

## 捷变 PRF 技术在斜视聚束 SAR 中的应用

罗绣莲<sup>\*①②</sup> 徐伟<sup>①</sup> 郭磊<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100039)

**摘要:** 该文关注一种新型的斜视聚束 SAR 模式, 其采用捷变脉冲重复频率(PRF)技术来增加高分辨率成像时的距离向测绘带宽。聚束 SAR 利用波束旋转来增加方位向分辨率。然而, 高分辨率和大斜视的成像要求会导致较大的距离单元徙动(RCM)。PRF 固定不变(即接收窗固定)时, 为了保证方位向数据获取时间内所有的回波脉冲能被完整接收, 距离向测绘带宽对应的时间宽度必须小于接收窗宽度。为了消除 RCM 对测绘带宽的影响, 该文将 PRF 沿着方位向时间连续地改变(捷变), 使得接收窗的变化与瞬时斜距的变化一致。首先推导了 PRF 的变化规律, 然后利用一种改进的后向投影算法(BPA)对回波数据成像, 最后通过仿真实验验证这种 SAR 模式及对应的成像算法。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 斜视聚束; 捷变 PRF; 高分辨率; 后向投影算法(BPA)

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2015)01-0070-08

DOI: 10.12000/JR14149

**引用格式:** 罗绣莲, 徐伟, 郭磊. 捷变 PRF 技术在斜视聚束 SAR 中的应用[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 70-77. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14149>.

**Reference format:** Luo Xiu-lian, Xu Wei, and Guo Lei. The application of PRF variation to squint spotlight SAR[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 70-77. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14149>.

## The Application of PRF Variation to Squint Spotlight SAR

Luo Xiu-lian<sup>①②</sup> Xu Wei<sup>①</sup> Guo Lei<sup>①②</sup>

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

<sup>②</sup>(*University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** This paper focuses on a novel squint spotlight SAR mode, where the PRI variation is employed to increase the range swath width, especially for high-resolution imaging. The spotlight SAR is developed to increase the azimuth resolution via steering the antenna beam to always illuminate the same area on the ground during the whole data acquisition interval. However, requirement of high resolution and large squint angle leads to large Range Cell Migration (RCM). Therefore, to ensure the scattered echoes along the azimuth to be completely received within the fixed reception window, the range swath has to be much narrower than the reception window. In order to increase the range swath, we can change the PRI along the azimuth to shift the reception window according to the variation of instantaneous slant range. This paper first derives the PRI variation scheme. Afterward, a modified time-domain Back-Projection Algorithm (BPA) is presented to implement the focusing. Finally, simulation results are given to validate the presented SAR mode and corresponding imaging processor.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Squint spotlight; High-resolution; PRF variation; Back-Projection Algorithm (BPA)

### 1 引言

测绘带宽和分辨率是星载 SAR 系统的两个重要指标<sup>[1]</sup>。聚束 SAR<sup>[2-4]</sup>通过牺牲方位向连续测绘带宽来提高方位向分辨率。Mosaic 模式<sup>[5]</sup>利用聚束 SAR 在多个不同斜视角处成像, 将获得的雷达图像

进行后期拼接, 进而提高方位向测绘带宽。另外, 在军事目标的检测和监视<sup>[4]</sup>中, 可能会要求对感兴趣的区域在短时间内进行多次成像, 因此需要斜视聚束成像。不同斜视角成像还能得到地面目标的不同散射特性<sup>[4]</sup>。总的来说, 斜视聚束模式是未来 SAR 发展的一个重要方向。

聚束式 SAR 中, 随着分辨率和斜视角的增加, 合成孔径时间和距离单元徙动(RCM)增大<sup>[6]</sup>。为了

2014-12-05收到, 2015-03-19改回

自然科学基金青年基金(61401431)资助课题

\*通信作者: 罗绣莲 xiaoluo6070@126.com

实现全球观测，系统设计中有的波位必须紧挨着信号接收截止区(盲区)。由于 RCM 的影响，某些方位位置的回波脉冲可能会超出接收窗；反过来，为了保证所有的回波脉冲被完全接收，必须减小距离向测绘带宽。为了消除 RCM 对测绘带宽的影响，可以连续地改变 PRF<sup>[6]</sup>，使得接收窗或者盲区的变化与瞬时斜距的变化一致。在条带式 SAR 中，文献[7-9]采用周期线性改变脉冲重复间隔(PRI)的方法，以获得超宽测绘带宽。其本质是将固定斜距的盲区分散到整个测绘带。对于测绘带内的每一个斜距，大部分回波脉冲被完整接收。当 PRI 快速周期线性变化时，每个变化周期内将有 1 个或者 2 个脉冲丢失<sup>[9]</sup>，因此完全接收到的脉冲呈周期非均匀分布。为了恢复均匀采样信号，文献[9]提出了一种改进的多通道重建算法。

本文将捷变 PRF 技术扩展到斜视聚束 SAR 中，得到的回波数据在方位向呈非均匀分布。由于这种非均匀性不再具有周期规律，因此均匀信号不能由多通道重建算法恢复。一种方法是利用插值算法来插值近似<sup>[8,10]</sup>，然后采用常用的频域成像算法两步式算法(TSA)<sup>[3,4]</sup>进行成像。但是，插值误差会对 TSA 有一定的影响。另一种方法是采用时域 BPA 成像<sup>[11,12]</sup>，由于 BPA 可以直接处理非均匀采样的回波数据，因此不存在插值误差。然而，由于接收窗记录的每个回波脉冲的第 1 个样本对应的距离延时会随着 PRF 的变化而变化，所以需要修改传统的 BPA 来适应这种变化。

## 2 基于捷变 PRF 技术的斜视聚束 SAR

### 2.1 斜视聚束 SAR

斜视聚束 SAR 的成像几何如图 1(a)所示。由于轨道模型不是本文研究的重点，本文假设在数据

获取时间内，飞行路径为直线，地球为平面并且不旋转。天线波束始终指向成像场景的中心，场景中心到平台的最近斜距为  $R_c$ ， $X$  为波束足迹宽度， $X_1$  为数据获取时间  $T$  内平台的飞行距离， $v_r$  为平台的等效飞行速度， $\theta_c$  为斜视角， $\theta_s$  和  $\theta_e$  分别为数据获取开始时刻和结束时刻对应的瞬时斜视角。由点目标  $(R_0, x_0)$  散射的回波可以表示为：

$$s(\tau, \eta) = \exp\{-j4\pi f_c R(\eta)/c\} \exp\left\{j\pi k_r \left(\tau - R(\eta)/c\right)^2\right\} \cdot \text{rect}\left\{\frac{\tau - 2R(\eta)/c}{T_p}\right\} \text{rect}\left\{\frac{x_0 - R_c \tan \theta_c}{X}\right\} \left(\frac{\eta}{T}\right) \quad (1)$$

其中  $f_c$  为发射脉冲载频， $k_r$  为发射脉冲调频率， $c$  为光速， $\tau$  为距离向时间， $\eta$  为方位向时间， $T_p$  为脉冲宽度， $R(\eta)$  为瞬时斜距，表示为：

$$R(\eta) = \sqrt{R_0^2 + v_r^2 \left(\eta - \frac{x_0}{v_r}\right)^2} \quad (2)$$

成像场景的多普勒总带宽为<sup>[4]</sup>：

$$B_a = \frac{2v_r \cos \theta_c}{l_{az}} + \frac{2v_r B_r \sin \theta_c}{c} + \frac{2f_c v_r^2 \cos^3 \theta_c}{c R_c} T = B_f + B_{sq} + B_s \quad (3)$$

其中  $l_{az}$  为天线长度， $B_r$  为发射脉冲带宽。总的多普勒带宽由 3 部分组成：方位向波束宽度导致的  $B_f$ ；斜视角  $\theta_c$  形成的  $B_{sq}$ ；多普勒中心旋转造成的  $B_s$ 。图 1(b)展示了回波数据在方位时频域(TFD)中的支持域。通常情况下，系统 PRF 仅仅比  $B_f$  大，如果采用频域 TSA 进行成像，在将数据变换到多普勒域之前，需消除  $B_s$  和  $B_{sq}$  造成的频谱混叠。成像得到的方位向分辨率约为  $v_r/B_s$ 。

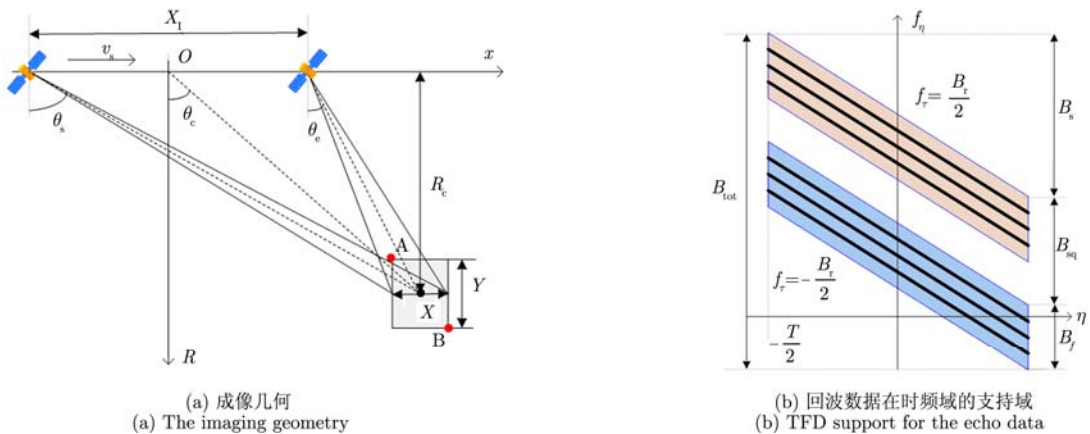


图 1 斜视聚束 SAR

Fig. 1 The squint spotlight SAR

## 2.2 距离单元徙动(RCM)

系统 PRF 固定不变时,接收窗或盲区与瞬时斜视角的关系如图 2 所示。可以看到,盲区位置不会随瞬时斜视角的变化而变化,而测绘带对应的斜距范围却因雷达平台的移动而改变。因此,为了接收到所有的回波脉冲,系统所允许的最大测绘带宽对应的时间宽度  $\Delta t$  为:

$$\Delta t \approx \text{PRI} - T_p - \frac{2R_{\text{rcm}}}{c} \approx T_p + \frac{2\Delta w}{c} \quad (4)$$

其中  $R_{\text{rcm}}$  为场景中心的最大 RCM,  $\Delta w$  为成像场景到坐标原点  $O$  的最大和最小斜距之差,在图 1(a)所示的几何中为  $OB-OA$ 。除此之外,RCM 很大时会导致较多的数据存储冗余,如图 2 所示。注意这里是以场景中心的 RCM 为参考,场景边缘的 RCM 与场景中心会有一定差异。

表 1 给出了几种不同分辨率和不同斜视角情况下的聚束 SAR 系统参数,可以看出场景中心的 RCM 与  $\Delta w$  之比随着分辨率和斜视角的增加而增大。实际系统设计中往往还要考虑 NESZ, AASR, RASR 和斜视角对测绘带宽的影响。因此实际测绘带宽比表 1 中  $\Delta w$  的值小,而 RCM 却不变,RCM 与测绘带宽之比将比表 1 中 RCM 与  $\Delta w$  的比值更大。

前面提到场景中心和边缘点的 RCM 会有一些的差异。下面给出表 1 中  $30^\circ$  斜视角,  $0.3 \text{ m}$  分辨率情况下,几种场景大小对应的场景中心和边缘点的 RCM,如表 2 所示。可见,即使是  $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$  的测绘带宽(实际系统中并不能达到这么大的测绘带宽),场景中心和边缘点的 RCM 差异在  $0.5 \text{ km}$  以内,相比于测绘带宽和 RCM,这种差异可以忽略。因此在下面对 PRF 变化方案的推导中,仅仅考虑场景中心的距离历程变化。另外,为了说明  $\Delta w$  和测绘带宽的区别,表 2 还给出了成像场景到坐标原点  $O$  的最大和最小斜距差  $\Delta w$ 。可见在大斜视星载聚束 SAR 系统中  $\Delta w$  大于距离向测绘带宽。

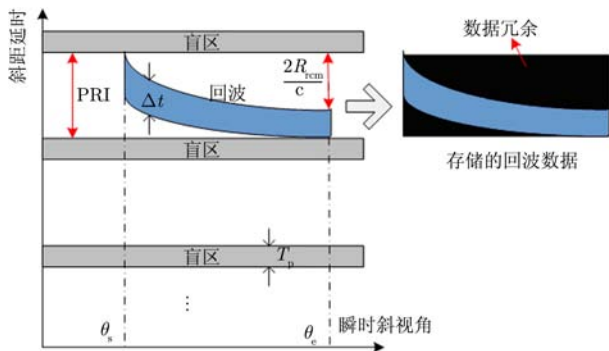


图2 PRF固定不变时接收窗与瞬时斜视角的关系  
Fig. 2 Reception window versus instantaneous squint angle for constant PRF

表1 RCM与  $\Delta w$  之比

Tab. 1 The ratio of RCM to  $\Delta w$

参数	取值					
中心频率(GHz)	10					
场景中心的最近斜距(km)	745					
天线长度(m)	3					
脉冲宽度( $\mu\text{s}$ )	10					
雷达等效飞行速度(m/s)	7561					
系统 PRF(Hz)	2900					
接收窗宽度(km)	47					
斜视角( $^\circ$ )	0		-10		-30	
方位分辨率(m)	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3
雷达照射时间(s)	1.42	4.76	1.49	4.98	2.12	7.33
RCM(km)	0.02	0.23	1.96	6.54	8.01	27.7
系统所允许的最大 $\Delta w$ (km)	46.98	46.77	45.04	40.06	38.99	19.3
RCM 与 $\Delta w$ 之比(%)	0	0	4.35	16.33	21	144

表2 不同场景大小时场景中心与边缘的RCM

Tab. 2 The RCM of scene center and edge for different scene sizes

场景大小	$\Delta w$ (km)	A 点	中心点	B 点
4 km $\times$ 4 km	5.46	27.659	27.700	27.741
10 km $\times$ 10 km	13.65	27.597	27.700	27.802
20 km $\times$ 20 km	27.31	27.492	27.700	27.901
30 km $\times$ 30 km	40.96	27.385	27.700	27.999

## 2.3 PRF 变化方案

本小节将设计一种 PRF 变化方案,使得接收窗与瞬时斜视角的关系如图 3 所示。这样回波的有效

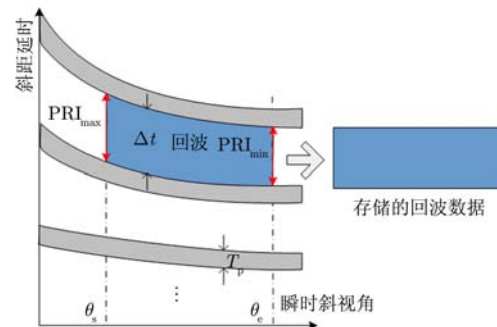


图3 PRF变化时接收窗与瞬时斜视角的关系  
Fig. 3 Reception window versus instantaneous squint angle for varying PRF

时间将扩展到整个接收窗, 也就是说 RCM 对测绘带宽的影响被消除。另外, 由于接收窗记录的数据全是有效回波数据, 存储数据冗余大部分被消除。PRF 变化方案推导如下。

波束照射时间内的第  $n$  个发射脉冲被场景中心点目标  $(R_c, x_c)$  散射后, 再被接收机接收, 这期间的距离历程为:

$$\begin{aligned} R_c(n) &= \sqrt{R_c^2 + \left( v_r \sum_{k=1}^{n-1} \text{PRI}(k) - R_c \tan(\theta_s) \right)^2} \\ &+ \sqrt{R_c^2 + \left( v_r \sum_{k=1}^{n+m-1} \text{PRI}(k) - R_c \tan(\theta_s) \right)^2} \\ &= c[\text{PRI}(n) + \dots + \text{PRI}(n+m-2) + \Delta \\ &\quad \cdot \text{PRI}(n+m-1)] \approx c[(m+\Delta)\text{PRI}(n)] \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $\text{PRI}(k)$  表示波束照射时间内的第  $k$  个 PRI,  $m$  是发射和接收一个特定脉冲之间经历的脉冲个数,  $\Delta \in (0,1)$  是距离延时中的小数部分。假设第  $n$  个脉冲是在方位时刻  $\eta$  处发射的, 那么  $R_c(n)$  可以近似表示为:

$$R_c(n) = R_c(\eta) \approx 2\sqrt{R_c^2 + (v_r \eta - x_c)^2} \quad (6)$$

为了消除 RCM 对距离向测绘带宽的影响, 式(5)中的  $\Delta$  和  $m$  应不随方位时间变化。联合式(5)和式(6)得 PRI 变化规律为:

$$\text{PRI}(n) \approx \frac{2\sqrt{R_c^2 + (v_r \eta - x_c)^2}}{(m+\Delta)c} \quad (7)$$

如图 1 (a)所示, 起始斜视角  $\theta_s$  处的等效斜距最大, 为  $R_c/\cos(\theta_s)$ , 因此需要最大的 PRI (设为  $\text{PRI}_{\max}$ ), 式(7)可以重新写成:

$$\text{PRI}(n) = \frac{\sqrt{R_c^2 + (v_r \eta - x_c)^2}}{R_c} \cos(\theta_s) \text{PRI}_{\max} \quad (8)$$

为了确定  $\text{PRI}(n)$ , 均匀离散化初始的方位向时间, 离散间隔为  $\text{PRI}_m$ ,  $\text{PRI}_m$  为  $\text{PRI}_{\max}$  和  $\text{PRI}_{\min}$  (最小 PRI) 的均值,  $\text{PRI}_{\min}$  计算为:

$$\text{PRI}_{\min} \approx \frac{\cos(\theta_s)}{\cos(\theta_e)} \text{PRI}_{\max} \quad (9)$$

更新后的方位时间为非均匀离散化的时间, 离散间隔为  $\text{PRI}(n)$ , 其范围在  $\text{PRI}_{\min}$  和  $\text{PRI}_{\max}$  之间变化。这种变化规律下接收窗或盲区与瞬时斜视角的关系如图 3 所示。

### 3 成像处理方法

聚束式 SAR 中, 一种快速有效的成像方法是两步式成像算法(TSA)<sup>[3]</sup>。两步式中的第 1 步为方位一致压缩, 其在连续时间域为方位向信号与参考信号

的卷积, 在离散时间域由方位解斜、快速傅里叶变换(FFT)和残余相位补偿 3 部分实现。由于 SAR 是一种脉冲雷达, 方位一致压缩只能在离散域实现, 并且要求方位信号均匀采样。一种解决方案是对回波信号在方位向插值重采样后再进行两步式成像, 然而, 插值引入的误差会导致方位一致压缩失败, 即多普勒频谱仍然混叠。

本节采用时域后向投影算法(BPA)<sup>[11,12]</sup>进行成像。该算法在时域完成, 可以直接对非均匀采样信号进行处理。在传统的 BPA 算法中, 方位数据为均匀采样数据, 并且成像场景的网格间距小于方位分辨率  $v_r/B_s$  即可。然而在大斜视聚束 SAR 中, 斜视角造成的多普勒带宽很大, 每个点目标的多普勒总带宽为  $B_{sq} + B_s$ 。因此网格间距需要小于  $v_r/(B_{sq} + B_s)$ 。另外由于 PRF 的变化, 记录的回波脉冲的第 1 个样本对应的距离延时会随着方位时间改变, 所以需要修改传统的 BPA 来适应这种变化。BPA 的处理流程如图 4 所示。

存储的回波数据为:

$$\begin{aligned} s(\tau, n) &= \exp\left\{ \frac{-j4\pi f_c R(n)}{c} \right\} \\ &\quad \cdot \exp\left[ j\pi k_r (\tau - \tau_d)^2 \right] \text{rect}\left\{ \frac{\tau - \tau_d}{T_r} \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

其中  $R(n)$  为点目标到雷达平台的瞬时斜距,

$$\tau_d = \frac{2R(n)}{c} - [\text{PRI}(n-1) + \dots + \text{PRI}(n-m)] \quad (11)$$

距离压缩通过在距离频域乘以  $H_1$  实现。

$$H_1 = \exp\left\{ \frac{j\pi f_r^2}{k_r} \right\} \text{rect}\left\{ \frac{f_r}{B_r} \right\} \quad (12)$$

由于 BP 算法是对场景中的每一个点分别运算, 首先需要确定成像场景网格。如前面所述, 网格的间隔需要小于  $v_r/(B_{sq} + B_s)$ 。对于网格上的任意一点  $(R_i, x_j)$ , 首先找到其在回波数据上对应的距离历

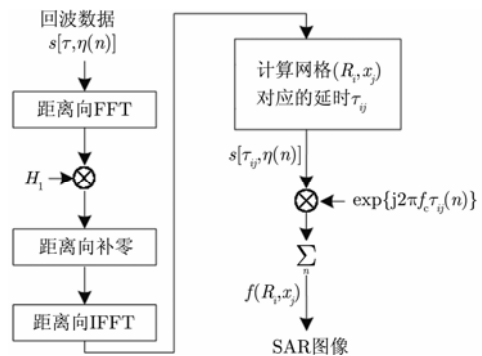


图4 BPA成像处理流程图

Fig. 4 The flowchart of BPA

程曲线,再沿着这条曲线相干叠加便得到该点的成像结果。这个过程的数学表达式为:

$$f(R_i, x_j) = \sum_n s(\tau_{ij}(n), n) \exp\{j2\pi f_c \tau_{ij}(n)\} \quad (13)$$

其中

$$\tau_{ij}(n) = \frac{2 \sqrt{R_i^2 + v_r^2 \left[ \eta(n) - \frac{x_j}{v_r} \right]^2}}{c} \quad (14)$$

通常情况下  $\tau_{ij}(n)$  对应的值为非整数像素值,以其相邻像素来确定该点的距离历程曲线会有一些的误差。为了减小这种误差,可对回波数据插值或升采样。本文通过在距离频谱的两端补零来实现升采样。另外,在确定距离历程曲线时,需要考虑 PRF 的变化,  $\tau_{ij}(n)$  对应的距离向像素索引为:

$$\begin{aligned} & \text{Ind}_{ij}(n) \\ &= \text{round} \left\{ \frac{\tau_{ij}(n) - [\text{PRI}(n-1) + \dots + \text{PRI}(n-m)]}{\Delta\tau} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $\Delta\tau$  为距离向升采样后的像素间隔。对网格中的每一点进行上述投影处理后,便能得到最终的 SAR 图像。

## 4 仿真结果及分析

本节将给出 1 维(方位向)仿真和 2 维仿真实验来验证这种 SAR 模式及其成像处理方法。方位向仿真参数如表 1 所示,其中斜视角为  $30^\circ$ ,分辨率为 0.3 m。根据式(8)推导出的 PRF 变化方案,其中  $\text{PRI}_{\max} = 1/2900$  s,  $\theta_s$  可以根据表 1 和图 1(a)中的几何关系计算得到,瞬时 PRF 与传感器方位位置的关系如图 5(a)所示。对应的斑马图如图 5(b)所示,其中黑色区域表示盲区,红色曲线表示场景中中心点目标的距离历程,蓝色区域表示整个测绘带的距离历程。

### 4.1 1 维仿真

本小节利用方位向的一维仿真来评价 TSA 和 BPA 的方位向成像性能。两种成像算法获得的方位向聚焦结果分别如图 6(a)和图 6(b)所示。可以看到, TSA 聚焦后的方位向信号有很多成对回波,这是由插值误差造成的。而 BPA 聚焦后的方位向信号为一理想的 sinc 函数。因此在后面的 2 维仿真中,我们只给出 BPA 的成像结果。

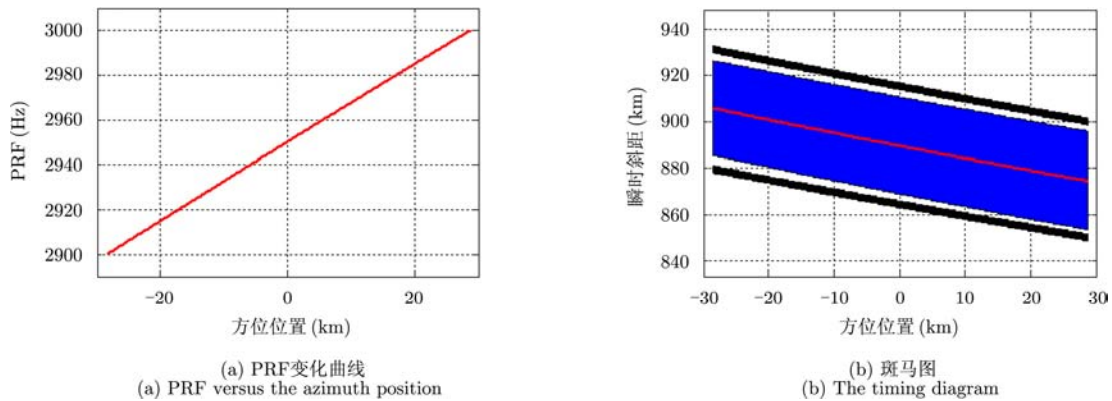


图5 PRF变化引起的盲区变化

Fig. 5 The variation of blind ranges caused by PRF variation

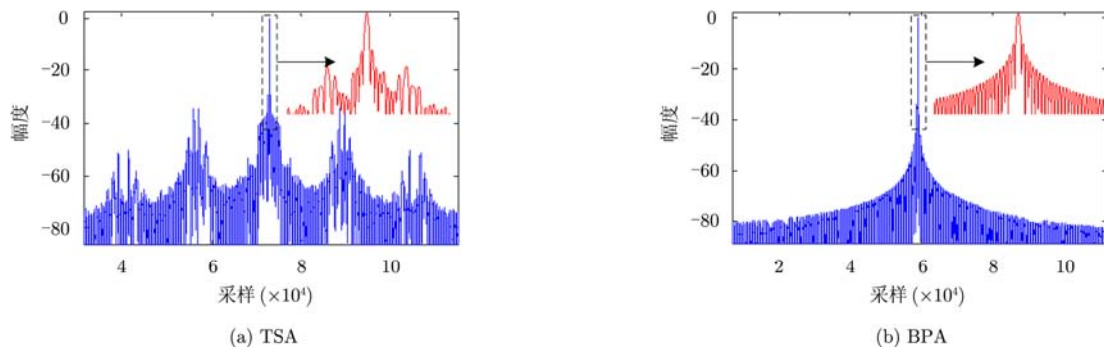


图6 方位向聚焦结果

Fig. 6 Focused results in azimuth

### 4.2 2 维仿真

本小节通过 2 维仿真实验进一步验证 BPA 成像算法。除了表 1 中列出的方位向参数外，脉冲带宽设为 500 MHz，式(3)中的  $B_f$ ,  $B_{sq}$  和  $B_s$  分别为 2183 Hz, 12602 Hz 和 24356 Hz。因此网格间隔设为  $v_r / [1.2(B_s + B_{sq})]$ ，其中因数 1.2 为过采样率。

成像场景如图 7 所示，其中分布了 5 个点目标。图 8(a) 为 PRF 不变时成像场景对应的回波幅度图；图 8(b) 为 PRF 按照式(8)变化时成像场景对应的回波幅度图。从这两幅图可以看出，相同的数据存储空间或者相同的接收窗大小，PRF 变化可以实现更宽的测绘带宽；或者实现相同的测绘带宽，PRF 变化所需的数据存储空间更小。实际上所需的数据存储空间大小如图 8(b) 中红色矩形框所示。

图 9 给出了 5 个点目标最终的成像结果。为了进一步分析点目标的成像性能，点目标分析结果如表 3 所示。可以看出这种工作模式下采用 BPA 成像能获得较理想的聚焦结果。

为了说明网格间隔对成像的影响，网格间隔分别为  $v_r / (1.2B_s)$  (大于  $v_r / (B_{sq} + B_s)$ ) 和  $v_r / [1.2(B_s +$

$B_{sq})]$  时聚焦后的点目标 2 维频谱幅度如图 10 所示，可以看到网格间隔小于  $v_r / B_s$  但大于  $v_r / (B_{sq} + B_s)$  时，得到的 2 维频谱在方位向混叠。

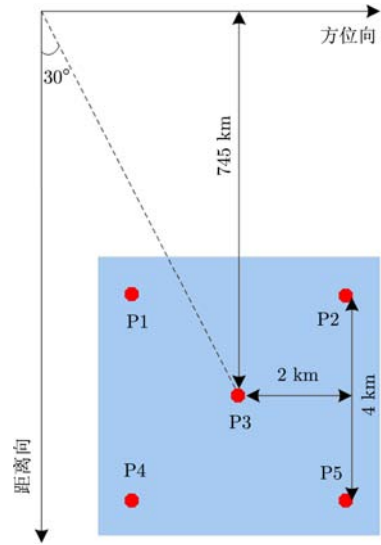


图 7 斜视聚束 SAR 的成像场景

Fig. 7 The designed imaged scene for squint spotlight SAR

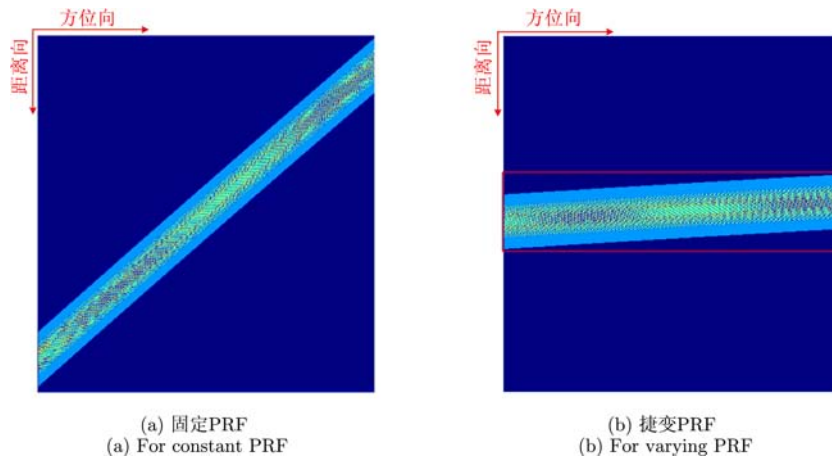


图 8 存储的回波数据幅度

Fig. 8 Amplitude of the stored echo data

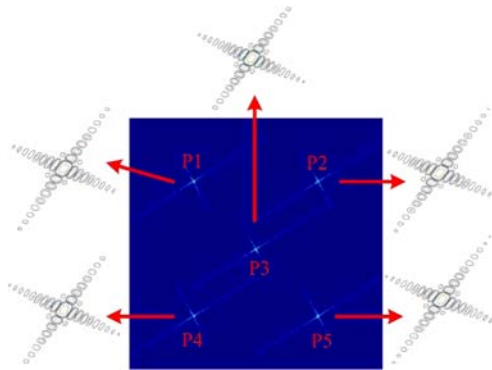


图 9 PRF 变化时的点目标成像结果

Fig. 9 Imaging results for varying PRF

表3 点目标性能分析

Tab. 3 Performance analysis of point targets

点目标	方位向			距离向		
	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
P1	0.310	-13.32	-9.83	0.301	-13.27	-9.92
P2	0.309	-13.26	-9.92	0.299	-13.31	-9.88
P3	0.310	-13.08	-9.85	0.302	-13.36	-9.90
P4	0.311	-13.31	-9.92	0.298	-13.09	-9.76
P5	0.310	-13.11	-9.87	0.303	-13.30	-9.89

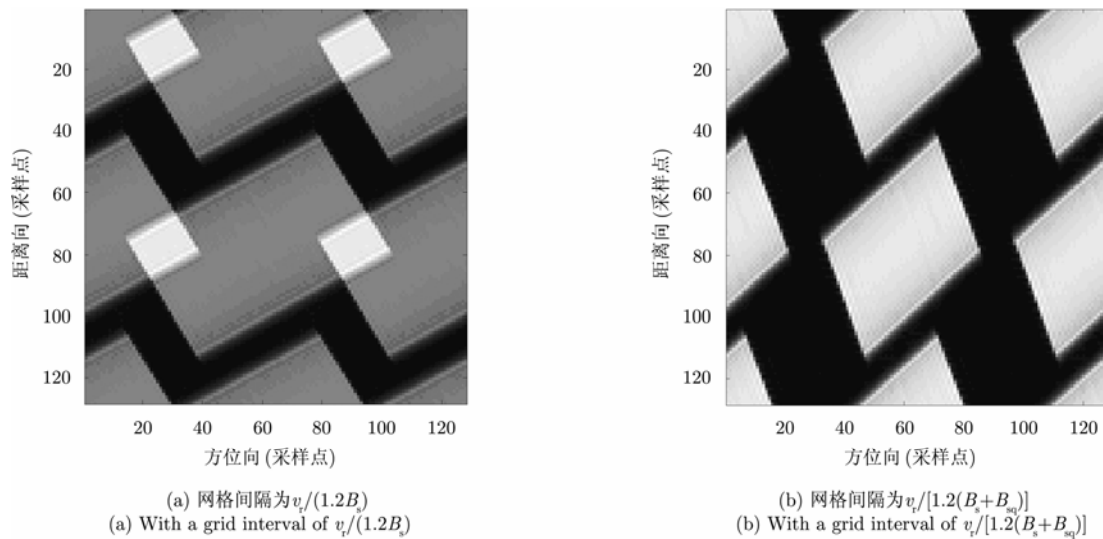


图10 聚焦后点目标 P3 的 2 维频谱幅度

Fig. 10 2D spectra for the point target analysis of P3

## 5 结论

本文介绍了一种新型的聚束 SAR 模式，该模式的系统 PRF 根据一个特定的方案连续变化，以消除 RCM 对距离向测绘带宽和数据存储大小的影响。本文还研究了这种模式对应的成像方案。由于频域成像算法在方位向数据非均匀采样时不再有效，本文提出了一种改进的时域后向投影算法 (BPA) 来获得最后的雷达图像。然而，BPA 在对大成像场景成像时效率较低。目前国内外提出了很多快速 BPA，这些快速算法经过适当的修改，也可以应用于本文所述的成像模式中。

### 参考文献

- [1] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
- [2] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar—Signal Processing and Algorithms[M]. Boston, MA, USA: Artech House, 1995.
- [3] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993–2004.
- [4] Xu W, Deng Y, Huang P, *et al.* Full-aperture SAR data focusing in the spaceborne squinted sliding-spotlight mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4596–4607.
- [5] Naftaly U and Nathansohn R L. Overview of the TECSAR satellite hardware and Mosaic mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 423–426.
- [6] Zhang Y, Yu Z, and Li C. Effects of PRF variation on spaceborne SAR imaging[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Melbourne, VIC, Australia, 2013: 1336–1339.
- [7] Gebert N and Krieger G. Ultra-wide swath SAR imaging with continuous PRF variation[C]. *EUSAR*, Aachen, Germany, 2010: 966–969.

- [8] Villano M, Krieger G, and Moreira A. Staggered SAR: high-resolution wide-swath imaging by continuous PRI variation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4462-4479.
- [9] Luo X, Wang R, Xu W, et al. Modification of multichannel reconstruction algorithm on the SAR with linear variation of PRI[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 3050-3059.
- [10] Yen J L. On nonuniform sampling of bandwidth-limited signals[J]. *IRE Transactions on Circuit Theory*, 1956, 3(4): 251-257.
- [11] Munson D C Jr., O'Brien J D, and Jenkins W K. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(8): 917-925.
- [12] Soumerai M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms[M]. New York, MA, USA: A Wiley-Interscience Publication, 1999.

### 作者简介



罗绣莲(1987-), 女, 四川广安人, 博士研究生, 研究方向为高分宽幅合成孔径雷达信号处理。

徐伟(1984-), 副研究员, 研究方向为新体制合成孔径雷达系统设计及信号处理。

郭磊(1988-), 博士研究生, 研究方向为高分宽幅星载合成孔径雷达系统设计。