一种基于变换域的滑动聚束 SAR 调频率估计方法

折小强*①②③ 仇晓兰①② 韩 冰①② 雷 斌①②
①(中国科学院电子学研究所空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)
②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)
③(中国科学院大学 北京 100190)

摘 要：高分辨率滑动聚束 SAR 成像处理对多普勒调频率精度具有非常高的要求，而由于滑动聚束 SAR 回波信号往往存在多普勒频谱混叠的问题，传统的调频率估计方法通常无法直接应用。该文针对这一问题提出基于方位频谱去混叠的变换域调频率估计方法，并嵌入两步算法实现了滑动聚束模式的聚焦成像。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词：合成孔径雷达(SAR)；滑动聚束；两步处理；多普勒调频率估计
中图分类号：TN957.52 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2014)04-0419-09
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14008

An Improved Doppler Rate Estimation Approach for Sliding Spotlight SAR Data Based on the Transposition Domain

She Xiao-qiang①②③ Qiu Xiao-lan①② Han Bing①② Lei Bin①②
①(*Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System*, *Institute of Electronics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100190, *China*)
②(*Insititute of Electronics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100190, *China*)
③(*University of Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: In image processing of high-resolution sliding spotlight SAR, it is important to know the Doppler rate with accuracy; however, traditional Doppler rate estimation algorithms are not very helpful because of the azimuth spectrum folding phenomenon. In this study, an algorithm that works on the transposition domain is proposed to solve this problem. Furthermore, the algorithm is also helpful in obtaining excellent focused images by embedding it in the two-step technique. Finally, the proposed algorithm is verified using computer simulations.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Sliding spotlight; Two step focusing technique; Doppler rate estimation

1 引言

滑动聚束模式是一种新颖的 SAR 工作模式，其通过控制天线照射区在地面上的移动速度来控制目标的照射时间，从而获得比聚束模式更宽的成像范围和比条带模式更好的方位向分辨率。SAR 高分辨率成像对多普勒参数尤其是多普勒调频率的精度具有非常高的要求，这对传感器航迹、速度等参数的测量精度提出了非常苛刻的要求，在实时性要求高或者测量手段配备不是很先进时，多普勒参数计算精度难以达到高质量成像的需求，此时多普勒调频率估计很有必要。

目前，对于多普勒调频率估计方法的研究比较多，代表性的有视错位(MD)算法[1,2]、相干视错位(CMD)算法[3,4]和对比度优化(CO)算法[5]以及相位梯度自聚焦(PGA)算法[6]等。PGA 算法和 CO 算法都是基于非模型的算法，不依赖具体的多普勒调频率模型，其中 CO 算法直接对图像的像素值进行处理，不依赖雷达信息，所以可以对任何图像进行自聚焦，但是其需要多次迭代，运算效率较低，PGA 算法能对图像任意高次的相位误差进行补偿，但是无法给出精确的多普勒调频率值；而 MD 算法是基于调频率模型的估计算法，通过在距离多普勒域进行子孔径划分并获得相关峰值偏移量来求得多普勒调频率误差，获得量化的精确多普勒调频率值，由于效率和可靠性均比较高，MD 算法是一种工程中

2014-01-10 收到，2014-03-20 改回；2014-08-04 网络优先出版
国家自然科学基金(61101200, 61331017)资助课题
*通信作者： 折小强 wolftotemsxq@gmail.com

普遍采用的方法，而且针对星载滑动聚束 SAR 体制而言，其多普勒相位误差主要由 2 次误差决定，MD 算法有一定的针对性，而且其也可以用于进行过前期运动补偿的机载滑动聚束 SAR 的处理中。无论 PGA 算法或者 MD 算法，目前均没有公开文献将其用于滑动聚束 SAR 数据的处理。

针对滑动聚束 SAR 多普勒频谱混叠的问题，已有文献提出了相应的解决方法以满足聚焦成像的需求，目前比较有代表性的滑动聚束模式 SAR 信号成像算法有子孔径方法[7]和两步处理方法[8−10]。其中子孔径方法是进行方位向数据分块来解决方位向频谱的混叠，通过子孔径单独成像和子孔径拼接实现全场景的成像，该方法的缺点是效率较低。两步处理方法首先使用 Deramp 处理，即通过对方位向信号在时域和频域的两次相位相乘将其变换到一个方位向频谱非混叠的变换域中，实现滑动聚束 SAR 信号的方位向频谱去混叠。在此基础上，采用类似条带模式的成像算法完成成像，该方法效率相对较高。然而，目前对于滑动聚束模式成像算法的研究均假设多普勒参数精确已知，目前公开文献中很少有结合多普勒参数估计的成像算法。

在已有的滑动聚束 SAR 处理方法的基础上，根据 MD 算法的原理，本文提出一种基于变化域的滑动聚束 SAR 调频率估计方法(Sliding Spotlight Map Drift, SMD)。利用 Deramp 处理后信号在变换域存在线性时频关系，对信号进行时频变换和补零解混叠处理，再通过频谱分割和子视相关的方法完成多普勒调频率估计，最后将其嵌入到两步处理算法中实现滑动聚束 SAR 的精确成像。

文章的结构如下：第 2 节简要分析了滑动聚束 SAR 信号的多普勒频谱特性；第 3 节详细论述了变换域的调频率估计方法，并嵌入成像算法中；第 4 节给出仿真试验结果及分析；第 5 节总结全文。

2 滑动聚束 SAR 信号多普勒特性

滑动聚束 SAR 模式的示意图如图 1 所示，其中，X_I 为平台飞行距离，X_f 为地面照射的场景方位向宽度，v 为雷达平台方位向运动速度，φ 为斜视角，X 为波束瞬时宽度，x 为被照射点方位向坐标，R 为目标与平台之间的距离，S 为虚拟不动点，$R_{\rm rot}$ 为平台和虚拟不动点之间距离。

由图 1 可得，目标与平台之间的距离关系为：

$$R(t)=\sqrt{r^2+(vt-x)^2-2(vt-x)r\cos\varphi} \tag{1}$$

其中 r 为一次成像时间中心处斜距，由此进一步给出滑动聚束 SAR 的回波信号简单模型：

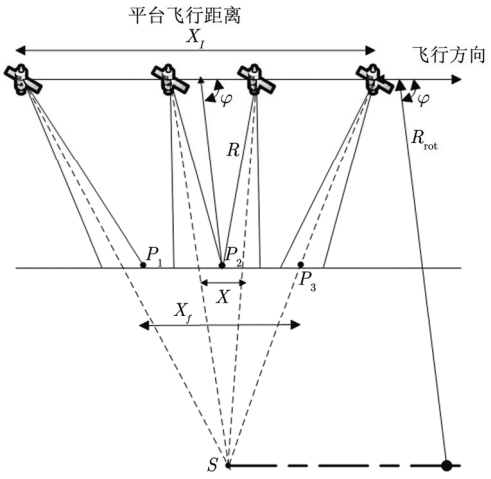


图 1 滑动聚束模式成像模型示意图

Fig. 1 Sliding spotlight SAR imaging model

$$\begin{aligned}{\rm SS}(\tau,t;r,x)=&\,{\rm rect}\left(\frac{t}{T_I}\right)\cdot{\rm rect}\left(\frac{Avt-x}{X}\right)\cdot{\rm rect}\left(\frac{x}{X_f}\right)\\&\cdot{\rm rect}\left(\frac{\tau-\dfrac{2R(t)}{c}}{T_p}\right)\cdot\exp\left(-\frac{j4\pi R(t)}{\lambda}\right)\\&\cdot\exp\left(-j\pi b\left[\tau-\frac{2R(t)}{c}\right]^2\right)\end{aligned} \tag{2}$$

其中 b 为发射信号调频率，τ, t 分别为距离向和方位向时间，$A=1-r/R_{\rm rot}$ 为滑动聚束因子。${\rm SS}(\tau,t;r,x)$ 中方位向信号可以表示为：

$$\begin{aligned}S(t;r,x)=&\,{\rm rect}\left(\frac{t}{T_I}\right)\cdot{\rm rect}\left(\frac{Avt-x}{X}\right)\\&\cdot{\rm rect}\left(\frac{x}{X_f}\right)\cdot\exp\left(\frac{-j4\pi R(t)}{\lambda}\right)\end{aligned} \tag{3}$$

在滑动聚束模式下，天线方位波束中心指向随着方位向时间不断变化，根据文献[11]，其多普勒中心频率 $f_{\rm d}$ 是天线斜视角的函数。沿方位向上取 3 个点目标 P_1, P_2, P_3 进行示意，如图 1 所示，3 个目标对应的中心斜视角各不相同，图 2 中以这 3 个目标为例，给出了多普勒中心频率随着方位向时间变化曲线示意图。

从图 2 中可以看出，每个点目标在多普勒域中占据了不同的频带范围，并有着不同的中心频率，多普勒中心频率随着方位时间的线性变化导致了滑动聚束 SAR 信号在方位向上总多普勒带宽远大于瞬时多普勒带宽[11]。如果传感器采用高于总多普勒带宽的脉冲重复频率，不仅会增加 SAR 模块的设计难度，还会导致过于庞大的数据量。一般来说，SAR 传感器使用比瞬时多普勒带宽略高但低于总多普勒

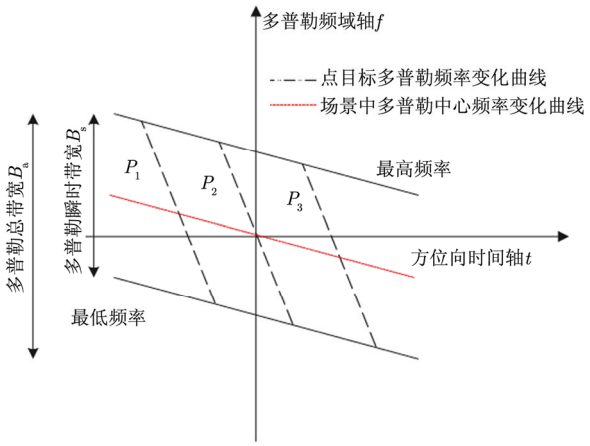


图 2 滑动聚束信号多普勒特性示意图

Fig. 2　Sliding spotlight SAR signal Doppler property sketch map

带宽得 PRF 值进行脉冲的发射和接收，但是这样做也带来了多普勒域的频谱混叠，对信号在多普勒域的处理带来了困难，对滑动聚束 SAR 信号进行多普勒调频率估计需克服这个问题。

3　SMD 多普勒调频率估计方法

高分辨率的滑动聚束 SAR 信号成像时需要精确的多普勒调频率，但由以上分析可知滑动聚束 SAR 方位频域是混叠的，而 MD 等算法都是基于信号在方位向频谱子视划分，无法直接用于滑动聚束 SAR 信号的多普勒参数估计。针对这些问题，本文提出了基于滑动聚束 SAR 的多普勒调频率估计算法(Sliding spotlight Map Drift, SMD)。

3.1 滑动聚束 SAR 信号方位向 Deramp 处理

方位 Deramp 处理是在保持方位向总多普勒带宽不变的情况下，使用具有和方位回波具有相同多普勒调频率的参考函数和方位回波信号进行卷积，该参考函数的频率变化特性和方位回波信号相反[11]，滑动聚束 SAR 信号的 Deramp 处理示意图如图 3 所示[8,11]。

根据式(2)和式(3)，将 R 在 $t=x/(Av)$ 处展开得 $R=r_x+\Delta r_x$，其中

$$r_x=\sqrt{r^2+(1/A-1)^2x^2+2(1/A-1)xr\cos\varphi}$$

φ 为斜视角，则原始回波信号方位向部分可以表示为：

$$S(t;r,x)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_I}\right)\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{Avt-x}{X}\right)\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{x}{X_f}\right)\cdot\exp\left(\frac{-j4\pi r_x}{\lambda}\right)\cdot S_a(t)\tag{4}$$

其中

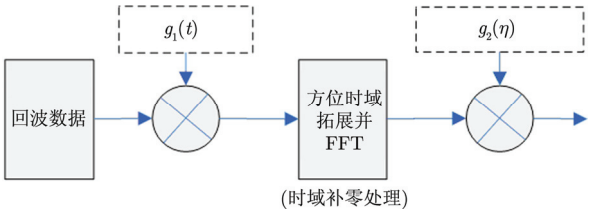


图 3 Deramp 处理示意图

Fig. 3　Deramp process sketch map

$$S_a(t)=\exp\left(\frac{-j4\pi\Delta r_x}{\lambda}\right)$$

$$\Delta r_x=\frac{\lambda}{2}f_d\left(t-\frac{x}{Av}\right)+\frac{\lambda}{4}f_r\left(t-\frac{x}{Av}\right)^2$$

下面对 $S_a(t)$ 进行处理并分析。

如图 3 所示，首先将 $S_a(t)$ 与 $g_1(t)$ 进行相位相乘，$g_1(t)$ 如式(5)定义：

$$g_1(t)=\exp\left(j\pi f_{r_ref}t^2+j2\pi f_{d_ref}t\right)\tag{5}$$

其中，f_{r_ref} 和 f_{d_ref} 分别为参考距离 R_{ref} 处的多普勒调频率和中心频率，R_{ref} 与 R_{rot} 关系为 $R_{ref}=(1-A)R_{rot}$。

设第 1 次相位相乘后得到表达式为 $\mathrm{SS}_a(t)$，按照图 3 所示的方法对其进行时域补零处理，然后进行傅里叶变换[8,12]，将各式代入后作 POSP 得频域表达式为：

$$\mathrm{Sf}(f)=\mathrm{F}\{\mathrm{SS}_a(t)\}=A_{x_i}\exp\left(j\pi\frac{(f+\Delta f_d)^2}{\Delta f_r}\right)\tag{6}$$

其中 $\Delta f_d=f_d-f_{d_ref}-f_{r_ref}t_i$，$A_{x_i}=\exp\left(j2\pi f_{d_ref}t_i+j\pi f_{r_ref}t_i^2\right)$，$t_i=x_i/(Av)$。

设 $\eta=f/f_{r_ref}$，η 代表着 Deramp 后的非混叠时域，其量纲为 s，此时信号如式(7)表示：

$$\mathrm{Sf}(\eta)=A_{x_i}\exp\left(j\pi\frac{f_{r_ref}^2}{\Delta f_r}\left(\eta+\frac{\Delta f_d}{f_{r_ref}}\right)^2\right)\tag{7}$$

然后使用参考函数 $g_2(\eta)$ 对 $\mathrm{Sf}(\eta)$ 进行第 2 次相位相乘，其中：

$$g_2(\eta)=\exp(j\pi f_{r_ref}\eta^2-j2\pi f_{d_ref}\eta)\tag{8}$$

分别得到 Deramp 后信号的变换时域和变换频域表达式 $\mathrm{SSa}(\eta)$ 和 $\mathrm{SSa}(f_\eta)$：

$$\mathrm{SSa}(\eta)=A_{x_i}\exp\left(j\pi\frac{\left(\eta+\frac{f_d}{f_r}-\frac{f_{d_ref}}{f_{r_ref}}\right)^2}{\frac{1}{f_{r_ref}}-\frac{1}{f_r}}+j\pi\left(\frac{f_d^2}{f_r}-\frac{f_{d_ref}^2}{f_{r_ref}}\right)\right)\tag{9}$$

$$\mathrm{SSa}\left(f_\eta\right)=A_{x_i}\exp\left\{j\pi\frac{\left(f_\eta+f_{\mathrm{d}}\right)^2}{f_{\mathrm{r}}}\right\}\exp\left\{-j\pi\frac{\left(f_\eta+f_{\mathrm{d_ref}}\right)^2}{f_{\mathrm{r_ref}}}\right\} \tag{10}$$

$\mathrm{SSa}\left(f_\eta\right)$即为点目标信号 Deramp 之后的非混叠域的频域的形式，Deramp 操作将信号的时域轴从t变换成η，在该域中信号的多普勒特性发生了变化。每个点目标在f_η轴上完全展开，以各自的多普勒中心频率为中心，占据了$B_{\mathrm{s}}=(2v\sin\varphi)/(AL)$的带宽，实现了信号的方位向去混叠处理[9]。在 Deramp 处理后方位向照射时间减少到$T_l=\max\left|T_{\mathrm{p}}(\Delta f_{\mathrm{r}}/f_{\mathrm{r_ref}})\right|$，其中$T_{\mathrm{p}}=(R\beta)/(Av)$为单点目标方位向照射时间，$\beta$为方位向波束角。又因为$\eta=f/f_{\mathrm{r_ref}}$，所以可以得到图 2 中 P_1, P_2, P_3 3 个点目标的 Deramp 前后的时域轴关系图[11,12]，如图 4 所示。

对信号采用 Deramp 方法去混叠后，方位向信号处于一个新的变换域中，此时信号在η轴上是混叠的。下面利用信号 Deramp 处理后时域模糊频域展开的特性，来实现子视划分。

3.2 非混叠域的子视划分与调频率误差估计

从上面的分析可以看出，方位 Deramp 处理其实就是对信号在t所代表的时域和f所代表的频域分别进行了两次线性调频信号的相位相乘而变换到一个η所代表的时域和f_η所代表的频域。从图 4 可以看出在η轴上信号出现混叠，而 Deramp 处理中两次相乘所用参考函数$g_1(t)$和$g_2(\eta)$都有线性调频的特性，所以对每个点目标来说，η和f_η有线性调频的关系，所以本文通过对η域处理来实现对f_η域的子视划分。

在 Deramp 处理后的信号进行距离压缩和距离徙动校正，得到距离压缩域方位η域信号，简单起见，此时方位向信号依旧表示为$\mathrm{SSa}(\eta)$。沿着η轴将$\mathrm{SSa}(\eta)$分成两个子视信号，为了和全孔径的方位向滤波器匹配，需要将子视信号长度进行方位向重采样到T_l长度，如式(11)，式(12)所示：

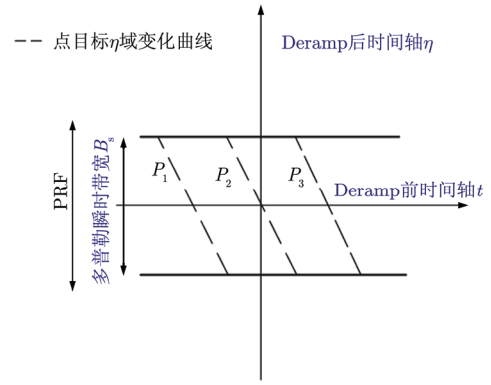


图 4 Deramp 前后时域关系图

Fig. 4 The relationship between the time domains that ins and outs of the Deramp process

$$\mathrm{SSa}_1(\eta)=\begin{cases}\mathrm{SSa}(\eta), & -T_l/2<\eta<0\\ 0, & 0<\eta<T_l/2\end{cases} \tag{11}$$

$$\mathrm{SSa}_2(\eta)=\begin{cases}0, & -T_l/2<\eta<0\\ \mathrm{SSa}(\eta), & 0<\eta<T_l/2\end{cases} \tag{12}$$

然后对$\mathrm{SSa}_1(\eta)$和$\mathrm{SSa}_2(\eta)$分别作傅里叶变换到频域得到各自的频谱$\mathrm{SSa}_1\left(f_\eta\right)$和$\mathrm{SSa}_2\left(f_\eta\right)$。这样，每个点目标的频谱都在单点的多普勒带宽内被划分为高低两段，然后在变换频域实施子视成像。根据文献[11]可得方位向滤波器表达式：

$$H\left(f_\eta\right)=\exp\left\{-\frac{j2\pi c\tau}{\lambda}\left(1-\cos\varphi_{\mathrm{ref}}\left(1-\left(\frac{\lambda f_\eta}{2v}\right)^2\right)\right)\right\}\cdot\exp\left\{j\pi\frac{\left(f_\eta+f_{\mathrm{d_ref}}\right)^2}{f_{\mathrm{r_ref}}}+j\Theta\right\} \tag{13}$$

滤波器中各参数的定义与文献[11]中一致。在 Deramp 处理后信号的方位向多普勒参数发生了变化，初始的多普勒调频率不再是初始的$f_{\mathrm{r_ref}}$。对式(13)中的第 1 个相位项进行泰勒展开，可以得到 Deramp 处理后等效的多普勒调频率：

$$f_{\mathrm{r}}(v)=-\frac{2v^2}{\lambda R_{\mathrm{ref}}\cos\varphi_{\mathrm{ref}}} \tag{14}$$

容易看出，这个等效的多普勒调频率是切向速度v的函数，下面对其进行估计。

将$\mathrm{SSa}_1\left(f_\eta\right)$和$\mathrm{SSa}_2\left(f_\eta\right)$分别与方位向滤波器为$H\left(f_\eta\right)$进行匹配滤波，得到两视图像$I_1(\eta)$和$I_2(\eta)$，互相关函数$R_{\mathrm{SMD}}$如式(15)表示[3]：

$$R_{\mathrm{SMD}}=\mathrm{F}^{-1}\left\{\mathrm{F}\left(\left|I_1(\eta)\right|\right)\mathrm{F}\left(\left|I_2(\eta)\right|\right)\right\} \tag{15}$$

如果f_{r}有误差，那么R_{SMD}会发生峰值偏移。因为在子视划分中分别对两视信号进行了补零处理，也即两倍的重采样，所以和传统的 MD 算法相比此时峰值偏移量的计算需要除以重采样倍率，这里表示为：

$$\Delta t=-\frac{\Delta f_{\mathrm{a}}\left(\dfrac{1}{f_{\mathrm{r}}}-\dfrac{1}{f_{\mathrm{r}}^{'}}\right)}{2} \tag{16}$$

其中$f_{\mathrm{r}}^{'}$为待估计的等效多普勒调频率。而峰值偏移与多普勒调频率误差关系为[13]：

$$\Delta f_{\mathrm{r}}\approx-\frac{f_{\mathrm{r}}^{'2}}{\Delta f_{\mathrm{a}}}\Delta t \tag{17}$$

联立式(16)和式(17)可以得到多普勒调频率误差 Δf_{r}。所以可得估计后的信号等效调频率：

$$f_{\mathrm{r}} = f_{\mathrm{r}}^{'} + \Delta f_{\mathrm{r}} \tag{18}$$

并由式(14)可得：

$$\hat{v} = \sqrt{\left| \frac{\lambda f_{\mathrm{r}}^{'} R_{\mathrm{ref}} \cos\varphi_{\mathrm{ref}}}{2} \right|} \tag{19}$$

得到 $\hat{v}$ 后对滤波器 $H\left(f_{\eta}\right)$ 进行修正，然后重复式(13)到式(19)，重新估计一直到满足 $\Delta t \le \delta$，其中 δ 为迭代结束门限，一般选择使得 QPE 小于 $\pi/16$ 的 δ。

3.3 嵌入调频率估计的滑动聚束 SAR 成像处理流程

嵌入 SMD 算法的滑动聚束 SAR 精确成像流程如图 5 所示。首先需要对信号进行方位向 Deramp 处理变换到方位向非混叠域，Deramp 处理流程如图 3 所示；然后可以使用一般的条带距离压缩方法对信号进行距离压缩和距离徙动校正；之后按照式(11)和式(12)的方法进行方位向时域子视划分以及补零，然后变换到方位向频域，完成子视划分。对划分好的两视频谱进行匹配滤波，得到子视图像；并且按照式(15)使用子视图像幅度值求得互相关函数，获得互相关函数的峰值偏移量 Δt。当 Δt 大于门限 δ 时，根据式(17)–式(19)得到新的成像参数，并代入 $H\left(f_{\eta}\right)$ 中，重复之前的步骤得到 Δt，直到其小于门限 δ；反之表示迭代结束，输出最终的方位向匹配滤波器，并对距离压缩后的数据进行方位压缩得到 SAR 图像，文中 δ 取值满足

$$\pi \frac{f_{\mathrm{r}}^{'2}}{\Delta f_{\mathrm{a}}} \delta \left(\frac{T_{\mathrm{p}}}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{16}$$

即 QPE 误差小于 $\pi/16$ 时停止迭代。

4　实验结果和分析

为了验证算法的有效性，本文分别用 2 维点目标阵列信号和面目标仿真信号进行实验，并给出实验结果。

4.1 点阵信号仿真实验

点阵信号仿真实验的主要参数如表 1 所示，仿真场景中设置了 48 个点目标，分布在 1585.3 m × 800 m (方位向×距离向)的场景范围内，如图 6 所示。实验中使用图 5 所示的嵌入 SMD 算法的成像流程对回波数据进行精确成像处理，实验过程中对方位匹配滤波器的参数 v 分别加了 0.5 m/s, 1.0 m/s 和 1.5 m/s 的误差，来验证 SMD 算法的估计效果。

取图 6 中红色框选中的 3 个点目标 P_1, P_2, P_3 的方位向 1 维信号来观察在实验中它们的时域和频域特性变化，图 7 (a)，图 7(b)两幅图分别为这 3 个点目标的信号幅频特性曲线和信号幅度曲线。从图 7 (a)，图 7(b)中容易看出，此时信号在时域非混叠而在频域是混叠的。经过 Deramp 处理之后，方位向累积时间从 35 s 缩短到 3.27 s，多普勒带宽从 200 Hz 展宽到 2717 Hz，图 7(c)和图 7(d)为 Deramp 处

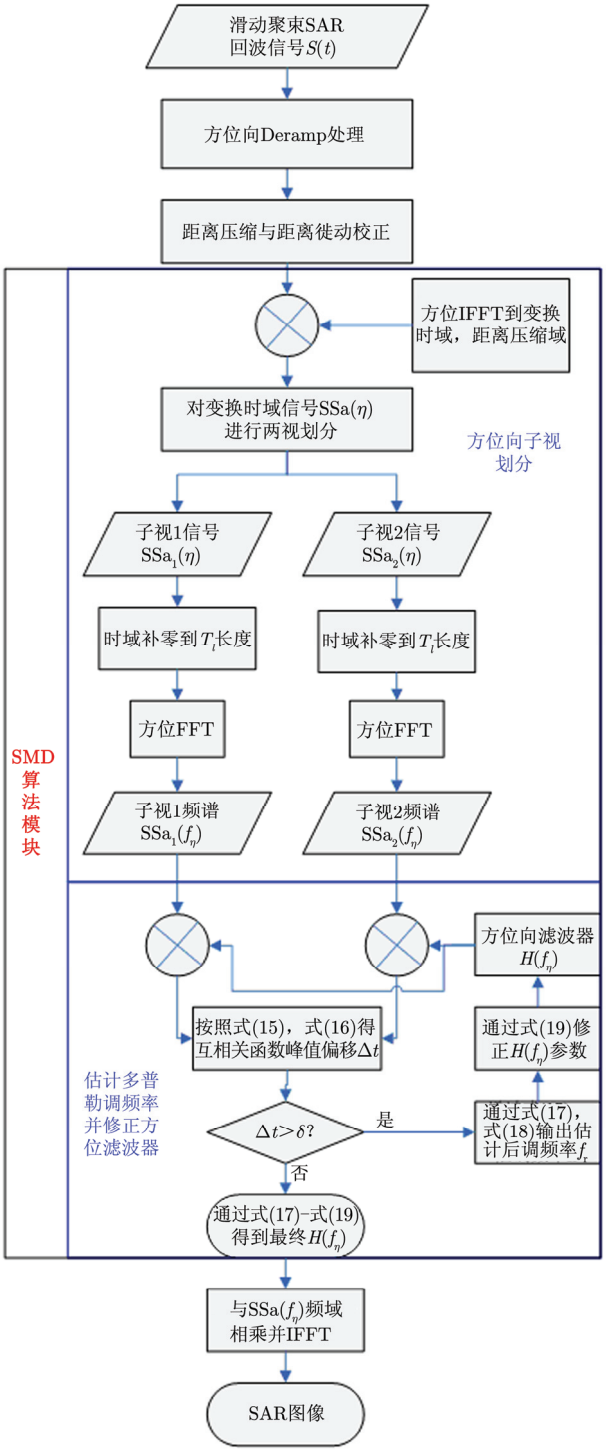


图 5　嵌入 SMD 算法的滑动聚束 SAR 精确成像流程

Fig. 5　The flow chart of sliding spotlight SAR imaging process that SMD algorithm embed

表 1 点阵信号仿真实验主要参数

Tab. 1 Main parameters of the simulation experiment of the pot array targets

中心频率(Hz)	0	平台等效速度(m/s)	125
波长(m)	0.03077	方位天线尺寸(m)	2
天线转动角度范围(°)	±7.5	中心斜视角(°)	0
场景参考距离(m)	10000	PRF(Hz)	200
滑动聚束因子	0.3982	虚拟转动点距离(m)	16616
瞬时多普勒带宽(Hz)	125	方位向分辨率(m)	0.3968
场景时间(s)	35	多普勒总带宽(Hz)	2264
场景宽度(m)	1585.3	仿真点数	3×16

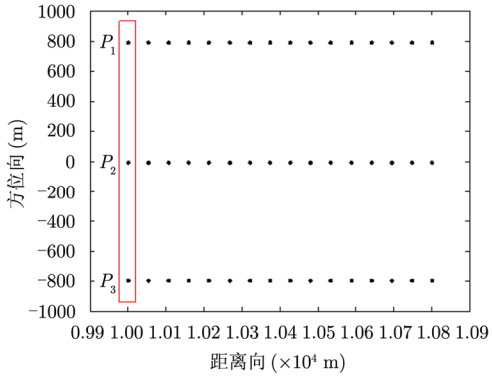


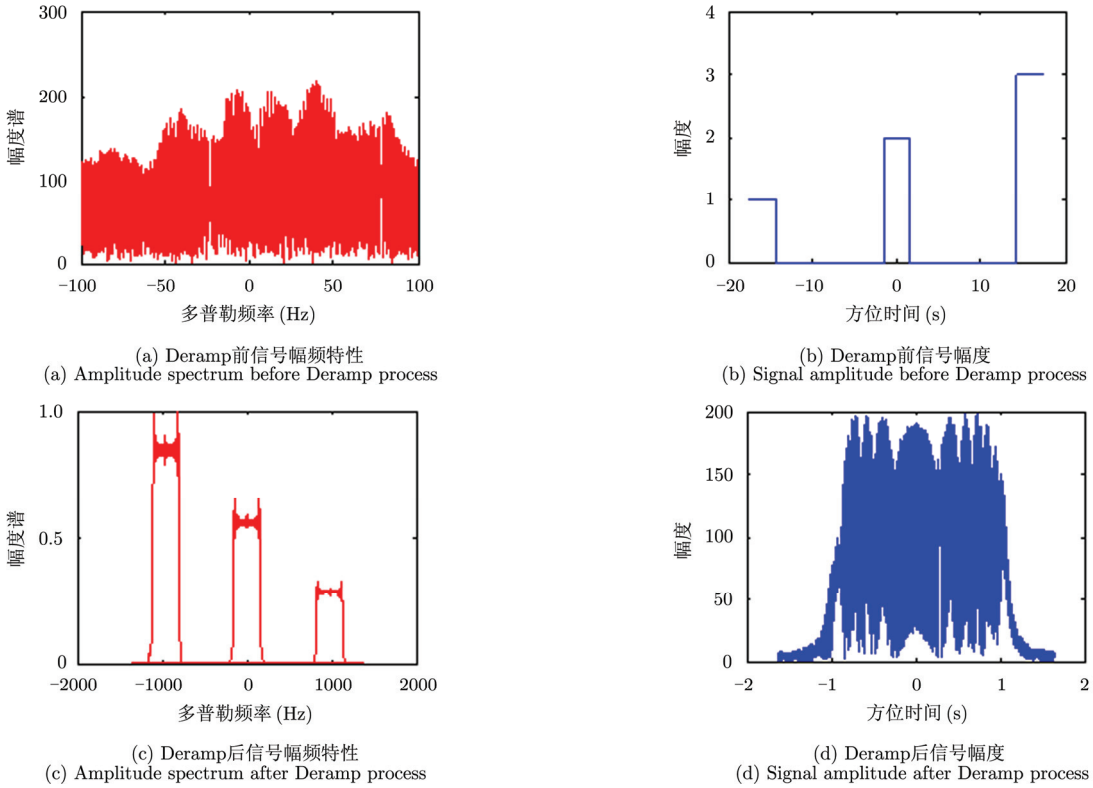
图 6 点目标分布图

Fig. 6 Targets distribution map

理后的信号幅频曲线和时域幅度曲线，此时信号在频域不再混叠却在时域是混叠的。

在 Deramp 处理后，进行变换时域信号的子视划分，得到如图 8(a)所示的两个子视的时域幅度曲线。对两视信号进行傅里叶变换后，得到图 8(b)所示的两个子视的幅频曲线。对比图 7(c)和图 8(b)可得，本文对每个点目标在频域上完成了两视划分。

完成子视划分后，按照图 5 的步骤对信号进行成像处理。表 2 给出了在不同误差下的多普勒调频率估计迭代次数、残余调频率误差以及相对应的 QPE 和 P_2 点在精确聚焦后的方位向峰值旁瓣比(PSLR)，



(a) Deramp前信号幅频特性
(a) Amplitude spectrum before Deramp process

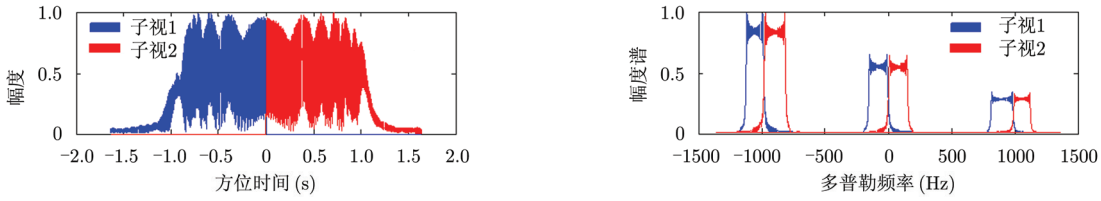
(b) Deramp前信号幅度
(b) Signal amplitude before Deramp process

(c) Deramp后信号幅频特性
(c) Amplitude spectrum after Deramp process

(d) Deramp后信号幅度
(d) Signal amplitude after Deramp process

图 7 Deramp 前后信号特性

Fig. 7 The ins and outs of the Deramp process



(a) 变换时域子视划分结果
(a) The partition result in time domain

(b) 变换频域子视划分结果
(b) The partition result in transfer domain

图 8 子视划分效果图

Fig. 8 The partition result of the signal

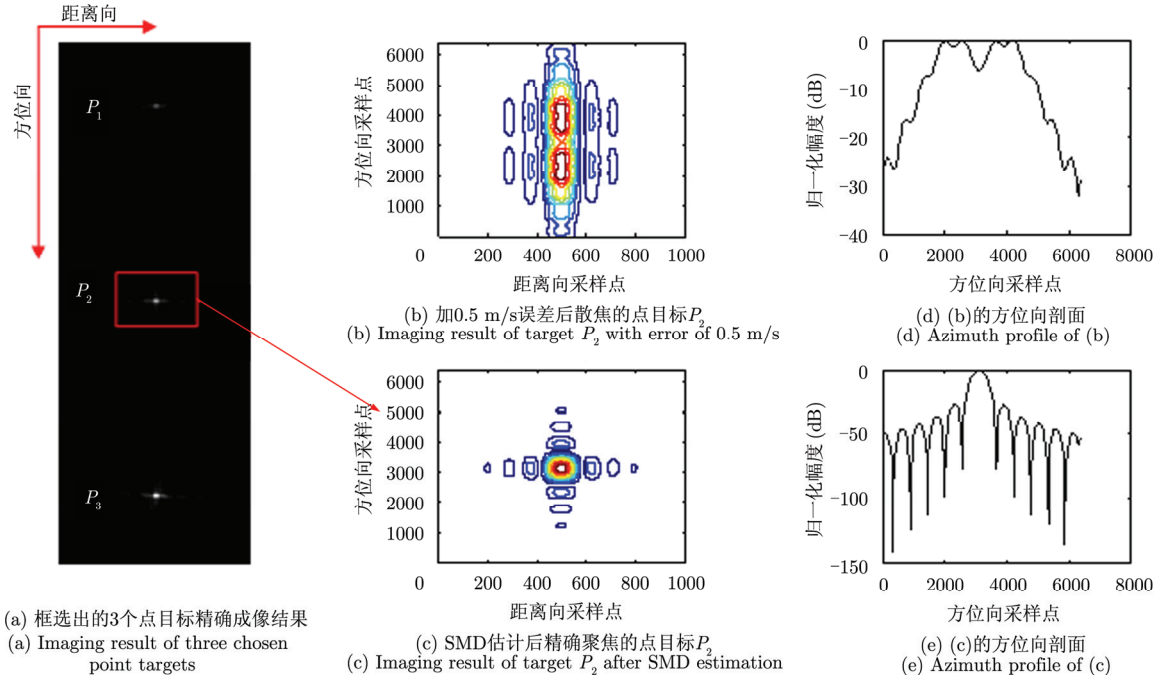
积分旁瓣比(ISLR)。从表 2 中数据可以看出，估计过程中能够很快地完成迭代，并且估计后的 QPE 值可以忽略不计，这说明 SMD 算法能够精确地估计多普勒调频率。

下面对加误差 Δv 等于 0.5 m/s 的实验进行分析，在经过 SMD 多普勒调频率估计后，P_1, P_2, P_3 3 个点目标的聚焦图像如图 9(a)所示。图 9(a)红色框选出的点目标 P_2 的成像结果如图 9(c)所示，为了比较，图 9(b)同时给出了加误差后散焦的 P_2 点成像结果，容易看出 0.5 m/s 的误差导致点目标产生了严重的散焦。图 9(d)，图 9(e)两幅图分别给出点目标 P_2 的多普勒调频率估计前后的方位向剖面分析图，图中对该点目标峰值附近区域沿方位向进行了 64 倍插值，两图对比可以看出，经过 SMD 算法对多普勒调频率估计后，该点目标得到了很好的聚焦。

表 2 点目标实验结果

Tab. 2 The results of the experiment that process the point targets

误差 Δv (m/s)	迭代次数	P_2 点估计后 PSLR (dB)	P_2 点估计后 ISLR (dB)	估计后调频率误差(Hz/s)	估计后 QPE (π)
0.5	4	13.2592	−9.8320	0.0021	0.000055
1.0	4	13.2463	−9.8100	0.0076	0.000198
1.5	6	13.2311	−9.8120	0.0042	0.000110



(a) 框选出的3个点目标精确成像结果
(a) Imaging result of three chosen point targets

(b) 加0.5 m/s误差后散焦的点目标P_2
(b) Imaging result of target P_2 with error of 0.5 m/s

(c) SMD估计后精确聚焦的点目标P_2
(c) Imaging result of target P_2 after SMD estimation

(d) (b)的方位向剖面
(d) Azimuth profile of (b)

(e) (c)的方位向剖面
(e) Azimuth profile of (c)

图 9 成像结果

Fig. 9 The results of the imaging process

4.2 面目标仿真实验

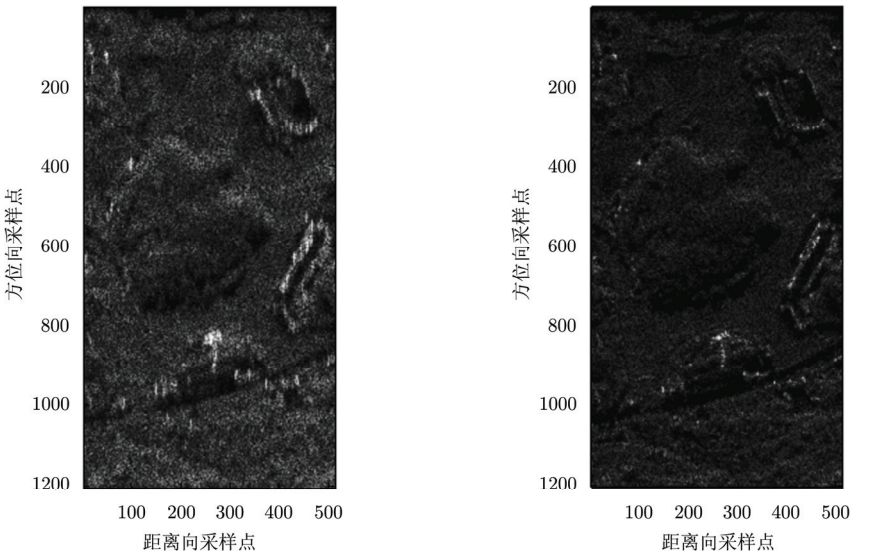
本文采用了如表 3 所示的星载滑动聚束 SAR 参数获得面目标仿真信号，并代入图 5 所示的嵌入 SMD 算法的成像流程对回波数据进行精确成像处理。

面目标仿真实验使用了某卫星 X 波段的山区场景数据进行仿真实验。场景大小为 250 m × 125 m (方位向 × 距离向)，对应有 1024 × 512 个点。仿真中对方位向匹配滤波器 $H\left(f_\eta\right)$ 的等效速度参数 v 加了 0.2 m/s 的误差，对应产生的 QPE 误差约为 4π 。由于误差较大，调频率估计中经过了 5 次迭代。图 10 给出了该实验的处理结果。图 10(a)为加误差后的成像结果，可以看出有较大的方位向散焦，图 10(b)为多普勒估计后的成像结果，对比两幅图可以看出经过 SMD 算法修正成像参数后，聚焦效果良好，这也验证了 SMD 算法的有效性。

表 3 面目标仿真实验主要参数

Tab. 3 The parameters of the simulation experiment of the Area target

中心频率(Hz)	0	多普勒调频率(Hz/s)	−3144.3
波长(m)	0.0312	方位天线尺寸(m)	4.2
场景参考距离(km)	1073.544	PRF(Hz)	5000
滑动聚束因子	0.1129	虚拟转动点距离(km)	1210.214
瞬时多普勒带宽(Hz)	3456.3	方位向分辨率(m)	0.2101
场景时间(s)	13.1072	多普勒总带宽(Hz)	40032



(a) 多普勒调频率未估计目标
(a) Imaging result without Doppler rate estimation

(b) 多普勒调频率估计后目标
(b) Imaging result with Doppler rate estimation

图 10 山区场景数据成像结果

Fig. 10 The imaging result of the mountainous region

5 结束语

针对机载、星载滑动聚束 SAR 的多普勒调频率估计问题，本文在原始 MD 算法的基础上，结合滑动聚束 SAR 信号方位向混叠的特点，实现了基于滑动聚束 SAR 性质的 SMD 多普勒调频率估计算法。利用两步算法中的 Deramp 方法实现了信号在方位向的去模糊，并且利用信号在 Deramp 处理后的变换域特性，解决了经典的 MD 算法无法直接用于滑动聚束 SAR 处理的问题，最后将其嵌入到两步处理算法中。实验结果表明，SMD 算法能够适用于滑动聚束 SAR 信号的处理，并且有着较高的效率和良好的性能。

参 考 文 献

[1] Berizzi G F and Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996,

32(3): 1185–1191.

[2] Mancill C E and Swiger J M. A map drift autofocus technique for correcting high order SAR phase error[C]. 27th Annual Tri-Service Radar Symposium Record, Monterey CA, 1981: 23–25.

[3] Samczynski P and Kulpa K S. Coherent MapDrift technique[J]. *IEEE Transations on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1505–1517.

[4] Samczynski P. Superconvergent velocity estimator for an autofocus coherent MapDrift technique[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 204–208.

[5] Ouchi K. On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, 33(8): 823–827.

[6] Wahl D E, Eichei P H, Ghiglia D C, *et al*.. Phase gradient autofocus—a Robust tool for high solution SAR phase correction[J]. *IEEE Transations on Aerospace and Electronic System*, 1994, 30(3): 827–835.

[7] 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 Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136.

[8] Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, *et al*.. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(6): 363–372.

[9] Prats P, Scheiber R, 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.

[10] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Wang Yong, *et al*.. Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1036–1040.

[11] 韩冰, 张永军, 刘佳音, 等. 斜视滑动聚束 SAR 成像的 ECS 算法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(5): 674–680.
Han Bing, Zhang Yong-jun, Liu Jia-yin, *et al*.. ECS algorithm for squint sliding spotlight SAR imaging[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 29(5): 674–680.

[12] Liu Fei-feng, Ding Ze-gang, and Zeng Tao, *et al*.. Performance analysis of two-step algorithm in sliding spotlight space-borne SAR[C]. 2010 IEEE Radar Conference, Washington, D.C., 2010: 965–968.

[13] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 380–390.
Wei Zhong-quan. SAR Satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 380–390.

作 者 简 介

折小强(1989–)，男， 2011 年于中国科学技术大学获得工学学士学位，2011 年至今就读于中国科学院电子学研究所，硕士研究生，研究方向为 SAR 成像处理。

仇晓兰(1982–)，女，副研究员，研究方向为 SAR 成像技术、双基地 SAR 技术。

韩　冰(1980–)，女，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。

雷　斌(1978–)，男，研究员，研究方向为多传感器遥感信息处理系统体系架构设计、SAR 信号并行处理、SAR 图像处理与图像质量提升和 SAR 系统性能预估与优化等。