# 基于方位向预处理和后处理的 TOPSAR 成像方法

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: Burst 工作模式和方位波束主动扫描使得 TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans SAR)回波 信号同时具备 ScanSAR 和聚束模式回波信号特点,即方位输出时间混叠和多普勒频谱混叠。虽然时域和频域同时 升采样操作能够解决混叠问题,但同时带来成像运算量明显提高和内存消耗显著增大的问题。针对 TOPSAR 回波 信号特殊的方位时频关系,该文提出一种结合方位向预处理和后处理的 TOPSAR 成像方法。该方法利用复制拼接 和去斜的方法来解决混叠问题,利用信号截取操作剔除干扰信号,同时还可以减少采样点数,提高算法运算效率。 点目标和分布目标的仿真结果验证了这种成像方法的有效性。

 关键词: TOPSAR; Burst 模式; 波束扫描; 混叠; CS 算法

 中图分类号: TN958
 文献标识码: A

**DOI**: 10.3724/SP.J.1146.2010.00668

文章编号:1009-5896(2011)-04-0798-07

# An Imaging Approach for TOPSAR Data Based on Azimuth Pre-processing and Post-processing

Xu Wei<sup>(1)</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, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Burst mode and azimuth beam steering lead to echoes of TOPSAR mode obtain echo characteristics of both ScanSAR and spotlight mode, such as azimuth data folding in the output time domain and Doppler spectrum aliasing. Up-sampling both in the slow time and Doppler frequency domain can resolve the aliasing problem but with the unwanted result of seriously increased computational complexity and memory consumption. According to the TOPSAR raw data support in the slow Time/Frequency Domain (TFD), a new TOPSAR imaging approach combined with azimuth pre-processing and post-processing operations is proposed. The mosaiking with deramping operation approach is adopted to resolve the data aliasing problem. Furthermore, azimuth data interception is used to eliminate the disturbance signals and reduce azimuth total samples to improve the computational efficiency. Simulation results of point targets and distributed target validate the effectiveness of the presented imaging approach.

**Key words**: TOPSAR (Terrain Observation by Progressive scans SAR); Burst mode; Beam steering; Aliasing; Chirp Scaling (CS) algorithm

1 引言

针对 ScanSAR 中存在明显的扇贝效应和模糊 比与信噪比在方位向上严重不一致的问题<sup>[1]</sup>, 欧空局 (ESA)的Attema和意大利的Rocca提出了一种新型 的星载 SAR 工作模式,即 TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans)模式<sup>[1-3]</sup>。该模式 利用 Burst 工作方式和方位波束主动扫描来获取宽 幅测绘能力,方位波束主动扫描能很好地削弱 Burst 工作方式下的扇贝效应和输出信噪比在方位向严重

2010-06-29 收到,2010-10-08 改回

不一致的问题<sup>[4]</sup>。星载 TOPSAR 模式强大的宽幅测 绘能力及其优良的系统性能使它很快被运用于实际 工程。2007年,德国宇航中心(DLR)利用 TerraSAR-X 卫星成功获得了第1张星载 TOPSAR 图像及干 涉结果<sup>[2-4]</sup>。目前,ESA 也正准备在 Sentinel-1 卫 星上利用 TOPSAR 模式来获得宽幅干涉图像<sup>[2-4]</sup>。

Burst 工作模式和方位波束主动扫描使得 TOPSAR 回波兼有 ScanSAR 回波方位输出时间混 叠<sup>[6]</sup>和聚束/滑动聚束回波多普勒频谱混叠<sup>[6,7]</sup>的问 题。方位向频域和时域的升采样操作能够分别解决 输出时间混叠和多普勒频谱混叠的问题,但同时升 采样操作大大增加了方位向的采样点数,使得

<sup>\*</sup>通信作者: 徐伟 iecasxuwei@gmail.com

TOPSAR 成像算法运算量和内存消耗显著提高。针 对 TOPSAR 方位回波特殊的时频关系,本文通过 结合聚束模式方位预处理方法<sup>[6]</sup>和 ScanSAR 方位后 处理方法<sup>[6]</sup>,提出了一种星载 TOPSAR 成像方法, 同时利用信号截取操作得到有用信号,并且减少了 方位向总采样点数。点目标和分布目标的成像结果 验证了这种成像方法的有效性。

## 2 星载 TOPSAR 工作原理

TOPSAR作为一种新型的星载SAR工作模式, 它结合了ScanSAR和滑动聚束模式的共同特点,它 的工作几何模型如图1所示。在距离向上,TOPSAR 与传统ScanSAR模式相同,都采用Burst工作方式 合理分配雷达在各条子测绘带上的工作时序,通过 多条子测绘带拼接形成较宽的测绘区域;在方位向 上,它采用了一种逆向滑动聚束式的波束扫描方式, 加快了雷达获取地面信息的速度,利用其"冗余" 时间来观测其它子测绘带。方位波束主动扫描使目 标完整地被主波束中心照射,从而削弱了传统 ScanSAR模式下的扇贝效应和模糊比与信噪比在 方位向严重不一致的问题<sup>[1,4]</sup>。在星载TOPSAR模 式下,方位波束主动扫描缩短了目标的合成孔径时 间,所以它也是通过牺牲目标的方位分辨率来获得 较大的测绘带宽。



图 1 星载 TOPSAR 模式工作几何模型

## 3 TOPSAR 回波

#### 3.1 回波模型

星载 TOPSAR 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(LFM), 雷达在一 个 Burst 数据块内获得的基带回波数据可以表示为

$$s_r(t,\tau) = \iint_{\text{scene}} \sigma(x,r) ss(t,\tau;x,r) \mathrm{d}x \mathrm{d}r \tag{1}$$

其中

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



图 2 TOPSAR 的回波几何模型

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

式中 $\sigma(x,r)$ 表示(x,r)处目标的散射系数, $t,\tau$ 分别对 应系统的慢时间和快时间, $W_a(\cdot)$ 表示方位向天线方 向图,X表示波束"足印"在地面的长度, $K_r$ 表示 发射线性调频信号的调频率, $\tau_p$ 为发射信号的脉冲 宽度, $v_s$ 和 $v_f$ 分别为雷达平台的有效速度和波束在 地面的移动速度, $T_b$ 表示方位波束在子测绘带的驻 留时间,c表示光速。

根据图 2 中的几何关系,可以容易得到下面关系:

$$A(r) = \frac{-r_{\rm rot} + r}{-r_{\rm rot}} = \frac{v_f}{v_s} \approx \frac{\omega_r r + v_s}{v_s} \tag{4}$$

式中 A 为分辨率改变因子。由式(4)可得  $r_{rot} = -v_s/\omega_r = -r_0/(A-1)$ ,这说明对于星载 TOPSAR 模式 下的同一 Burst 数据块,方位波束扫描有一个固定 的虚拟旋转中心 O',它的位置与目标在测绘带的位 置无关。此时 TOPSAR 目标回波信号的多普勒中 心随方位时间 t的变化率可以表示为

$$k_{\rm rot} = \frac{\partial f_{\rm dc}(t)}{\partial t} = \frac{2v_s\omega_r}{\lambda} = -\frac{2v_s^2}{\lambda r_{\rm rot}}$$
(5)

式中 *f*<sub>dc</sub>(*t*) 表示随方位时间变化的目标多普勒中心。 由式(5)可得,目标回波多普勒中心频率随方位时间 的变化率为常数,它与目标的位置无关。

### 3.2 方位回波时频关系

星载 TOPSAR 回波信号方位向时频关系,如 图 3 所示。图 3 中  $B_b$ ,  $B_f$ 和  $B_a$ 分别表示回波信号 多普勒总带宽,方位波束带宽和点目标的有效多普 勒带宽,  $T_a$ 和  $k_a$ 分别对应方位向波束在目标上的驻 留时间和方位调频率,  $t_c$ 和  $t_a$ 分别对应某点目标的 波束中心时刻和多普勒为零的时刻。

从图 3 可得, TOPSAR 回波信号方位时频关系 具有以下的特点:

(1)方位向多普勒总带宽要大于系统的 PRF, 而 点目标的多普勒带宽要小于 PRF;



图 3 TOPSAR 回波方位时频关系

(2)系统数据采集时间  $T_b$ 要小于 TOPSAR 图像 的最后输出时间  $T_{out}$ ;

(3)目标的多普勒中心频率和波束中心时刻都 随目标方位位置的变化而变化。

在 SAR 成像算法中,其中要解决的最主要问题 就是距离徙动校正(RCMC), RCMC 与目标的多普 勒瞬时频率有关,所以必须首先解决 TOPSAR 回 波信号多普勒混叠问题。同时该模式的系统数据采 集时间 *T<sub>b</sub>*小于 SAR 图像输出时间 *T<sub>out</sub>*,最后会造 成图像的卷绕和混叠。

## 4 成像方法

星载 TOPSAR 回波信号同时存在多普勒频谱 混叠和方位输出时间混叠的问题,如果采用传统条 带模式的成像算法来处理星载 TOPSAR 回波数据, 需要对原有算法增加方位预处理和方位后处理操作 来分别解决多普勒频谱混叠和方位输出时间混叠问 题。所以本文的成像方法由 3 部分组成:方位预处 理、经典 CS 算法和方位后处理,其流程如图 4 所 示。其中方位预处理用来解多普勒频谱混叠问题, 方位信号截取操作可以用来抑制干扰信号和降低成 像算法的运算量;利用经典 CS 算法可以获得 2 维 聚焦的 TOPSAR 图像,但图像在方位向存在卷绕 和混叠;方位后处理用来展开方位混叠的 TOPSAR 图像。

### 4.1 方位预处理

在星载 TOPSAR 模式下,由于多普勒总带宽



图 4 星载 TOPSAR 成像方法流程

大于系统的 PRF,如果直接将信号转换到 2 维频域 就会出现频谱混叠现象。文献[6]采用信号复制拼接 方法解决了聚束模式下的多普勒混叠问题。在聚束 模式下,该方法可以在方位时域正确位置得到全分 辨 SAR 有效图像,并在相邻区域得到非全分辨的 SAR 干扰图像,由于它们方位聚焦位置的差异,干 扰图像不会影响到全分辨有效图像。但对于 TOPSAR模式来说,由于其还存在方位输出时间混 叠问题,干扰图像势必会影响到全分辨有效图像。 文献[1]利用方位滤波滤除了干扰信号,同时再在信 号多普勒域采用抽取重采样方法减少方位向总采样 点数。本文采用方位信号截取方法来替代文献[1]中 的方位滤波和多普勒域重采样过程,其主要处理过 程如下:

(1)利用方位向快速傅里叶变换(FFT)变换将回 波信号转换到距离-多普勒频域。由于 TOPSAR 模 式的多普勒总带宽要大于系统的 PRF,造成多普勒 频谱混叠,如图 5(a)所示。

(2)复制 *M<sub>f</sub>*份 TOPSAR 回波信号,并在方位频 域进行拼接,如图 5(b)所示,其中 *M<sub>f</sub>*可以表示为

$$M_f = \left| \frac{B_b}{\text{PRF}} \right| \tag{6}$$

式中[•]表示上取整。

(3)利用方位频域去斜函数 G<sub>de</sub> 提取出有用的回 波信号,其中 G<sub>de</sub> 可以表示为

$$G_{\rm de} = \exp\left[j\pi \left(f_a - f_{\rm sdc}\right)^2 / k_{\rm rot}\right] \tag{7}$$

式中 fsdc 表示场景的多普勒中心频率。

(4)利用方位向逆 FFT(IFFT)操作将回波信号 转换回方位时域,同时在方位向上截取出有用的回 波信号,如图 5(c)所示。其中截取信号长度 T<sub>w</sub> 需要 大于信号的有效长度,T<sub>w</sub> 可以表示为

$$T_w \ge \frac{T_d \cdot |k_a|}{\left|k_a \cdot k_{\rm rot}/(k_a + k_{\rm rot})\right|} = \frac{T_d \cdot A}{A - 1} \tag{8}$$

方位信号的时域截取操作相当于对信号在多普勒频域进行重采样的过程,而且这种操作相对灵活。 此时方位向的总采样点数为 B<sub>b</sub>·T<sub>w</sub>,要小于时域升



图 5 方位预处理示意图

采样后的方位向总点数 B<sub>i</sub> · T<sub>i</sub> 。由此可见,方位信 号截取处理可以保持目标的瞬时多普勒历程,同时 方位向总采样点数得到了大大降低。

## 4.2 条带 CS 成像算法

星载 TOPSAR 回波信号经过方位向预处理后, 就可以采用条带模式成像算法来处理。CS 算法<sup>18</sup>是 一种无需插值操作的高效成像算法,本文采用 CS 算法来处理星载 TOPSAR 回波信号,其处理过程 如图 4 所示。其中 H<sub>1</sub>和 H<sub>2</sub>分别用来完成距离向变 标和距离徙动校正(RCMC)与距离压缩操作,其表 达式可以参考文献[8]。H<sub>3</sub>主要完成目标的方位压缩 和相位补偿,在方位预处理过程中,方位向引入了 方位频域去斜函数 G<sub>de</sub>,此时 H<sub>3</sub>可以表示为

$$H_{3}(f_{a},\tau;r_{\rm ref}) = \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda}c\tau\cdot\left[\beta(f_{a})-1\right] - j\pi\frac{f_{a}^{2}}{k_{\rm rot}} + j\Delta\phi\right\}$$
(9)

其中

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_s}\right)^2} \tag{10}$$

$$\frac{1}{\kappa(f_{a};r_{\rm ref})} = \frac{1}{K_{r}} - \frac{2\lambda r \left(\beta^{2}(f_{a}) - 1\right)}{c^{2} \cdot \beta^{3}(f_{a})} \tag{11}$$

$$\Delta\phi = -4\pi \frac{k(f_a; r_{\rm ref}) \cdot [1 - \beta(f_a)]}{c^2 \cdot \beta^2(f_a)} \cdot (r - r_{\rm ref})^2 \quad (12)$$

式中r<sub>ref</sub>表示参考点处的最短斜距。

#### 4.3 方位后处理

星载 TOPSAR 模式还同时存在着方位输出时 间混叠问题,经过方位预处理和 CS 成像算法后只 能得到方位混叠的 TOPSAR 图像,如图 6(a)和 6(b) 所示。其中图 6(a)示意了方位聚焦后 TOPSAR 信 号方位时频关系的变化情况,而图 6(b)示意了输出 TOPSAR 输出图像的混叠问题。在 ScanSAR 模式 下,如果直接采用条带模式的成像算法也会产生方 位输出混叠问题,文献[5]采用一种方位后处理方法 解决了 ScanSAR 图像混叠问题。这种后处理方法也 是在文献[9]聚束模式方位预处理方法基础上发展而 来的,并已经成功地应用在处理 ENVISAT/ASAR 的 ScanSAR 回波数据中<sup>[1,5]</sup>。这里同样采用方位回 波信号在多普勒域的截取操作替代文献[5]中的频域 滤波和时域抽取重采样操作。其处理过程归纳如下:

(1)复制  $M_t$ 份聚焦后的 TOPSAR 图像,并在方位时域进行拼接,如图 6(c)所示,其中份数  $M_t$ 可以表示为

$$M_t = \left| \frac{T_{\text{out}}}{T_w} \right| = \left| \frac{A \cdot (T_b - T_d)}{T_w} \right| \tag{13}$$

(2)利用方位时域去斜函数 h<sub>de</sub>来提取有用的方



图 6 方位后处理示意图

位回波信号,如图 6(c)所示,其中去斜函数 h<sub>de</sub>可以 表示为

$$h_{\rm de} = \exp\left[j\pi k_d (t - t_{\rm mid})^2\right] \tag{14}$$

其中

$$k_d = \frac{k_a \cdot k_{\rm rot}}{k_{\rm rot} - k_a} \tag{15}$$

式中 t<sub>mid</sub>表示 Burst 中心时刻。

(3)利用方位向 FFT 操作将 SAR 图像变换到距离-多普勒域,同时在多普勒域上截取出有用的回波 信号,如图 6(d)所示。在星载 TOPSAR 模式下, 由于点目标的多普勒带宽仅为方位波束带宽的 1/A,此时截取信号长度 B<sub>w</sub>可以表示为

$$B_w = \text{PRF}/A(r_0) \tag{16}$$

式中ro表示场景中心到雷达的最短距离。

(4)利用方位向 IFFT 操作就能得到解混叠的 TOPSAR 图像。为了使最后的成像结果能直接应用 于后续干涉处理,此时还需要利用传递函数 *h*<sub>re</sub>补偿 时域去斜函数 *h*<sub>de</sub> 造成的相位误差,其中 *h*<sub>re</sub> 为时域 去斜函数 *h*<sub>de</sub> 的共轭函数。

# 5 仿真试验

## 5.1 成像结果

为了验证本文成像方法的有效性,分别对点阵 目标和分布目标进行仿真试验,其中星载 TOPSAR 系统仿真参数如表1所示。

为了验证 TOPSAR 模式中存在着方位输出混 叠问题,分别设置一个点阵和分布目标成像场景, 如图 7 所示。其中 12 个点目标被均匀分布在半径为 1800 m 的圆上,而圆心位于 Burst 成像场景中心处, 其成像结果如图 8 所示。图 7(b)为一个像素大小为

表1 仿真参数

参数	数值
雷达载频 f <sub>c</sub>	$9.65~\mathrm{GHz}$
方位向波束宽度 $\theta$	$0.33^{\circ}$
平台飞行有效速度 v <sub>s</sub>	$6800 \mathrm{~m/s}$
发射带宽 B	$15 \mathrm{~MHz}$
信号采样率 fs	$20 \mathrm{~MHz}$
系统 PRF	$3475~\mathrm{Hz}$
波束扫描角速度 $\omega_r$	$3.225^{ m o}/{ m s}$
Burst 长度 $T_b$	0.48 s
场景中心斜距 $R_c$	$600 \ \mathrm{km}$

500×500的分布目标,其中假设方位向和距离向像 素间距均为8m,且小于方位向和距离向理论分辨 率,其成像结果如图9所示。从图8和图9中可以 看出,由于方位输出混叠的存在使得部分点目标无 法在准确的方位位置成像,出现方位卷绕问题如图 8(a)所示;而对于分布目标来说,SAR 图像出现了 严重方位混叠,如图9(a)所示。但经过方位后处理 操作,点目标都被校正到其准确的位置,如图8(b) 所示,混叠的分布目标图像也得到了展开,如图9(b) 所示。

#### 5.2 成像性能分析

成像算法的相位保持特性是十分重要的<sup>[10]</sup>,它 决定了成像结果能不能直接应用于干涉处理。图 10 为距离向不同位置的 3 个点目标经本文的成像方法 后的方位向幅度和相位的剖面图,它们的最短斜距 分别为 590 km,600 km 和 610 km。由图 10 可知, 各点主瓣内的相位保持不变,所以本文成像方法具 备相位保持特性。

星载 TOPSAR 模式引入了方位波束扫描工作 方式,这使得不同方位位置点目标对应不同的观测 斜视角<sup>[11,12]</sup>。假设有 3 个点目标 P1, P2 和 P3, 其 中目标 P2 位于成像场景中心, P1 和 P3 的距离向 相对位置分别为-10 km 和 10 km, 方位向相对位置 分别为-7 km 和 7 km,则点目标 P1, P2 和 P3 对 应的斜视角分别为-0.680°,0°和 0.658°。为了区分 这三个差异十分有限的斜视角,这里将距离向发射 脉冲带宽提高到 100 MHz,采样频率提高到 120 MHz。图11给出了经过插值后3个点目标的等高线, 从图 11 中可以看出, 3 个点目标得到了很好的聚焦 效果。表2给出了3个点目标的具体成像指标参数, 其中, PSLR 和 ISLR 分别表示峰值旁瓣比和积分旁 瓣比,它们与理论值基本相符。同时从表 2 中可以 看出,方位分辨率随目标斜距增大而变差,这主要 是由于在星载 TOPSAR 模式下测绘带近端目标的 合成孔径时间要大于测绘带远端目标的缘故。

## 6 结论

本文根据星载 TOPSAR 特殊的方位时频关系, 提出了一种基于方位预处理和后处理的星载 TOPSAR 成像方法。方位预处理和后处理操作分别





表 2 点目标成像性能参数

目标	方位向		距离向			
	分辨率(m)	$\mathrm{PSLR}(\mathrm{dB})$	$\mathrm{ISLR}(\mathrm{dB})$	分辨率(m)	$\mathrm{PSLR}(\mathrm{dB})$	ISLR(dB)
点 P2 理论值	14.32	-13.26	-9.80	1.33	-13.26	-9.80
<i>P</i> 1	14.20	-13.56	-10.17	1.34	-13.06	-10.10
P2	14.36	-13.03	-10.22	1.34	-12.85	-9.66
P3	14.60	-13.04	-10.15	1.34	-13.28	-10.15

解决了方位频谱和输出时间混叠问题,利用信号截 取操作可以减少扩展后方位信号的总采样点数,降 低了成像算法的运算量。该成像方法具有相位保持 特性,其成像结果可直接用于后续的干涉处理。文 中点目标和分布目标的仿真结果验证了本文的成像 方法。

## 参考文献

[1] Zan F D and Guarnieri A M. TOPSAR: Terrain observation

by progressive scans[J]. *IEEE Transactions on Geosciences* and Remote Sensing, 2006, 44(6): 2352–2360.

- [2] Meta A, Prats P, and Steinbrecher U. First TOPSAR image and interferometry results with TerraSAR-X[C]. Proc. of Fringe Workshop, Frascati, Italy, 2007: 1–8.
- [3] Meta A, Prats P, and Steinbrecher U. TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison[C]. Proc. of EUSAR, Friedrichshafen, Germany, 2008: 277–280.

- [4] Meta A, Mittermayer J, and Prats P. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and perfomance analysis[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759–769.
- [5] Guarnieri A M and Prati C. ScanSAR focusing and interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 1029–1038.
- [6] Prati C, Guarnieri A M, and Rocca F. SPOT mode SAR focusing with the ω-k technique[C]. Proc. of IEEE IGARSS, Espoo, Finland, 1991: 631–634.
- [7] Mittermayer J, Lord R, and Boerner E. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm[C]. Proc. of IEEE IGARSS, Toulouse, France, 2003: 1462–1464.
- [8] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136.

- [9] Prats P, Scheiber R, and Mittermayer J. 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.
- [10] Prats P, Marotti L, and Wollstadt S. TOPS interferometry with TerraSAR-X[C]. Proc. of EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 44–47.
- [11] Bai Xia, Sun Jing-ping, and Hong Wen. On the TOPS mode spaceborne SAR[J]. Science China-Information Sciences, 2010, 53(2): 367–378.
- [12] Mittermayer J, Prats P, and D'Aria D. TOPS Sentinel-1 and TerraSAR-X processor comparison based on simulated data[C]. Proc. of EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 362–365.
- 徐 伟: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 系统仿 真及其信号处理研究.
- 邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 从事星载 SAR 系统设计工作.