

## 星载滑动聚束 SAR 成像模型误差校正方法研究

韩冰<sup>\*①②</sup> 张永军<sup>②</sup> 胡东辉<sup>①</sup> 黄丽佳<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(北京市遥感信息研究所 北京 100192)

**摘要:** 合成孔径雷达(SAR)滑动聚束模式是介于传统条带模式和聚束模式之间的成像模式。该文针对高分辨率宽覆盖星载滑动聚束 SAR 合成孔径时间和一次成像时间均较长的特点,分析了由此引发的传统等效距离模型精度不足以及模型参数沿方位向时变性显著的问题。借鉴机载 SAR 运动补偿理论,提出了利用星载滑动聚束 SAR “非匀速直线运动”引起的到虚拟转动点距离误差来校正方位时变模型参数的方法,并相应给了判断是否需要校正的依据;针对校正后数据中孔径内残留的等效距离模型三次误差,提出了在多普勒域内的统一补偿的方法;结合上述模型误差校正方法,重新定义了滑动聚束 DCS 算法中的 CS 因子,给出了处理流程。最后,用计算机仿真实验验证了模型校正方法的有效性。

**关键词:** 星载 SAR; 滑动聚束; 模型校正; 方位时变; 运动补偿

**中图分类号:** TN959.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)07-1694-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.01259

## Research on Mending of Space-borne Sliding Spotlight SAR Imaging Model Error

Han Bing<sup>①②</sup> Zhang Yong-jun<sup>②</sup> Hu Dong-hui<sup>①</sup> Huang Li-jia<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Sliding spotlight SAR, which is between strip-map SAR and spotlight SAR, is a unique imaging mode. Concerning on the long illuminating time and long accumulating time of high-resolution and wide-coverage-area space-borne sliding spotlight SAR, the precision and the azimuth-time-variant characteristic of the traditional imaging model are analyzed in this paper. Based on the theory of motion compensation for airborne SAR, a method to correct the azimuth-time-variant error, which makes use of range error caused by non-linear movement of space-borne SAR relative to the virtual rotating point, is presented. In addition, a method to compensate the remnant cubic error of the imaging model in Doppler domain is also given here. Finally, a new DCS algorithm with imaging model error mending is introduced, whose validity is verified with computer simulation.

**Key words:** Space-borne SAR; Sliding spotlight; Model mending; Azimuth-time-variant; Motion compensation

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)滑动聚束成像模式是目前被广泛应用的高分辨率 SAR 成像模式。SAR 滑动聚束成像时,天线对被照射场景面以下的虚拟转动点凝视照射,工作方式介于经典条带模式和聚束模式之间,可以在方位向上同时获得高的空间分辨率和大的成像幅宽<sup>[1]</sup>,而均不绝对受限于天线实际尺寸,但与此同时,其一次成像时间和多普勒频率总带宽都显著增加。因此,将滑动聚束模式应用于星载平台时,传统成像理论和方法,一方面要解决方

位向数据欠采样和海量数据高效处理的问题;另一方面要解决回波信号真实距离历程偏离匀速直线运动假设下的距离模型更加显著的问题。随着成像空间分辨率的提高和成像区域的增大,这两方面问题也会更加突出。

文献[2,3]提出的基于两步算法的滑动聚束 SAR 成像方法解决了方位欠采样和数据处理效率的问题,但文中对该算法的理论推导做了许多近似,使其应用受到限制。文献[4]在此基础上通过重新定义 CS 算法第 3 个因子提出了更为精确的滑动聚束 DCS 算法。两种算法均以星载 SAR 成像传统等效距离模型为基础,对高分辨率星载 SAR 成像而言往

2010-11-19 收到, 2011-02-14 改回

\*通信作者: 韩冰 hanbing2007928@sohu.com

往不够精确。针对传统等效距离模型在星载高分辨率以及中高轨道SAR中普遍不适用的问题,解决思路多是提高模型的阶数<sup>[5]</sup>。文献[6]将滑动聚束SAR等效距离模型用 $N$ 阶来描述。这类方法的问题是:由于模型复杂,获得成像算法的解析表达十分困难,成像处理参数的物理意义不明确。文献[7]在传统等效距离模型的基础上简单增加了一个线性项,巧妙地将模型精度提高到了三阶,同时得到了成像处理算法的解析形式。然而关于成像模型参数沿方位向时变,即多普勒成像参数的方位更新问题,上述文献均未涉及。文献[8]采用了时域子孔径处理的解决方法,但其处理仍以传统等效距离模型为基础,且要解决图像拼接的问题。

本文针对星载SAR成像模型参数沿方位向时变以及传统等效距离模型适用性等问题,分析了高分辨率宽覆盖星载滑动聚束SAR成像模型误差的来源和表现形式,并借鉴机载SAR运动补偿理论提出了模型误差校正方法,最后,结合滑动聚束SARDCS算法<sup>[4]</sup>完成了计算机仿真实验,验证了模型误差校正方法的有效性。

## 2 星载滑动聚束SAR模型误差分析

传统SAR成像理论都是在假定照射场景静止、平台做匀速直线运动的基础上建立的。对于星载SAR而言,卫星运行轨道、地球表面都是弯曲的,同时地球自转的影响也不能忽略,为了沿用传统理论和方法,提出了星载SAR等效距离模型,即利用等效的匀速直线运动产生的距离历程去逼近天线相位中心到目标的真实距离历程。星载SAR成像常采用以下斜视等效距离模型:

$$R_e(t) = \sqrt{r^2 + (v_e t)^2 - 2rv_e t \cos \varphi_e} \quad (1)$$

其中

$$v_e = \sqrt{\frac{\lambda r f_R}{2} + \left(\frac{\lambda f_D}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\varphi_e = \arccos\left(-\frac{\lambda f_D}{2v_e}\right) \quad (3)$$

式中 $t$ 为方位时间或称“慢时间”; $r$ 为 $t=0$ 时刻天线相位中心到目标的距离; $v_e$ 为等效速度; $\varphi_e$ 为等效斜视角; $f_D$ 和 $f_R$ 分别为回波信号的多普勒中心频率和调频率,它们由真实距离历程对时间的一阶和二阶导数计算得到; $\lambda$ 为发射信号波长。显然,式(1)描述的等效距离模型仅在二次及以下项是精确的。随着一次成像时间的增加和方位分辨率的提高,对于基于式(1)的星载SAR成像模型而言,其误差表现在两个方面:(1) $f_D$ 、 $f_R$ 及 $v_e$ 、 $\varphi_e$ 均为方位时间 $t$ 的函数,即,等效距离模型参数沿方位向具有明

显时变性;(2)等效距离模型的逼近误差随着合成孔径时间的增加而增大,偏离真实距离历程的三次及以上项误差不能忽略。

### 2.1 模型参数沿方位时变性分析

这里分析模型参数方位时变性,只考虑合成孔径中心时刻目标到天线相位中心的距离随方位向目标位置的变化,认为模型参数的方位时变性主要表现为:天线视线方向上真实距离历程相对于等效匀速直线运动情况下距离历程的偏离程度,借鉴机载SAR运动补偿概念,即可理解为“天线相位中心非匀速直线运动引起视线方向的距离误差”,其中等效匀速直线运动的等效速度和等效斜视角由滑动聚束一次成像时间中心时刻天线视线方向的多普勒参数决定。对于滑动聚束SAR而言,天线视线方向即天线相位中心到虚拟转动点的方向,如图1所示,图中符号定义同文献[2]。

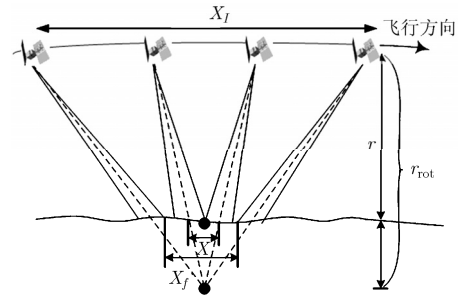


图1 星载SAR滑动聚束模式成像几何

考虑到星载SAR“天线相位中心偏离等效匀速直线运动”主要由卫星平台本身非匀速直线运动引入,因此,认为在天线视线方向上,相对被照射目标和虚拟转动点,由“非匀速直线运动引起的距离误差”是近似相等的,加之成像模型的时变性难以精确解析描述,这里通过计算相对虚拟转动点的“天线相位中心非匀速直线引起的距离误差”来间接描述模型参数的时变性。

由于高分辨率宽覆盖滑动聚束SAR的一次成像时间比较长,即虚拟转动点对应的“合成孔径时间”也比较长,因此,将雷达天线相位中心到虚拟转动点之间的距离矢量 $\mathbf{R}_{sr}(t)$ 在“慢时间” $t=0$ 时刻泰勒展开到四阶为

$$\mathbf{R}_{sr}(t) = \mathbf{R}_{sr} + \mathbf{V}_{sr}t + \frac{1}{2}\mathbf{A}_{sr}t^2 + \frac{1}{6}\mathbf{B}_{sr}t^3 + \frac{1}{24}\mathbf{C}_{sr}t^4 \quad (4)$$

其中下标“s”代表卫星;下标“r”代表虚拟转动点; $\mathbf{R}_{sr}$ 、 $\mathbf{V}_{sr}$ 、 $\mathbf{A}_{sr}$ 、 $\mathbf{B}_{sr}$ 、 $\mathbf{C}_{sr}$ 分别为 $t=0$ 时刻天线相位中心与虚拟转动点间的相对距离矢量、速度矢量、加速度矢量、加速度变化率矢量和加速度二阶变化率矢量。因此,天线相位中心与虚拟转动点间的距

离标量  $R_{sr}(t)$  可以表示为

$$R_{sr}(t) = |\mathbf{R}_{sr}(t)| = r_{sr} \cdot \sqrt{1 + \frac{\mathbf{R}_{sr}(t) \cdot \mathbf{R}_{sr}(t) - r_{sr}^2}{r_{sr}^2}} \quad (5)$$

其中  $r_{sr} = |\mathbf{R}_{sr}|$ , 为方便推导, 令  $x = [\mathbf{R}_{sr}(t) \cdot \mathbf{R}_{sr}(t) - r_{sr}^2]/r_{sr}^2$ , 其在  $t=0$  时刻的四阶泰勒展开式为  $x = x_1 t + x_2 t^2 + x_3 t^3 + x_4 t^4$ , 其中展开系数  $x_1, x_2, x_3, x_4$  的定义与文献[5]中式(10)–式(13)相同, 仅符号表示略有不同。由此,  $R_{sr}(t)$  在  $t=0$  时刻的四阶泰勒展开式表示为

$$R_{sr}(t) = r_{sr} + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \quad (6)$$

其中

$$c_1 = \frac{1}{2} r_{sr} x_1 \quad (7)$$

$$c_2 = r_{sr} \left( \frac{1}{2} x_2 - \frac{1}{8} x_1^2 \right) \quad (8)$$

$$c_3 = r_{sr} \left( \frac{1}{2} x_3 + \frac{1}{16} x_1^3 - \frac{1}{4} x_1 x_2 \right) \quad (9)$$

$$c_4 = r_{sr} \left( -\frac{1}{4} x_1 x_3 - \frac{1}{8} x_2^2 + \frac{1}{2} x_4 - \frac{5}{128} x_1^4 + \frac{3}{16} x_1^2 x_2 \right) \quad (10)$$

利用式(1)斜视等效距离模型, 天线相位中心到虚拟转动点之间斜距可以用等效匀速直线运动情况下的斜距  $R_{esr}(t)$  逼近, 其中等效速度  $v_{esr}$  和等效斜视角  $\varphi_{esr}$  由  $t=0$  时刻虚拟转动点对应的多普勒中心频率  $f_{Dsr} = 2c_1/\lambda$  和多普勒调频率  $f_{Rsr} = 4c_2/\lambda$  计算得到。式(6)与  $R_{esr}(t)$  之差即为由于天线相位中心做“非匀速直线运动”相对虚拟转动点引入的距离偏差, 也近似为相对天线视线方向目标引入的距离偏差。该距离偏差是方位时间  $t$  的函数, 它反映了模型参数的时变性, 即

$$\Delta R_{sr}(t) = R_{sr}(t) - R_{esr}(t) \quad (11)$$

利用式(11)对星载滑动聚束 SAR 回波信号做“一阶运动补偿”<sup>[9]</sup>, 即位置和相位的统一校正, 消除模型参数在成像时间内方位时变的影响, 式中真实距离历程  $R_{sr}(t)$  泰勒展开的阶数要随着模型参数方位时变误差的增加而提高, 针对本文仿真研究的对象, 展开到四阶是必需且足够的。

下面简单分析是否需要做模型参数方位时变校正的基本判断依据。假定偏航控制的情况下, 式(6)中  $c_1 \approx 0$ , 而  $\varphi_{esr} \approx \pi/2$ , 由于成像模型中方位向匹配函数的二次相位直接决定了方位向的聚焦程度, 这里考虑虚拟转动点处虚拟回波信号多普勒频率  $f(t)$  的二阶导数随方位时间变化规律可近似为

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} = -f_{Rsr} - \frac{2(\mathbf{R}_{sr} \cdot \mathbf{B}_{sr} + 3\mathbf{V}_{sr} \cdot \mathbf{A}_{sr})}{\lambda r_{sr}} \cdot t \quad (12)$$

在不影响成像质量的前提下, 要求模型引入二次相位误差小于  $\pi/8$ , 因此, 对于合成孔径中心时刻为  $t = t_a$ , 合成孔径时间为  $T_{asyn}$  的目标, 需要满足不等式:

$$\left| \frac{4T_{asyn}^2 (\mathbf{R}_{sr} \cdot \mathbf{B}_{sr} + 3\mathbf{V}_{sr} \cdot \mathbf{A}_{sr})}{\lambda r_{sr}} t_a \right| < 1 \quad (13)$$

其中合成孔径时间  $T_{asyn}$  是与系统分辨率相关的量。当  $t_a$  取为成像区域方位向边缘目标的合成孔径中心时刻时, 式(13)即可作为是否需要进行模型时变性校正的基本判据。

## 2.2 残余等效距离模型误差分析

消除模型参数时变性影响之后, 成像模型及其残留误差均在方位向上达到了一致化。本小节主要考虑方位时变校正后, 星载滑动聚束 SAR 合成孔径内残余等效距离模型误差的校正问题。由于式(1)传统等效距离模型仅在二次及以下项是精确的, 而滑动聚束 SAR 通常空间分辨率比较高, 合成孔径时间相对较长, 因此, 用等效距离模型逼近真实距离历程时的三次项逼近误差往往不能忽略。

为了方便对频谱进行解析描述<sup>[7]</sup>并且考虑大多数星载 SAR 对高分辨率的一般要求, 这里仅考虑传统等效距离模型三次项误差的情况。将雷达天线相位中心到照射场景中心目标之间的距离矢量  $\mathbf{R}_{st}(t)$  在  $t=0$  时刻泰勒展开到三阶为

$$\mathbf{R}_{st}(t) = \mathbf{R}_{st} + \mathbf{V}_{st} t + \frac{1}{2} \mathbf{A}_{st} t^2 + \frac{1}{6} \mathbf{B}_{st} t^3 \quad (14)$$

其中下标“s”代表卫星; 下标“t”代表被照射目标;  $\mathbf{R}_{st}, \mathbf{V}_{st}, \mathbf{A}_{st}, \mathbf{B}_{st}$  分别为  $t=0$  时刻天线相位中心与场景中心目标间的相对距离矢量、速度矢量、加速度矢量和加速度变化率矢量。与上小节分析相似, 天线相位中心与场景中心目标间的距离标量  $R_{st}(t)$  在  $t=0$  时刻的三阶泰勒展开为

$$R_{st}(t) = r_{st} + p_1 t + p_2 t^2 + p_3 t^3 \quad (15)$$

其中  $r_{st} = |\mathbf{R}_{st}|$ ;  $p_1, p_2, p_3$  与  $c_1, c_2, c_3$  的定义相似, 只是参量的下标由“sr”转换为“st”, 这里不再赘述。利用式(1), 天线相位中心到目标之间等效距离为  $R_{est}(t)$ , 其中等效速度  $v_{est}$  和等效斜视角  $\varphi_{est}$  由  $t=0$  时刻的目标多普勒中心频率  $f_{Dst} = 2p_1/\lambda$  和多普勒调频率  $f_{Rst} = 4p_2/\lambda$  计算得到。对等效距离  $R_{est}(t)$  在  $t=0$  时刻泰勒展开到三阶为

$$R_{est}(t) = r_{st} + l_1 t + l_2 t^2 + l_3 t^3 \quad (16)$$

其中

$$l_1 = -v_{est} \sin \varphi_{est} \quad (17)$$

$$l_2 = \frac{v_{est}^2 \cos^2 \varphi_{est}}{2r_{st}} \quad (18)$$

$$l_3 = \frac{v_{\text{est}}^3 \cos^2 \varphi_{\text{est}} \sin \varphi_{\text{est}}}{2r_{\text{st}}^2} \quad (19)$$

显然有  $l_1 = p_1$  及  $l_2 = p_2$ , 因此, 这里定义:

$$\Delta p_3 = (p_3 - l_3) - (c_3 - k_3) \quad (20)$$

其中  $k_3$  定义与  $l_3$  相似, 只是参量的下标由“st”变换为“sr”, 这里也不再赘述。

$\Delta p_3$  为模型参数方位时变校正后, 采用传统等效距离模型成像时残余的三次模型误差系数。通常  $\Delta p_3$  引入的三次相位远小于回波信号的二次相位, 因此, 由驻定相位原理二次相位计算得到驻定相位点可以近似作为整个信号的驻定相位点, 这在信号多普勒域对  $\Delta p_3$  引入的三次相位误差进行整体补偿提供了可能, 其在多普勒域可近似表示为

$$\Delta \Phi_c \approx -\frac{4\pi \Delta p_3}{f_{\text{Rst}}^3 \lambda} (f + f_{\text{Dst}})^3 \quad (21)$$

当  $\Delta p_3$  引入的三次误差比较明显以至于影响距离徙动校正时, 可以采用文献[7]中的方法进行处理。但通常情况下, 中低轨道星载滑动聚束 SAR 相对中高轨道 SAR 模型误差要小得多, 因此, 可以在信号多普勒域补偿  $\Delta \Phi_c$  大小相位误差来消除绝大部分三次模型误差。

### 3 星载滑动聚束 SAR 模型误差校正

#### 3.1 基于模型误差校正的 DCS 算法

文献[2]滑动聚束 SAR 两步算法中方位向数据滤波处理的本质是: 在保持回波数据多普勒总带宽不变的情况下, 通过与方位采样频率高于总带宽的参考信号进行卷积处理, 从而达到在提高方位向采样率的同时缩短信号持续时间、降低数据处理量的目的, 其中参考信号频率变化特性可以取为与滑动聚束 SAR 一次成像时间内天线视线方向上多普勒频率变化相反。DCS 算法<sup>[4]</sup>弥补了两步算法引入过多近似的不足, 将方位滤波处理后的数据作为持续时间不同的常规 SAR 信号, 采用 CS 算法进行成像处理, 仅在第 3 个 CS 因子相乘中消除方位滤波的影响。本小节在 DCS 算法的基础上加入对高分辨率宽覆盖星载滑动聚束 SAR 成像模型误差的校正处理。

在满足文献[2]的式(24)选择方位滤波信号形式为

$$g(t) \approx \exp(-j2\pi f_{\text{Dsr}} t + j\pi f_{\text{Rsr}} t^2) \quad (22)$$

模型参数方位时变校正类似于机载 SAR 运动补偿中的一阶运动补偿<sup>[9]</sup>, 同时包括相位误差补偿和位置误差校正, 这里近似认为校正后, 同一目标方位向信号仅与传统等效距离模型相差一个很小的三次相位误差, 即残余等效距离模型三次项偏差引起

的脉冲位置误差不影响后续距离徙动校正。采用基于斜视等效距离模型的 CS 算法<sup>[10]</sup>处理模型参数方位时变校正及方位滤波后的滑动聚束 SAR 数据时, 算法 CS 因子定义会有所改变, 主要体现在第 3 个因子的变化上。考虑方位滤波处理和三次模型误差校正后的第 3 个因子定义为

$$\Phi_{3m}(\tau, f) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} c\tau \left[ 1 - \sin \varphi_{\text{ref}} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f}{2v} \right)^2} \right] + j \frac{\pi f^2}{f_{\text{Rsr}}} + j \Delta \Phi_c \right\} \cdot \exp \{ j [\Theta_1(f) + \Theta_2(f; r)] \} \quad (23)$$

$\tau$  为“快时间”,  $c$  为光速,  $v$  为等效速度,  $\varphi_{\text{ref}}$  为参考距离处的等效斜视角。式中第 1 个相位项中的最后两项分别为方位滤波和三次模型误差的补偿项; 第 2 个相位项为 CS 相位相乘中所未能补偿的残留相位和多普勒中心频率引起的相移, 其定义同文献[10]式(8.59)。

#### 3.2 星载滑动聚束 SAR 仿真实验

为了验证模型误差校正方法的正确性, 这里设计了与 TerraSAR-X 系统参数<sup>[8]</sup>相似的中低轨道高分辨率星载滑动聚束 SAR 仿真实验。与 TerraSAR-X 系统 HS 模式方位向“1 m 分辨率/5 km 成像幅宽”不同的是, 本文仿真中系统的作用距离更长, 理论分辨率更高, 达到 0.3652 m(矩形窗加权), 方位向成像幅宽更宽为 8 km。其它主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 星载滑动聚束 SAR 仿真参数

场景中心斜距	1085 km
天线转动中心斜距	1387 km
天线转动角度范围	$\pm 1.4634^\circ$
天线下视角	$50^\circ$
中心斜视角	$0^\circ$
场景照射时间	$\pm 5.3$ s

仿真中在场景中心及其沿方位向前后 4 km 各布设了一个点目标, 依次为目标 1, 目标 2 和目标 3, 位于场景边缘的目标 1 和目标 3 的合成孔径中心时刻分别为  $t_{a1} = -2.4842$  s 和  $t_{a3} = 2.4844$  s, 计算不等式(13)左侧项的值都约为 8.15, 比 1 大得多, 若对模型参数方位时变不做校正, 成像区域方位向边缘处目标所引起的二次相位误差将达到  $\pi$  以上。因此, 必须对成像模型的时变性进行校正。下面给出不做校正情况下, 目标回波方位向的成像结果。

图2表明,由于成像处理器是基于传统等效距离模型,并采用与场景中心目标(目标2)匹配的多普勒参数的,一方面,目标1和目标3方位向成像结果明显散焦,说明成像模型存在显著方位时变误差;另一方面,对于目标2,虽然等效距离模型采用了与其完全匹配的斜距、等效速度和等效斜视角等参数,但其方位向成像结果仍然存在严重的旁瓣不对称现象,说明传统等效距离模型引入的三次相位误差的影响不能忽略。

经过2.1节式(11)对回波相位和位置校正后,3个目标的成像结果基本达到了一致化,即一方面,方位时变校正后,对于目标2而言,由等效距离模型逼近误差引入的三次相位误差得到了一定程度的消除,另一方面,3个目标方位向成像结果都残留一个 $0.03\pi$ 弧度大小的三次相位误差,该相位误差对应的位置误差显然不会影响距离徙动校正,但导致3个目标方位向峰值旁瓣比均仅约为-13 dB(理想情况下,矩形窗加权下峰值旁瓣比为-13.26 dB),并且该三次相位误差在3个目标中的存在形式几乎完全一致。

经过2.2节式(21)的三次相位误差补偿后,3个目标方位向成像指标测试结果都十分接近理想值,不同纬度和不同视角( $20^\circ \sim 50^\circ$ )情况下的仿真结果验证了本文成像模型误差校正方法的有效性。考虑到赤道地区地球自转影响最为显著,而相同纬度情况下,天线视角越大作用距离越长,成像模型误差影响越严重。这里给出最具有代表性的赤道地区

天线下视角 $50^\circ$ 情况的仿真结果,如表2所示,其中指标计算引入插值误差在万分之一方位分辨率以下。

表2 仿真点目标成像处理指标测试结果

	分辨率(m)	峰值旁瓣比(dB)	积分旁瓣比(dB)
目标1	0.3652	-13.2486	-10.0917
目标2	0.3652	-13.2580	-10.1106
目标3	0.3652	-13.2444	-10.1119

## 4 结论

本文利用高分辨率宽覆盖星载滑动聚束 SAR 天线相位中心相对虚拟转动点的真实距离历程与等效匀速直线运动模型下的等效距离历程之间的偏差,消除被照射目标成像模型参数的方位时变性,使成像模型在方位向上实现一致化,并给出了是否需要模型参数方位时变校正的判断依据;对校正后的数据中残留的孔径内三次模型逼近误差进行了分析,提出了在多普勒域内统一补偿的方法。在此基础上,本文对滑动聚束 SAR 斜视等效距离模型下的 DCS 算法<sup>[4,10]</sup>中 CS 因子重新进行了定义,并利用计算机仿真实验验证了校正方法的有效性。仿真实验表明,本文所提出的模型误差校正方法明显改善了非场景中心目标回波的聚焦程度,有效地消除了成像模型一致化后残留在孔径内的三次模型逼近误差的影响,在本文设置的仿真参数情况下,各仿真点目标成像质量均基本达到了理想情况。

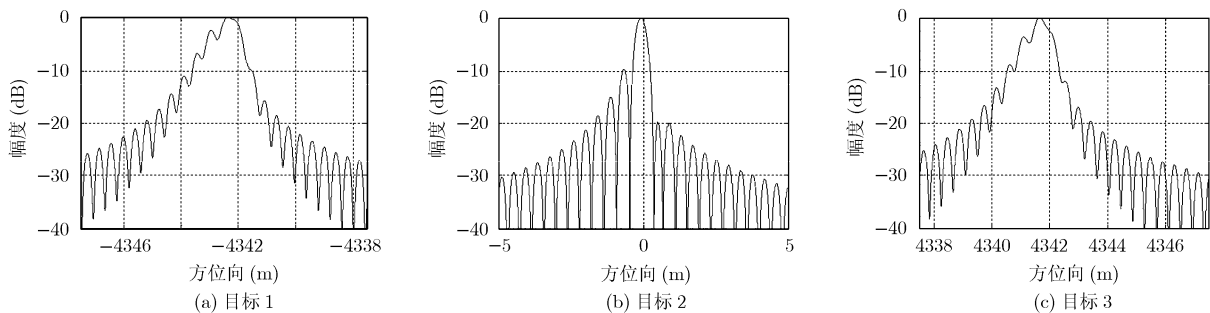


图2 传统方法方位向处理结果

## 参考文献

- [1] Belcher D P and Baker C J. Hybrid strip-map/spotlight SAR[C]. Proceeding of IEE Colloquium on Radar and Microwave Imaging, UK, London, Nov. 16, 1994: 2/1-2/7.
- [2] Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, Fornaro G, and Serafino F. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing[J]. *IEE Proceeding of Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(6): 363-372.
- [3] Liu Fei-feng, Ding Ze-gang, and Zeng Tao, *et al.* Performance analysis of two-step algorithm in sliding spotlight spaceborne SAR[C]. Proceeding of IEEE Radar Conference 2010, Washington, DC, May 10-14, 2010: 965-968.
- [4] Ossowska A and Speck R. Hybrid strip-map/spotlight mode processing based on chirp scaling processing[C]. Proceeding of IEEE International Radar Symposium, Mroclaw, May 21-23, 2008: 1-4.

- [5] Eldhuset K. A new fourth-order processing algorithm for spaceborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 824-835.
- [6] Henrion S, Savy L, and Planès Jean-Guy. New results for spaceborne hybrid stirp-map/spotlight SAR high resolution processing[C]. Proceeding of the CEOS SAR, Toulouse, Oct. 26-29, 1999: 141-146.
- [7] Huang Li-jia, Qiu Xiao-lan, and Hu Dong-hui, *et al.*. An advanced 2-D spectrum for high-resolution and MEO spaceborne SAR[C]. Proceeding of IEEE APSAR 2009, Xi'an, China, Oct. 26-30, 2009: 447-450.
- [8] Prats P, Scheiber R, and Mittermayer J, *et al.*. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [9] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [10] 魏钟铨等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 162-168.  
Wei Zhong-quan, *et al.*. Satellite of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Press, 2001: 162-168.
- 韩冰: 女, 1980年生, 助理研究员, 研究方向为高分辨率合成孔径雷达成像、运动补偿及其相关信号处理技术.
- 张永军: 男, 1960年生, 研究员, 研究方向为合成孔径雷达系统总体技术及信号处理技术.
- 胡东辉: 男, 1970年生, 副研究员, 研究方向为合成孔径雷达系统总体技术及信号处理技术.