

## 基于方位相位编码的脉内聚束SAR成像方法

吴玉峰<sup>\*①</sup> 叶少华<sup>①</sup> 冯大政<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 214063)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 脉内聚束模式有效克服了星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)高分辨率与宽测绘带之间的矛盾,同时可以兼顾回波的信噪比。然而距离维空域滤波的信号分离方法容易受地形起伏的影响,甚至失效。针对此,该文提出了一种结合方位相位编码(Azimuth Phase Coding, APC)的脉内聚束SAR成像方法,利用APC技术使不同子脉冲回波的方位频谱处在不同的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequencies, PRF)范围,然后利用方位自适应波束形成技术来分离回波信号。文中对信号分离方法以及频移因子的选择进行了详细的讨论。最后仿真实验结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 脉内聚束模式; 方位相位编码; 方位多通道; 信号分离

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)04-0437-09

DOI: 10.12000/JR17114

**引用格式:** 吴玉峰, 叶少华, 冯大政. 基于方位相位编码的脉内聚束SAR成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 437-445. DOI: 10.12000/JR17114.

**Reference format:** Wu Yufeng, Ye Shaohua, and Feng Dazheng. Intra-pulse spotlight SAR imaging method based on azimuth phase coding[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 437-445. DOI: 10.12000/JR17114.

## Intra-pulse Spotlight SAR Imaging Method Based on Azimuth Phase Coding

Wu Yufeng<sup>①</sup> Ye Shaohua<sup>①</sup> Feng Dazheng<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

<sup>②</sup>(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The intra-pulse spotlight imaging mode can effectively overcome the contradiction between high resolution and wide swath in spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR), and considers the echo's signal-to-noise ratio. However, signal division by spatial filtering along the range direction may be impacted by fluctuating terrain. To solve this problem, a novel intra-pulse spotlight imaging method based on Azimuth Phase Coding (APC) is proposed in this paper. Using APC, the azimuth spectrum of echo data from different sub-pulses will locate in different Pulse Repetition Frequencies (PRF). As such, the signal can be divided using an azimuth adaptive beamforming technique. The signal separation method and selection of the shift factor are discussed in detail. Finally, simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Intra-pulse spotlight mode; Azimuth Phase Coding (APC); Azimuth multi-channel; Signal division

### 1 引言

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)由于受到最小天线面积的限制<sup>[1]</sup>,方位高分辨

率与距离宽测绘带构成一对矛盾,常规成像模式只在某一方面有所专长。聚束SAR<sup>[2]</sup>和滑动聚束SAR<sup>[3]</sup>的方位分辨率可以很高,但是距离测绘带宽度受限,且方位测绘带也不连续;Scan<sup>[4]</sup>和循序扫描地形观测(Terrain Observation by Progressive Scans, TOPS)模式<sup>[5]</sup>的距离观测范围很广,却是以牺牲方位分辨率为代价的;条带SAR仅可以得到中等的分辨率和测绘带宽度。为了解决高分辨率与宽测绘带之间的矛盾,国内外学者提出了多通道系统体

收稿日期: 2017-11-28; 改回日期: 2018-02-07; 网络出版: 2018-03-19

\*通信作者: 吴玉峰 wyf1176@163.com

基金项目: 航空基金(2015ZC07005)

Foundation Item: The Aeronautical Foundation of China (2015ZC07005)

制,可以分为距离维多通道<sup>[6-8]</sup>和方位维多通道<sup>[9-11]</sup>。然而,常规的多通道系统一般利用子孔径发射宽带线性调频信号,所有通道同时接收场景回波。发射天线面积小,导致场景回波信噪比低,可能无法满足成像要求。

为同时兼顾方位分辨率、距离测绘带宽与回波信噪比,德国学者Krieger等人<sup>[12]</sup>提出了结合数字波束形成技术的多维波形编码SAR成像体制。受其启发,武其松等人<sup>[13]</sup>提出了一种被称为脉内聚束SAR的工作模式。将长脉冲分割为多个子脉冲信号,并在不同子脉冲时间内扫描方位场景获得长合成孔径从而实现方位高分辨率,且场景足迹类似于条带模式;同时采用低脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)获得宽测绘带;对于由脉内扫描导致的距离模糊,文献<sup>[13]</sup>中采用俯仰维多孔径接收回波并利用空域滤波方法进行有效分离。然而,该方法存在以下不足:(1)方位和俯仰均为多通道体制,系统结构复杂;(2)方位向全孔径接收,波束较窄,将无法接收到被照射场景的所有回波;(3)距离解模糊性能容易受到成像场景地形起伏的影响。

实际上,脉内聚束SAR各个子脉冲回波对应的斜视角是不同的,其多普勒频谱存在相应的偏移,这给予脉冲回波信号的分离提供了可能。然而在实际的星载SAR系统中,系统采用的PRF一般仅稍高于回波的瞬时多普勒带宽,这会造成子脉冲回波信号多普勒频谱出现折叠现象。此外,为了对相同子场景不同斜视角下的回波进行有效拼接,各个子多普勒频谱之间通常会存在一定的重合。因此,对于脉内聚束SAR,将不能仅依靠各自斜视角产生的频移来分离子脉冲回波。

针对上述问题,本文提出了一种结合方位相位编码(Azimuth Phase Coding, APC)技术<sup>[14,15]</sup>的方位多通道脉内聚束SAR成像方法。发射信号时利用不同子脉冲时间内扫描不同的方位子场景,并且对各个子脉冲信号进行相位编码,使其对应的回波多普勒频谱产生额外的偏移。接收信号时将方位全孔

径分割为多个子孔径同时接收场景回波,然后利用方位多通道提供的系统自由度对模糊信号进行分离。相比于文献<sup>[13]</sup>,本文方法俯仰向无需多通道,系统结构更为简单;方位宽波束接收,可以有效接收所有子场景的回波;并且方位多通道信号分离性能也不易受地形起伏的影响。因此,本文方法具有更高的应用价值。

本文安排如下:第2节对方位多通道脉内聚束SAR的工作几何及回波信号特性进行了分析;第3节引入APC技术对发射子脉冲信号进行编码,并对空域自适应滤波方法进行改进,用以分离各个子场景的回波;第4节详细讨论了频移因子的选择;第5节给出了仿真实验结果,验证了所提方法的有效性;第6节对全文进行了总结。

## 2 方位多通道脉内聚束SAR

### 2.1 工作几何模型

如图1所示为方位多通道脉内聚束SAR发射和接收信号的工作几何。雷达平台高度为 $H$ ,以速度 $v$ 沿 $X$ 轴方向匀速直线运动。发射信号时,系统将长脉冲信号分割为多个子脉冲,并在不同子脉冲时间内控制天线波束指向不同的方位子场景,如图1(a)所示,图中以方位向3个子场景为例。接收信号时,将天线方位孔径分割为多个子孔径同时接收场景回波,如图1(b)。子孔径对应宽波束,因此,可以接收到所有被照射场景的回波信号。对于场景中的任意点目标,都将依次被3个雷达波束照射,通过适当的波束指向控制以及信号处理,其合成孔径长度可近似扩大3倍,对应的方位分辨率也将近似提高3倍。由于发射信号时方位孔径不需要进行分割,发射天线面积增大,有利于提高回波的信噪比。并且大方位孔径对应小瞬时多普勒带宽,系统采用低PRF采样就可以获得不模糊的方位频谱,因此可以实现宽测绘带成像。综上所述,方位多通道脉内聚束SAR不仅可以保持常规多通道SAR系统的高分辨宽测绘带成像能力,而且还克服了孔径分割引起的发射天线面积减小的缺陷。

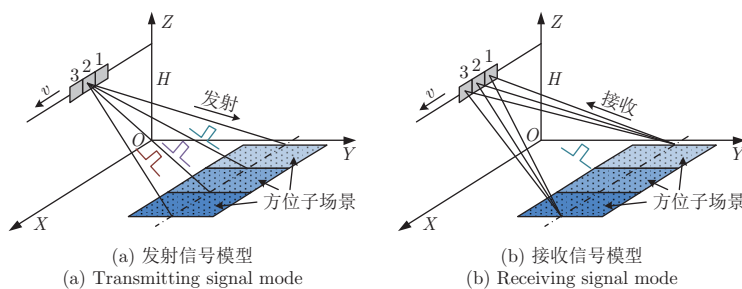


图 1 方位多通道脉内聚束SAR收发信号模型

Fig. 1 Transmitting and receiving signal modes of azimuth multi-channel intra-pulse spotlight SAR

然而, 正如文献[13]中的分析, 脉内聚束模式将导致不同方位子场景的回波信号重叠在一起, 从而引起距离模糊。为了解决该问题, 有必要对脉内聚束SAR的信号特性进行分析。

## 2.2 回波信号分析

假设雷达系统将长脉冲信号分割为 $L$ 个子脉冲, 在第 $l$ 个子脉冲时间内, 大孔径天线扫描第 $l$ 个子场景, 发射信号为:

$$s_l(\hat{t}, t_a) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \Delta T_l}{T_\Delta}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c(t - \Delta T_l) + j\pi\gamma(\hat{t} - \Delta T_l)^2\right) \quad (1)$$

式中,  $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & |x| > 1/2 \end{cases}$ ,  $\hat{t}$ 为距离快时间,  $t_a$ 为方位慢时间,  $\Delta T_l = (l-1)T_\Delta$ 为第 $l$ 个子脉冲的发射时延,  $T_\Delta$ 为子脉冲的时间宽度,  $f_c$ 为雷达载频,  $\gamma$ 为发射信号的调频斜率,  $t = \hat{t} + t_a$ 为全时间。

根据等效相位中心原理[16], 对于单平台多通道SAR系统由于其方位基线较短, 通过补偿一个常数相位之后, 各个通道接收的回波可以认为是在等效相位中心处自发自收。如果没有特殊说明, 本文中提到的相位中心都是经过等效处理之后的相位中心。假设方位向共有 $M$ 个接收通道, 并令 $M$ 为奇数, 则第 $m$ 个通道接收到的第 $l$ 个子场景中点目标 $P$ 的基频回波可以表示为:

$$s_{m,l}(\hat{t}, t_a) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \Delta T_l - 2R_m(t_a)/c}{T_\Delta}\right) w_a\left(\frac{t_a - t_c}{T_a}\right) \cdot \exp\left(j\pi\gamma\left(\hat{t} - \Delta T_l - \frac{2R_m(t_a)}{c}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_c\left(\Delta T_l + \frac{2R_m(t_a)}{c}\right)\right) \quad (2)$$

式中,  $c$ 为电磁波传播速度,  $t_c$ 为雷达波束中心穿越 $P$ 点的时刻,  $w_a(\cdot)$ 为方位窗函数。  $R_m(t_a)$ 为第 $m$ 通道等效相位中心到点目标的瞬时斜距, 根据图2所示的斜距平面几何关系,  $R_m(t_a)$ 可以写为:

$$R_m(t_a) = \sqrt{(vt_a + d_m - vt_c)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_a + d_m - vt_c)\sin\theta_l} \quad (3)$$

式中,  $\theta_l$ 为第 $l$ 个波束的中心斜视角,  $d_m$ 为第 $m$ 通道到参考通道的距离, 若以中间通道为参考, 则

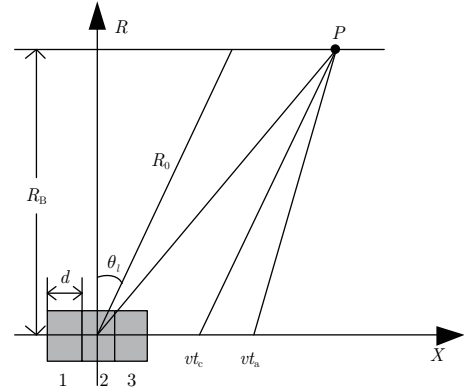


图2 斜距平面成像几何

Fig. 2 Imaging geometry in the slant-range plane

$d_m = \frac{d}{2}\left(m - \frac{M+1}{2}\right)$ , 其中 $d$ 为子孔径方位向长度。

$R_0 = \frac{R_B}{\cos\theta_l}$ ,  $R_B$ 为雷达到点目标的最近距离。

将信号变换到2维频域, 采用驻定相位原理[17], 可得:

$$S_{m,l}(f_r, f_a) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) W_a\left(\frac{f_a - f_{dc}}{B_a}\right) \cdot \exp\left(-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right) \exp\left(-j2\pi(f_r + f_c)\Delta T_l\right) \cdot \exp\left(j2\pi\frac{d_m}{v}f_a\right) \cdot \exp\left(-j4\pi R_0 \cos\theta_l \sqrt{\left(\frac{f_r + f_c}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi}{v}f_a(vt_c + R_0 \sin\theta_l)\right) \quad (4)$$

式中,  $f_r$ 为距离频率,  $f_a$ 为方位频率,  $B$ 为发射子脉冲信号的带宽,  $B_a$ 为子场景回波的方位瞬时多普勒带宽,  $f_{dc} = \frac{2v \sin\theta_l}{\lambda}$ 为子场景回波对应的多普勒中心。

由上述分析可知, 对于不同的方位子场景, 其回波方位信号的时频关系如图3所示, 图中以方位向3个子场景为例。由于对边缘子场景进行观测时存在小斜视角, 其方位频谱存在对应的偏移。当系统PRF较高时, 时频关系如图中粗虚线所示, 在空时平面里为一直线。然而在实际系统中, 为了实现宽测绘带成像, 系统PRF通常只是略高于方位子场景回波的瞬时多普勒带宽, 此时边缘子场景的方位频谱将发生折叠, 如图中粗实线所示。此外, 对于脉内聚束SAR, 频谱连接区(如图中椭圆区域)通常会存在频谱重合, 无论采用多通道波束形成技术还是多普勒带通滤波方法都不能分离重合区域的信号。

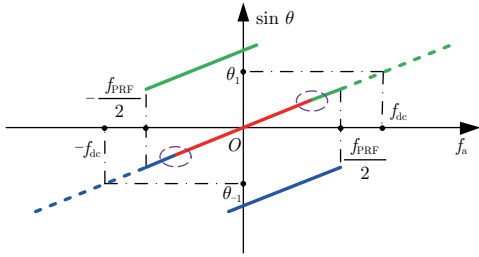


图3 不同方位子场景回波信号的时频关系

Fig. 3 Time-frequency relation of different azimuth sub-scene echo signal

为了对信号进行有效分离, 下一节将引入APC技术, 使方位边缘子场景回波附加额外的多普勒偏移, 从而消除频谱重合, 然后对信号分离方法进行详细地讨论。

### 3 结合APC技术的信号分离方法

#### 3.1 APC技术

APC技术最初被用在单通道SAR系统中分离距离模糊, 其主要分为发射信号相位编码调制、接收信号解调以及模糊区回波信号抑制3个步骤<sup>[14]</sup>。通过APC调制相位的选择, 使不同距离模糊区回波信号的多普勒频谱产生偏移, 分布在不同的多普勒频带内, 且相互之间没有重叠, 因此能够利用带通滤波方法对距离模糊进行良好的分离。本文利用上述特点, 采用APC技术对各发射子脉冲信号进行相位编码, 使方位子场景回波的多普勒频谱产生额外的频移, 从而避免频谱重合。

对于方位多通道脉内聚束SAR, 假设系统共发射 $L$ 个子脉冲信号照射 $L$ 个方位子场景, 并且假设 $L$ 为奇数, 则第 $l$ 个子脉冲信号对应的APC调制相位可以表示为:

$$\varphi_{\text{mod}}(l, k) = -\frac{\pi}{N}(k-l)^2 \quad (5)$$

式中,  $k$ 为发射脉冲数,  $N$ 为方位频移因子,  $N$ 的选择将在后面进行详细讨论。因此, 第 $l$ 个子脉冲信号发射波形为:

$$s'_l(\hat{t}, t_a) = s_l(\hat{t}, t_a) \exp(j\varphi_{\text{mod}}(l, k)) \quad (6)$$

接收到场景回波后, 首先对回波信号进行APC解调, 此时我们希望解调后中间子场景的回波信号不会产生附加的多普勒频移, 因此APC解调相位为:

$$\varphi_{\text{dem}}(k) = \frac{\pi}{N} \left( k - \frac{L+1}{2} \right)^2 \quad (7)$$

经过相位调制与解调之后, 第 $l$ 个子场景回波信号的剩余调制相位可以表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{res}}(l, k) &= \varphi_{\text{mod}}(l, k) + \varphi_{\text{dem}}(k) \\ &= 2\pi \frac{f_{\text{PRF}}}{N} \left( l - \frac{L+1}{2} \right) t_a \\ &\quad - \frac{\pi}{N} \left( l^2 - \left( \frac{L+1}{2} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $f_{\text{PRF}}$ 为系统PRF。式(8)中第2个等式第1项为方位慢时间 $t_a$ 的1次项, 这意味着经过方位相位调制与解调之后, 回波信号存在多普勒频移现象, 且第 $l$ 个子场景回波的多普勒频移为 $\frac{f_{\text{PRF}}}{N} \left( l - \frac{L+1}{2} \right)$ ; 第2项为常数相位项, 在子多普勒频谱拼接时需要进行补偿。图4为引入APC技术后不同方位子场景回波方位信号的时频关系。可见频谱之间已经不存在重合区域, 并且通过选择合适的频移因子 $N$ , 也可以避免频谱折叠。此时就可以对各方位子场景的回波信号进行有效分离, 具体方法将在下一小节详细介绍。

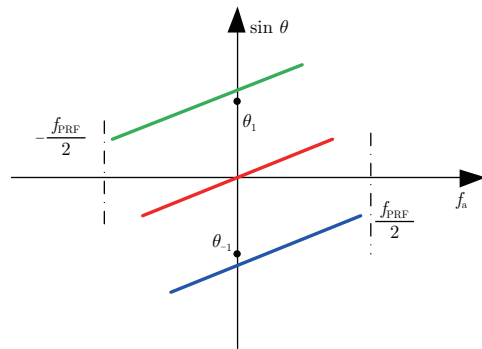


图4 引入APC技术后的时频关系

Fig. 4 Time-frequency relation after adopting the APC technique

#### 3.2 信号分离方法

由图4的时频关系可以看出, 虽然信号在方位频域混叠在一起, 然而在空间角度域却是可分的, 这与常规方位多通道SAR系统的多普勒频谱模糊性质类似, 因此我们可以借鉴多通道解模糊的方法对信号进行分离。参考文献<sup>[18]</sup>中基于多个多普勒方向约束的解模糊方法, 为了提取第 $l$ 个子场景的回波, 构造最优准则为:

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_l} \mathbf{W}_l^H(f_a) \mathbf{R}(f_a) \mathbf{W}_l(f_a) \\ \text{s.t. } \mathbf{W}_l^H(f_a) \mathbf{C}(f_a) = \mathbf{Q}^H \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中,  $[\cdot]^H$ 表示向量共轭转置,  $\mathbf{R}(f_a) = \mathbf{E}[\mathbf{S}(f_a) \cdot \mathbf{S}^H(f_a)]$ 为多普勒频率单元 $f_a$ 对应的统计协方差矩阵, 可以从采样数据中估计得到,  $\mathbf{E}[\cdot]$ 表示统计期望,  $\mathbf{S}(f_a) = [S_1(f_a) \ S_2(f_a) \ \cdots \ S_M(f_a)]^T$ 为方位多通道SAR系统的输出向量,  $[\cdot]^T$ 表示向量转置。此外, 式(9)中 $\mathbf{Q} = [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_L]^T$ 为 $L \times 1$



维列向量, 其中  $h_l = 1, h_{i \neq l} = 0$ 。  $\mathbf{C}$  为  $M \times L$  维矩阵, 可以表示为:

$$\mathbf{C}(f_a) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1(f_a) & \mathbf{a}_2(f_a) & \cdots & \mathbf{a}_L(f_a) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,

$$\mathbf{a}_l(f_a) = \left[ \exp\left(j2\pi \frac{d_1}{v} f_a^l\right) \exp\left(j2\pi \frac{d_2}{v} f_a^l\right) \cdots \exp\left(j2\pi \frac{d_M}{v} f_a^l\right) \right]^T \quad (11)$$

式中,  $f_a^l = f_a + l \cdot \left(f_{\text{PRF}} - \frac{f_{\text{PRF}}}{N}\right)$ ,  $-\frac{f_{\text{PRF}}}{2} \leq f_a \leq \frac{f_{\text{PRF}}}{2}$ 。式(9)所示优化问题的最优解为:

$$\mathbf{W}_l^{\text{opt}}(f_a) = \mathbf{R}^{-1}(f_a) \mathbf{C}(f_a) \cdot (\mathbf{C}^H(f_a) \mathbf{R}^{-1}(f_a) \mathbf{C}(f_a))^{-1} \mathbf{Q} \quad (12)$$

得到最优权矢量后, 对于多普勒频率单元  $f_a$ , 从方位多通道SAR回波中提取第  $l$  个子场景信号分量的过程可以表示为:

$$S_l(f_a) = \left[ \mathbf{W}_l^{\text{opt}}(f_a) \right]^H \cdot \mathbf{S}(f_a) \quad (13)$$

需要注意的是, 若要对所有子场景回波信号进行有效分离, 需要保证方位向通道数不低于子脉冲个数, 也即  $M \geq L$ 。完成信号的分离后, 对各个子脉冲回波补偿由APC引入的常数相位项, 并根据子脉冲的相对时延进行距离向对齐, 之后就可以进行多普勒频谱的拼接了。完成频谱拼接后, 可以采用常规的成像算法, 比如距离多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA)、线频调变标算法(Chirp Scaling Algorithm, CSA)、距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)等<sup>[17]</sup>, 完成数据的聚焦成像。

#### 4 频移因子的选择

由3.1节可知, APC技术引入的多普勒频移与因子  $N$  有关, 为了消除各个子场景回波多普勒频谱的重合并避免频谱折叠, 简化信号分离过程, 我们需要合理选择  $N$  值。下面将对  $N$  的取值进行分析。

由于各个子脉冲回波的频移具有规律性, 因此可以只取某一个子脉冲信号来分析, 这里以中间子脉冲的后续子脉冲为例。对于该子脉冲, 回波信号的多普勒中心为  $f_{\text{dc}}$ , APC技术引入的额外频移量为  $\frac{f_{\text{PRF}}}{N}$ 。为了达到上述目的, 我们希望该子脉冲回波的频谱偏出基频范围, 并且落在一个整的PRF之内, 用表达式可以写为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{\text{PRF}}}{2} < f_{\text{dc}} + \frac{f_{\text{PRF}}}{N} - \frac{B_a}{2} \\ f_{\text{dc}} + \frac{f_{\text{PRF}}}{N} + \frac{B_a}{2} < \frac{3}{2} \cdot f_{\text{PRF}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

也即

$$\frac{2 \cdot f_{\text{PRF}}}{3 \cdot f_{\text{PRF}} - 2f_{\text{dc}} - B_a} < N < \frac{2 \cdot f_{\text{PRF}}}{f_{\text{PRF}} - 2f_{\text{dc}} + B_a} \quad (15)$$

考虑到频谱边缘的吉布斯效应, 为了获得最好的信号分离效果, 需要子场景频谱也处于中间位置, 因此, 总的频移量为PRF, 频移因子的最优选择为:

$$N = \frac{f_{\text{PRF}}}{f_{\text{PRF}} - f_{\text{dc}}} \quad (16)$$

#### 5 仿真实验

为了验证本文所提结合APC技术的方位多通道脉内聚束SAR成像方法的有效性, 本节进行了仿真实验。仿真参数借鉴了德国TerraSAR-X的系统参数, 具体如表1所示。

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值
雷达载频(GHz)	9.65	方位孔径(m)	4.8
脉冲总时宽( $\mu\text{s}$ )	30	脉冲重复频率(Hz)	3600
子脉冲信号带宽(MHz)	150	场景中心距离(km)	596
采样频率(MHz)	180	子脉冲个数	3
平台速度(m/s)	7200	方位通道数	3

由表1的仿真参数计算可知, 子场景回波信号的瞬时多普勒带宽为3000 Hz, 为了对回波频谱进行有效的合成, 仿真实验中设置边缘子场景的多普勒谱偏移分别为-2900 Hz和2900 Hz。方位子场景数为3, 在每个子场景中分别布置1个单点目标, 高度分别为0 m, 2000 m以及0 m, 并且满足距离模糊条件。得到原始回波后, 在每个通道信号中加入高斯白噪声, 信噪比为-10 dB。如图5(a)与图5(b)为没有引入APC技术的某一通道的回波信号及其方位频谱。可见3个点目标的回波重叠在了一起, 并且由于系统PRF略高于子场景回波的瞬时多普勒带宽, 频谱存在折叠现象。选择频移因子  $N = 5.2$  时, 经过相位调制与解调后同一通道回波信号的方位频谱如图5(c)所示。可以看出, 由于APC技术使边缘子场景回波信号产生了额外的频移, 其多普勒谱已经不存在折叠现象, 并且与中间子场景的多普勒谱混叠在一起。

为了突出本文方法相比于文献[13]方法的优势, 图6和图7分别给出了采用两种方法的信号分离结果。由于子场景2中点目标存在高度, 采用文献[13]俯仰维空域滤波方法分离信号时波束零点不能正确导向该目标, 因此, 提取出的子场景1和子场景3的信号中依然存在子场景2目标信号的部分残

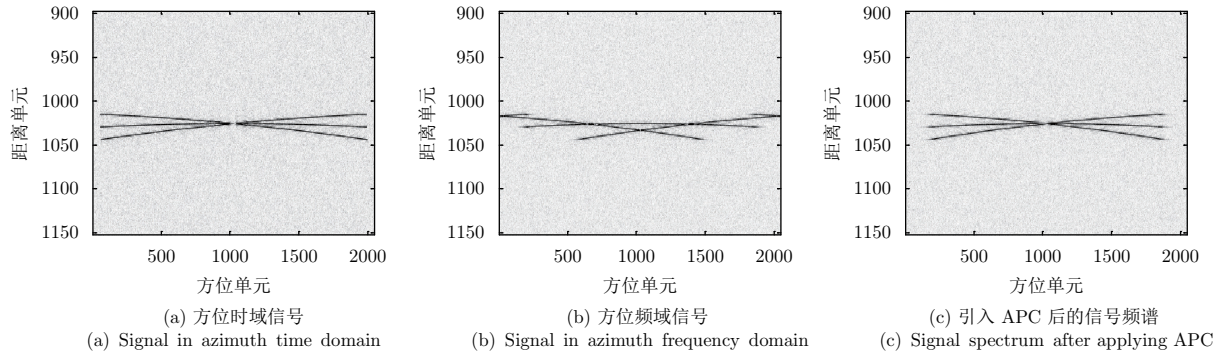


图5 某一通道的回波信号及其频谱

Fig. 5 Echo signal and spectrum of one channel

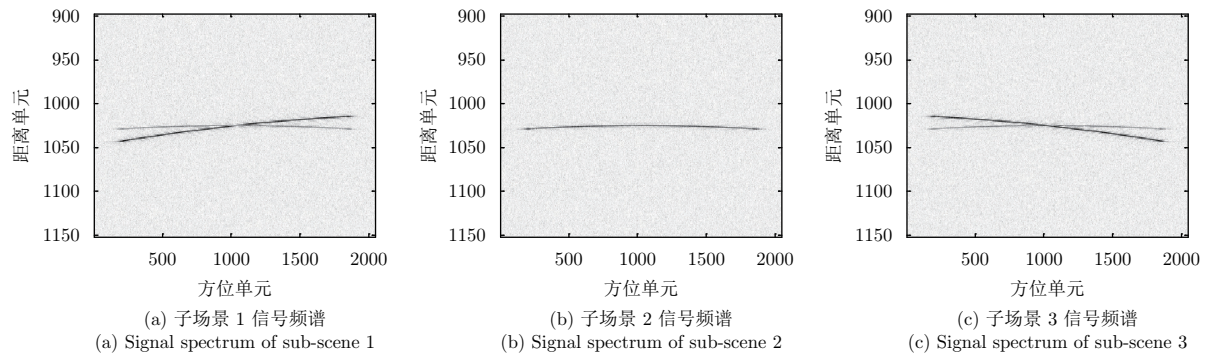


图6 文献[13]方法信号分离结果

Fig. 6 Signal division results by the method in Ref. [13]

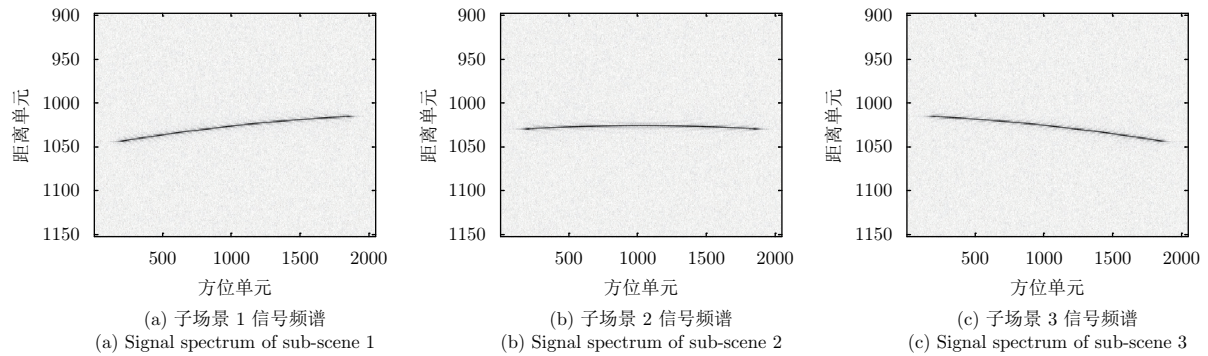


图7 本文方法信号分离结果

Fig. 7 Signal division results by the method in the paper

留。提取子场景2信号时，波束零点虽然可以正确导向其他两个点目标，然而波束并不能正确指向其自身位置，因此，虽然可以分离出信号，但是信号的幅度将会下降。采用本文方法的信号分离结果如图7所示。由于本文方法依据的是信号的方位角度信息，受地形起伏的影响很小，因此，仿真实验中虽然设置了点目标的高度，但是采用本文方位多通道体制结合自适应波束形成方法依然可以实现信号的有效分离。该实验说明，相比于文献[13]，本文方法在信号分离方面具有明显的优势。

分离出不同子场景的回波信号后，由于子场景

1, 2, 3分别对应后斜视、正侧视和前斜视，它们的多普勒中心不同。并且对于场景中某一特定点目标，它将依次被各个波束照射，因此，我们可以将各子场景的多普勒谱进行拼接得到宽多普勒谱，如图8(a)所示。对宽多普勒谱数据进行常规成像处理，可以得到高分辨率的成像结果，如图8(b)所示。从图中可以看出，点目标成像结果在距离向和方位向都是较为理想的sinc函数。为了定量分析成像效果，表2对成像性能参数进行了统计。其中PSLR为峰值旁瓣比，ISLR为积分旁瓣比。可以看出，成像性能参数与理论值接近，表明成像效果良好。



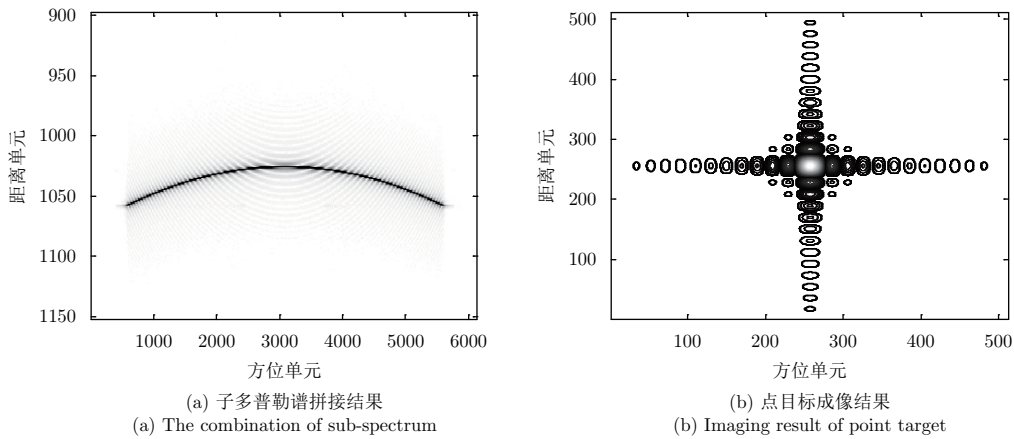


图8 完整的多普勒频谱以及成像结果

Fig. 8 Imaging result of the combined complete Doppler spectrum

表2 成像性能参数统计

Tab. 2 Parameters of the focused targets

距离向		方位向	
PSLR (dB)	-13.28	PSLR (dB)	-13.28
ISLR (dB)	-9.67	ISLR (dB)	-9.81
分辨率 (m)	1.0087	分辨率 (m)	0.8157

为了进一步验证所提方法的有效性，下面进行面目标仿真实验。仿真参数同前，设置中间子场景原始图如图9(a)所示。得到仿真数据后，直接对中间子场景的子脉冲回波进行成像处理，其结果如图9(b)所示(为保持采样率一致，方位向进行了3倍

升采样)，可见由于模糊信号的存在，已无法分辨场景内的目标。采用所提信号分离方法完成信号分离后的成像结果如图9(c)所示(同样地，方位向进行了3倍升采样)，可见模糊能量已经得到了有效抑制，成像结果清晰。最后对中间子场景的回波多普勒频谱进行拼接并完成成像，结果如图9(d)所示，与图9(c)相比，方位分辨率明显提高。由上我们可以得出结论，即本文所提基于APC技术的方位多通道脉内聚束SAR成像方法确实是可行的。

## 6 结论

脉内聚束模式可以实现星载SAR高分辨宽测绘带成像，同时兼顾了回波的信噪比问题。然而2维

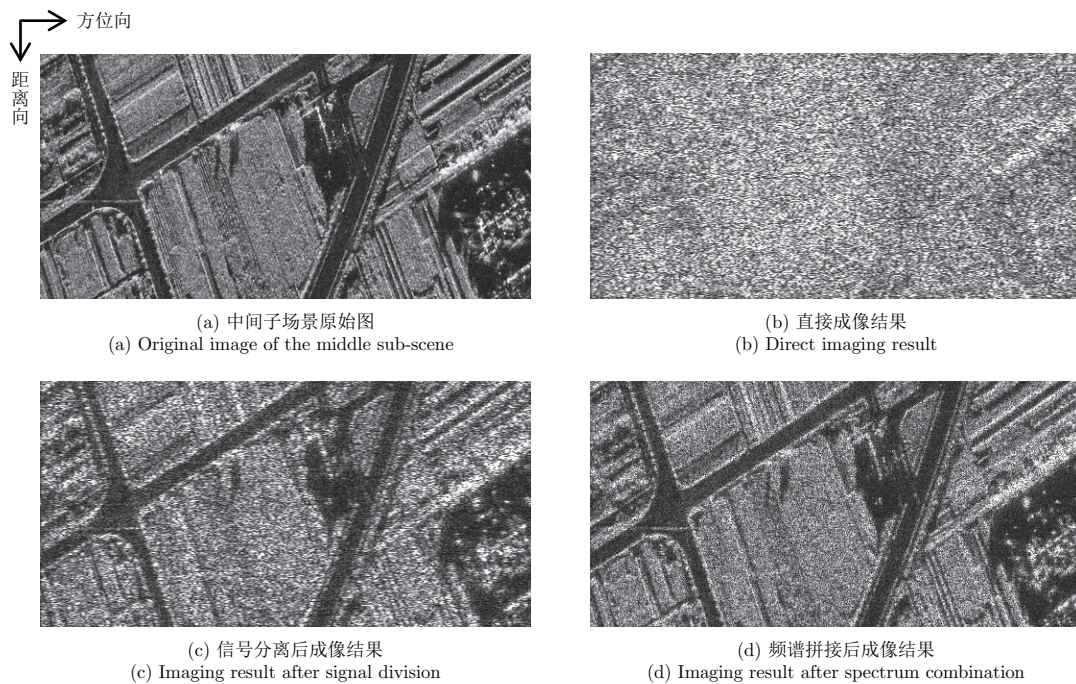


图9 面目标仿真结果

Fig. 9 Simulation results of area target

多通道系统体制结构复杂,而且方位向全孔径接收时波束较窄,将无法接收到所有被照射场景的回波,此外,俯仰维空域滤波解模糊方法容易受地形起伏的影响。针对此,本文提出了一种结合APC技术的方位多通道脉内聚束SAR成像方法。引入APC技术,使不同子场景回波的方位频谱处在不同的PRF范围,并且没有频谱折叠现象。然后利用方位空域波束形成技术分离各个子脉冲的回波。文中对所提方法的回波信号特性、信号分离方法以及频移因子的选择等进行了详细的介绍。最后,仿真实验结果验证了所提方法的有效性。

### 参 考 文 献

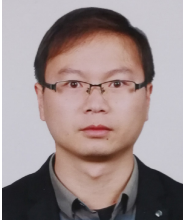
- [1] Freeman A, Johnson W T K, Huneycutt B, *et al.* The “Myth” of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320–324. DOI: [10.1109/36.823926](https://doi.org/10.1109/36.823926).
- [2] Fan B, Qin Y L, You P, *et al.* An improved PFA with aperture accommodation for widefield spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 3–7. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2322858](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2322858).
- [3] Wu Y, Sun G C, Yang C, *et al.* Processing of very high resolution spaceborne sliding spotlight SAR data using velocity scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(3): 1505–1518. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2481923](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2481923).
- [4] Li N, Wang R, Deng Y K, *et al.* Improved full-aperture ScanSAR imaging algorithm based on aperture interpolation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(5): 1101–1105. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2384594](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2384594).
- [5] Meta A, Mittermayer J, Prats P, *et al.* TOPS imaging with TerraSAR-X: Mode design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759–769. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2026743](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2026743).
- [6] Callaghan G D and Longstaff I D. Wide-swath space-borne SAR and range ambiguity[C]. Radar 97, Edinburgh, UK, 1997: 248–252.
- [7] 李杨, 黄杰文, 禹卫东. 高分辨率宽测绘带星载SAR距离向DBF处理[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1510–1514. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2010.01157](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01157).  
Li Yang, Huang Jie-wen, and Yu Wei-dong. Range DBF processing for high-resolution wide-swath spaceborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1510–1514. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2010.01157](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01157).
- [8] Wang W, Wang R, Deng Y K, *et al.* Improved digital beam-forming approach with scaling function for range multi-channel synthetic aperture radar system[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 379–385.
- [9] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEEE Proceedings F-Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 122–135. DOI: [10.1049/ip-f-2.1992.0016](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0016).
- [10] Liu B C and He Y J. Improved DBF algorithm for multichannel high-resolution wide-swath SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1209–1225. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2476496](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2476496).
- [11] Li X S, Xing M D, Xia X G, *et al.* Simultaneous stationary scene imaging and ground moving target indication for high-resolution wide-swath SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4224–4239. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2538564](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2538564).
- [12] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31–46. DOI: [10.1109/TGRS.2007.905974](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905974).
- [13] 武其松, 邢孟道, 刘保昌, 等. 脉内聚束SAR方位高分辨率宽测绘带成像[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 676–682, 699. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2010.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2010.04.017).  
Wu Qi-song, Xing Meng-dao, Liu Bao-chang, *et al.* High azimuth resolution wide swath imaging based on the intrapulse spotlight SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(4): 676–682, 699. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2010.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2010.04.017).
- [14] Dall J and Kusk A. Azimuth phase coding for range ambiguity suppression in SAR[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, USA, 2004, 3: 1734–1737.
- [15] 郭磊, 王宇, 邓云凯, 等. 基于方位向相位编码技术的方位向多通道SAR距离模糊抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 601–606. DOI: [10.11999/JEIT140707](https://doi.org/10.11999/JEIT140707).  
Guo Lei, Wang Yu, Deng Yun-kai, *et al.* Range ambiguity suppression for multi-channel SAR system using azimuth phase coding technique[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 601–606. DOI: [10.11999/JEIT140707](https://doi.org/10.11999/JEIT140707).
- [16] 邢孟道, 李真芳, 保铮, 等. 分布式小卫星雷达空时频成像方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(S1): 70–76, 82. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1328.2005.z1.014](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1328.2005.z1.014).  
Xing Meng-dao, Li Zhen-fang, Bao Zheng, *et al.* Study of distributed microsatellites radar space-time-frequency imaging method[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(S1): 70–76, 82. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1328.2005.z1.014](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1328.2005.z1.014).
- [17] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.



- [18] Zhang S X, Xing M D, Xia X G, *et al.* Multichannel HRWS SAR imaging based on range-variant channel calibration and multi-Doppler-direction restriction ambiguity

suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4306–4327. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2281329](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281329).

### 作者简介



吴玉峰(1985–), 男, 浙江衢州人, 博士, 工程师。现为中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所系统工程师, 主要研究方向为SAR系统设计、SAR成像算法。

E-mail: wyf1176@163.com



冯大政(1959–), 男, 陕西安康人, 教授, 博士生导师。现为西安电子科技大学电子工程学院二级教授, 主要研究方向为雷达信号处理、类神经网络和图像处理等。

E-mail: dzfeng@xidian.edu.cn



叶少华(1966–), 男, 江苏江阴人, 研究员, 副总工程师。现为中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所副总工程师, 主要研究方向为雷达系统设计、雷达信号处理。

E-mail: ye\_shaohua@sina.com