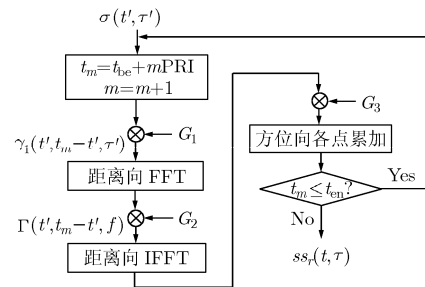


图 3 星载 TOPSAR 模拟流程图

(3)距离向傅里叶变换将  $\gamma(t', t_m - t', \tau')$  转换到慢时间-频率域内。

(4)将  $\Gamma(t', t_m - t', f)$  与  $G_2$  相乘,  $G_2$  为参考斜距  $r_0$  处距离向系统脉冲响应为

$$G_2 = \frac{f_s \exp(-j\pi/4)}{\sqrt{|K_r|}} \exp\left(-j2\pi f \frac{2\Delta R(r_0)}{c}\right) \cdot \exp\left(j\pi f^2 / K_r\right) \text{rect}\left[\frac{f}{K_r \tau_p}\right] \quad (23)$$

(5)利用距离向傅里叶逆变换将信号转换回2维时域。

(6)利用传递函数  $G_3$  对  $t_m$  时刻的方位向回波信号进行加权, 其中  $G_3$  可以表示为

$$G_3 = W_a \left[ \frac{At_m - t'}{X/v_s} \right] \quad (24)$$

(7)对同一距离位置不同方位位置目标回波信号进行累加, 此时便完成了  $t_m$  慢时间时刻场景回波信号模拟工作。

(8)重复(2)~(7)步骤直至完成慢时间  $t_{be} \sim t_{en}$  内所有 TOPSAR 回波信号的模拟。

对有些方位尺寸很大的分布目标成像场景, 单个 Burst 无法完全照射整个成像场景, 完整的场景回波信号需要由多个 Burst 数据块组成。对于这样成像场景的回波信号模拟, 需要根据星载 TOPSAR 工作几何模型, 对每个 Burst 数据块回波信号进行依次模拟和存储。

### 3.2 运算效率分析

为了验证本文方法具有较高的运算效率, 这里对本文方法与2维时域方法的运算量进行比较, 采用复乘次数来衡量方法的复杂度。其中时域逐点法主要根据 SAR 成像的几何关系, 对每一个散射点的回波逐个进行模拟, 这种方法所需要的复乘次数可以表示为

$$N_T = (M_x M_r)(N_x N_r) \quad (25)$$

式中  $M_x$  和  $M_r$  分别表示方位向和距离向散射点个数,  $N_x$  和  $N_r$  分别表示回波在方位向和距离向采样点数。假设输出物理间隔与场景相邻像素间隔相当,  $N_x$  和  $N_r$  则可以表示为

$$N_x \approx M_x + N_{x0} \quad (26)$$

$$N_r \approx M_r + N_{r0} \quad (27)$$

式中  $N_{x0}$  和  $N_{r0}$  分别表示一个合成孔径时间内的脉冲数和一个脉冲内的采样点数。

本文方法主要包括两次 FFT 运算和三次复数矩阵相乘运算, 其运算量可以表示为

$$N_{TF} = N_x M_x N_r \log_2 N_r + 3N_x M_x N_r \quad (28)$$

则本文方法与2维时域逐点模拟方法的运算量之比

$\eta$  可以表示为

$$\eta = \frac{N_{TF}}{N_T} = \frac{N_x M_x N_r \log_2 N_r + 3N_x M_x N_r}{(M_x M_r) \cdot (N_x N_r)} = \frac{\log_2 N_r + 3}{M_r} \quad (29)$$

从式(29)中可以发现, 随着距离向回波模拟点数的增加, 本文模拟方法相对于2维时域逐点回波模拟方法的效率就越高, 如图4所示, 其中假设一个脉冲内的采样点数  $N_{r0}$  为2000。

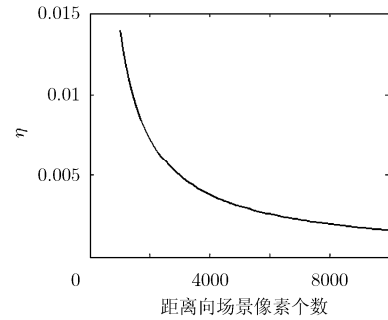


图4 运算量之比  $\eta$  与距离向点数的关系

## 4 仿真实验

为了验证本文模拟方法的准确性, 这里分别对2维平面成像场景和3维场景进行回波模拟仿真实验。其中系统仿真参数如表1所示。

表1 系统仿真参数

雷达载频 $f_c$	9.65 GHz
方位向波束宽度 $\theta$	0.33°
平台飞行有效速度 $v_s$	7300 m/s
发射带宽 $B$	15 MHz
信号采样率 $f_s$	20 MHz
脉冲宽度 $\tau_p$	10 $\mu$ s
系统 PRF	3475 Hz
波束扫描角速度 $\omega_r$	2.225°/s
Burst 长度 $T_b$	0.48 s
场景中心斜距 $R_c$	600 km

### 4.1 平面成像场景

这里先对两个不同位置的点目标  $P1$  和  $P2$  进行回波模拟, 其中假设点目标  $P1$  和  $P2$  相对于星载 TOPSAR 的 Burst 成像场景中心的相对位置分别为 (0 km, 0 km) 和 (5 km, 5 km), 如图5(a)所示。再设置一个分布目标成像场景, 分布目标的像素大小为  $500 \times 500$ , 方位向与距离向相邻像素间隔均为 5 m

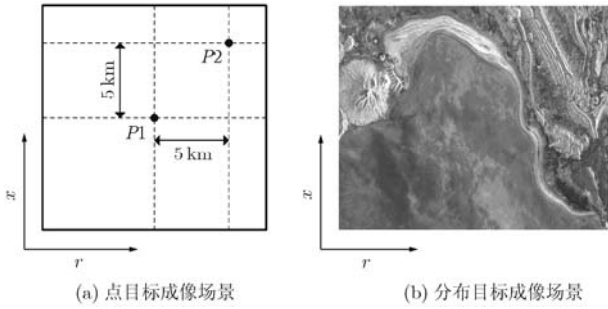


图 5 平面场景设置

且均小于表 1 系统参数下的方位向与距离向理论分辨率。

图 6 示意了时域逐点法与本文方法得到的点目标 P1 和 P2 回波数据的实部，可以很直观地看出两种方法得到的结果十分相似。图 7 和图 8 分别对比

这两种方法得到的目标 P1 回波在距离向和方位向的幅度差异和相位差异。由图 7 可以发现，在距离向上，由于采用频域模拟方法，二次相位引起了距离向回波的时域的非涅尔起伏。而在方位向上，本文方法采用时域逐个慢时刻模拟的方式，故其不存在较大的幅度和相位偏差。

为了进一步验证本文方法的有效性，分别对本文方法模拟的回波数据进行成像。表 2 给出了 P1 和 P2 点成像结果的性能指标，其性能参数与理论值基本相吻合。图 9 则给出了分布目标的成像结果，其中成像采用文献[4]给出的 TOPSAR 成像算法。为了避免直接采用幅度图像作为散射矩阵而导致的干涉现象出现，这里对每个像素点增加了一个随机相位，相比于图 5(a)中的原图，此时聚焦图像质量有一定的下降。

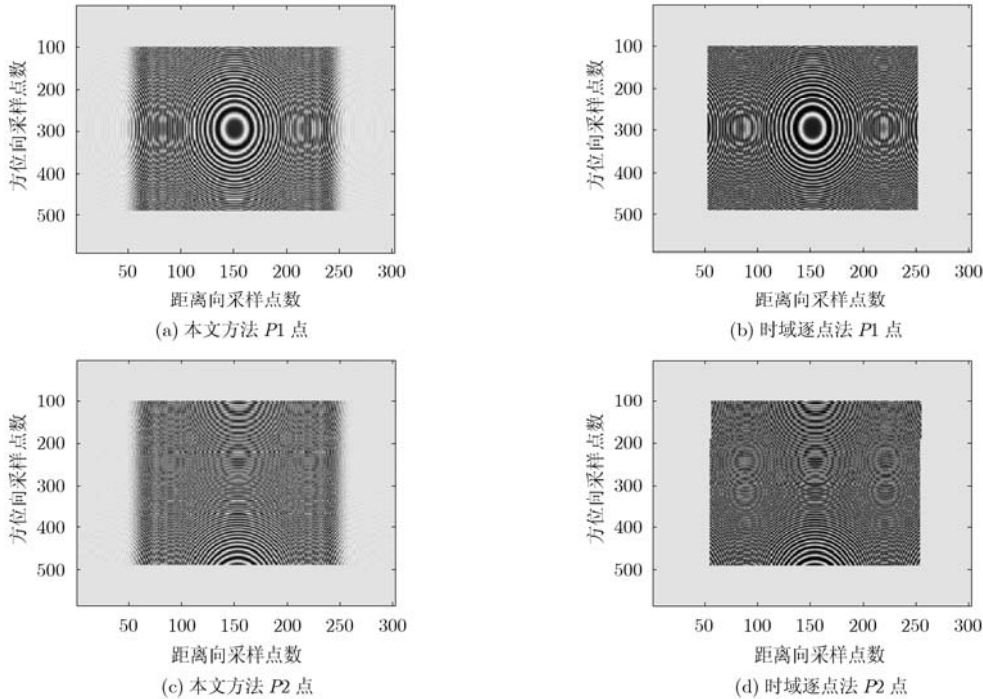


图 6 点目标回波实部对比

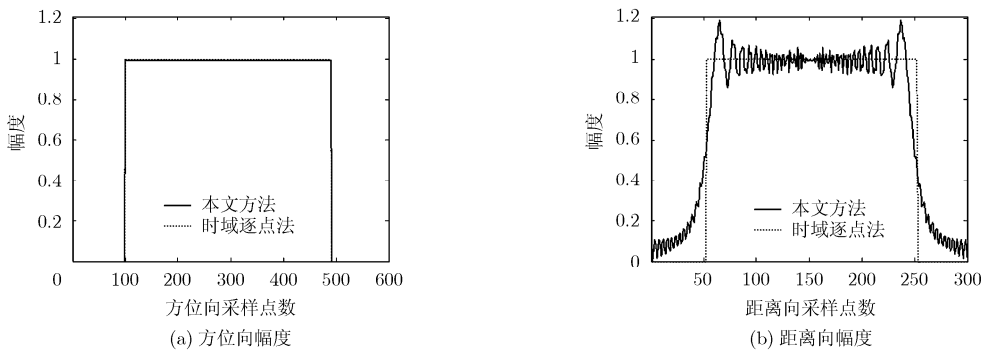


图 7 点目标回波幅度对比

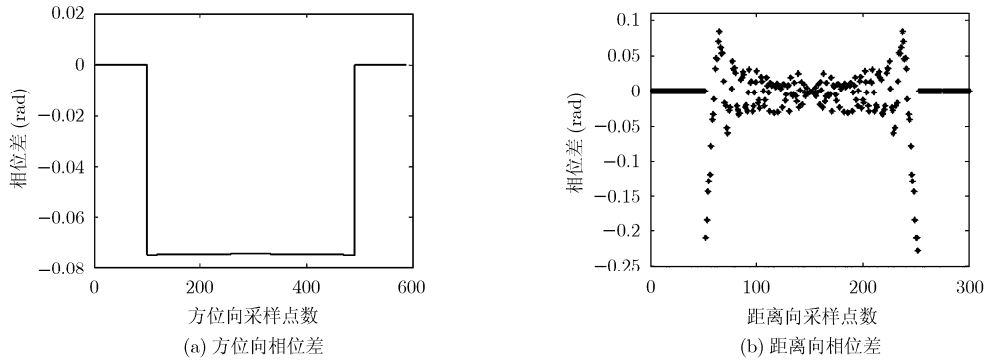


图 8 点目标回波相位对比

表 2 点目标成像性能指标

目标	方位向			距离向		
	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
P1 理论值	10.06	-13.26	-9.80	8.86	-13.26	-9.80
P1 实验值	10.26	-13.18	-9.88	9.02	-13.18	-9.65
P2 理论值	10.12	-13.26	-9.80	8.86	-13.26	-9.80
P2 实验值	10.34	-13.12	-9.64	9.08	-13.14	-9.35

4.2.3 维成像场景

为了验证本文模拟方法适用于星载 TOPSAR 干涉仿真实验，下面构造 3 维人造场景目标。其中假设成像场景中心有一个半径为 250 m，锥角  $\alpha$  为  $60^\circ$  的圆锥体，雷达视角  $\theta$  约为  $50^\circ$ ，小于锥角  $\alpha$ ，如图 10(a)所示，故其不存在叠掩现象，圆锥体的散射系数幅度如图 10(b)所示，相邻散射点在 X 和 Y 方向间隔为 5 m，小于系统的理论分辨率。

这里星载 TOPSAR 模式采用重复轨道干涉，雷达平台沿 X 方向飞行，两次照射时雷达相对成像场景中心的位置  $(x, y, h)$  分别为  $(0 \text{ km}, 613.5 \text{ km}, 514.8 \text{ km})$  和  $(0 \text{ km}, 612.1 \text{ km}, 514.3 \text{ km})$ ，基线长度约为 1486.6 m，对两次产生的回波分别进行成像，

两幅图像的干涉结果如图 11(a)所示，其高程反演结果如图 11(b)所示，其反演结果与图 10(a)中模拟场景地形设置是一致的，从而有效地验证了本文的星载 TOPSAR 场景回波信号模拟方法。

5 结论

方位波束主动扫描使得不同方位位置目标的脉冲响应存在一定的差异，故传统的 2 维频域模拟方法无法直接适用于星载 TOPSAR 模式，而时域逐点法运算量大效率低。针对这个问题，本文提出了一种高效的星载 TOPSAR 回波模拟方法，该方法距离向采用频域模拟，而在方位向则采用时域逐个慢时刻模拟，仿真结果很好地验证了本文方法。

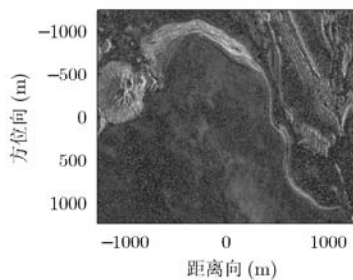


图 9 分布目标成像结果

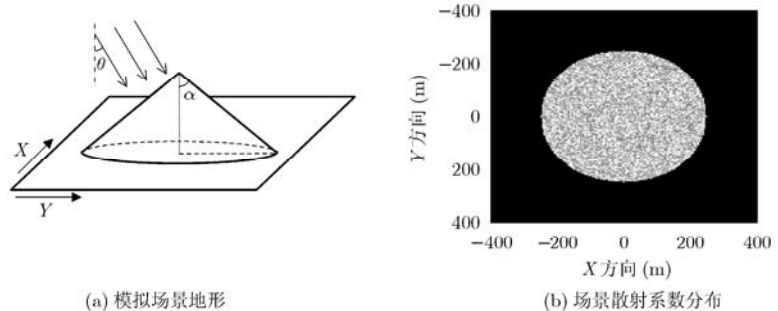


图 10 3 维成像场景设置

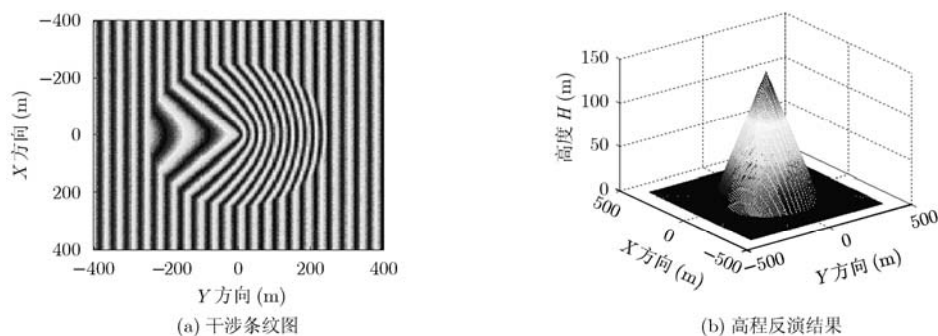


图 11 3 维成像场景干涉结果

## 参 考 文 献

- [1] Duro J, Albiol D, Koudogbo N, *et al.* Emulation of TOPSAR data from TerraSAR-X Stripmap mode[C]. Proc. of EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 564-567.
  - [2] Qiu Xiao-lan, Hu Dong-hui, Zhou Liang-jiang, *et al.* A bistatic SAR raw data simulator based on inverse  $\omega$ - $k$  algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1540-1547.
  - [3] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, *et al.* SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110-123.
  - [4] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, *et al.* SAR raw signal simulation for urban structures[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, 41(9): 1986-1995.
  - [5] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, *et al.* Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2851-2860.
  - [6] 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 Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2323-2334.
  - [7] Wang Yu, Zhang Zhi-ming, and Deng Yun-kai. Squint spotlight SAR raw signal simulation in the frequency domain using optical principles[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2008, 46(8): 2208-2215.
  - [8] Zan F and Guarnieri A. TOPSAR: terrain observation by progressive scans[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352-2360.
  - [9] Meta A, Mittermayer J, Prats P, *et al.* TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759-769.
  - [10] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
  - [11] Prats P, Meta A, Scheiber R, *et al.* A TOPSAR processing algorithm based on extended chirp scaling: evaluation with TerraSAR-X data[C]. Proc. of EUSAR, Friedrichshafen, Germany, 2008: 141-144.
  - [12] Mittermayer J, Prats P, D'Aria D, *et al.* TOPS Sentinel-1 and TerraSAR-X processor comparison based on simulated data[C]. Proc. of EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 362-365.
  - [13] Prats P, Marotti L, Wollstadt S, *et al.* TOPS Interferometry with TerraSAR-X[C]. Proc. of EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 44-47.
  - [14] 张澄波. 综合孔径雷达: 原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 98-100.
- 徐 伟: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为新体制星载 SAR 系统仿真和信号处理.
- 邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载 SAR 系统设计.