

## 星/机双基地混合滑动聚束式 SAR 距离-多普勒成像算法

周 芳\* 孙光才 邢孟道 唐 禹 保 铮

(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:** 该文提出了星/机双基地混合滑动聚束式 SAR 的距离-多普勒成像算法。文中首先通过级数反演法得到了此双基构型下场景目标的 2 维频谱, 并通过解析近似得到随距离空变的频谱表达。在此基础上, 提出了先根据谱分析技术对回波信号进行方位去混叠处理, 再进行 2 维频域处理得到全孔径聚焦的双基地 SAR 距离-多普勒成像算法。该算法不需要进行子孔径分块和插值操作, 运算量小, 效率高。最后通过仿真实验验证了算法的有效性。

**关键词:** 双基地合成孔径雷达; 滑动聚束; 谱分析; 距离多普勒成像算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-1851-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01440

## Spaceborne/Airborne Hybrid Sliding Spotlight Bistatic SAR Range-Doppler Imaging Algorithm

Zhou Fang Sun Guang-cai Xing Meng-dao Tang Yu Bao Zheng

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A new range-Doppler imaging algorithm is presented for processing bistatic Synthetic Aperture Radar (SAR) data acquired in the hybrid spaceborne/airborne sliding spotlight SAR configuration. This paper firstly presents the 2-D point target spectrum by using the series reversion, and then analyses the spectrum with the space-variant in range. Based on the previous discussions, the algorithm overcomes the spectrum folding of the azimuth raw signal with a SPECTral ANALYSIS (SPECAN) process, and focuses the full image in the Doppler domain. Without sub-aperture and interpolation, this algorithm is great in computational efficiency. Simulation results confirm the validity of the imaging algorithm.

**Key words:** Bistatic SAR; Sliding spotlight; SPECTral ANALYSIS (SPECAN); Range-Doppler Algorithm (RDA)

### 1 引言

在各种双基地 SAR 组合形式中, 卫星发射、飞机接收的星/机双基地 SAR 因其作用距离远、发射功率小、覆盖范围广、发射机安全、接收机隐蔽的特点<sup>[1]</sup>, 相对其他双基地 SAR 组合更具有实用性。由于星/机构型下, 收发平台存在很大的斜距差异和速度差异, 为了在地面得到尽可能大的波束重合区域, 收发轨道多设置为相互平行, 且发射天线工作在滑动聚束模式<sup>[2]</sup>, 接收天线工作在逆滑动聚束模式<sup>[3]</sup>。

在双基地 SAR 中, 由于双程斜距的双根号问题, 难以直接应用驻定相位原理<sup>[4]</sup>求解目标的 2 维频谱。文献[5]提出时域逐点匹配法, 该方法可以用于任意双基 SAR, 理论上最优, 但是运算量相当大; 文献[6]提出 LBF(Loffeld's Bistatic Formula)方法,

通过对收发相位历程在各自驻相点处二阶泰勒展开, 然后利用驻相原理得到任意构型下双基地 SAR 点目标 2 维近似频谱; 文献[7]中基于瞬时频率推导得到平行双基 SAR 的点目标 2 维波数域表达, 适用于平移不变构型; 文献[8]提出“级数反演法”来求解任意构型双基地 SAR 点目标的 2 维频谱, 采用高阶逼近可以得到高精度 2 维谱。

滑动聚束式 SAR 通过天线波束的控制, 实现了对方位大场景进行成像, 同时也导致方位信号频谱展宽。如果采用较小的方位脉冲重复采样频率 (PRF), 那么场景边缘目标的频带中心会超过 PRF 的范围, 也就是说全孔径信号在方位上是混叠的。如果设计较大的 PRF, 那么系统的数据量会急剧增加, 导致处理所消耗的时间增长, 而且还会造成距离向的模糊, 限制成像场景的距离尺寸。为了克服类似的频谱混叠问题, SAR 成像处理中主要有子孔径处理<sup>[9-11]</sup>方法, 全孔径处理方法<sup>[12,13]</sup>和宽场景的处理方法<sup>[14,15]</sup>。文献[9]给出了比较经典的子孔径频域变标算法 (FSA)。文献[10]给出了子孔径处理 Extended CS 方法, 对每个子孔径用 CS 算法处理

2010-12-29 收到, 2011-03-16 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和博士学科点专项科研基金(200807010002)资助课题

\*通信作者: 周芳 xdzhoufang@163.com

距离徙动校正 (RCMC)后采用谱分析(SPECAN)方法去信号调制,然后拼接方位点信号实现全频带成像,但这种方法需要较大的 PRF,不利于成像的实时处理。文献[11]给出了子孔径处理方位基带变标(BAS)成像算法,能通过较小的 PRF 实现全方位信号的全分辨率成像,但其分块处理和谱重建非常复杂,会产生严重的数据冗余。文献[12]提出了 Two-step 算法处理聚束数据,先通过 SPECAN 操作进行方位逆滤波去除方位混叠,再用传统条带方法处理,最后在频域进行逆 SPECAN 操作成像。文献[13]是 Two-step 算法在 TOPS SAR 上的应用。文献[14]和文献[15]利用 SPECAN 技术的思想对聚束式 SAR 数据方位解混叠,再用宽场景极坐标格式算法(WPFA),微分多普勒算法(DDA)和 Stolt 极坐标算法(SPA)完成宽场景成像。

虽然星/机双基地混合滑动聚束 SAR 在系统构建上存在很大的挑战,但这种双基地 SAR 组合的优势却越来越明显。国内外已积极开展这种星/机双基地 SAR 的研究。采用 TerraSAR-X 卫星作为发射源、PAMIR 飞机作为接收的星/机双基地 SAR 实验已在 2008 年成功完成,并获得了实测的数据<sup>[16]</sup>。目前,国内外关于星/机双基地混合滑动聚束式 SAR 的研究文章相对较少。文献[17]利用“加权因子”得到推广的 LBF2 维谱,再用波数域算法(WDA)成像,但其成像场景较小仅  $0.4 \times 1.3 \text{ km}^2$ ,且进行了 Stolt 插值运算量较大。

本文首先介绍星/机双基地混合滑动聚束式 SAR 的几何模型,运用级数反演法得到该构型下的点目标的 2 维频谱,接着对双机 2 维频谱的距离空变性进行了分析,并基于 SPECAN 技术解除方位采样率小于场景总带宽时产生的方位频谱混叠,然后在 2 维频域完成距离徙动校正(RCMC)和 2 维聚焦,得到多普勒域中无模糊成像结果,最后通过仿真验证了算法的有效性。

## 2 星/机双基地滑动聚束 SAR 几何模型

本文讨论的星/机双基地混合滑动聚束 SAR 几何模型如图 1 所示。卫星作为发射平台,飞机作为接收平台,收发平台航迹平行<sup>[16]</sup>,且分别以速度  $v_T$  和  $v_R$  匀速飞行。为讨论简单,设收发平台均以正侧视工作,实际中若接收平台存在小斜视角  $\theta_R$ ,那么需相应提高 PRF 以保证方位可解混叠。

以场景中心为原点设立笛卡尔坐标系,  $R_{Tcen}/R_{Rcen}$  分别为发射/接收平台最短斜距,  $H_T/H_R$  分别为发射/接收平台高度,  $R_{Tef}/R_{Ref}$  为旋转中心距,分别表示发射/接收平台到旋转中心的距离。本文中以下标  $T/R$  分别表示发射/接收平台相关参数。

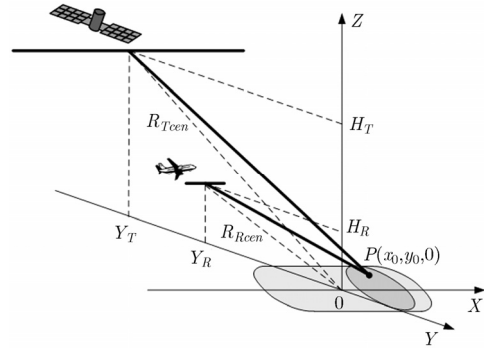


图1 星机滑动聚束 SAR 几何模型

由于  $R_{Tcen} \gg R_{Rcen}$  且  $v_T \gg v_R$ , 需要通过控制发射与接收天线的波束指向,使发射天线工作于滑动聚束模式,而接收天线工作于逆滑动聚束模式,从而均衡得到大小合适的方位成像区域和方位分辨率<sup>[16]</sup>。图 2(a), 2(b)分别为滑动聚束模式和逆滑动聚束模式的示意图。对于滑动聚束模式,滑动系数定义为  $\delta = (R_{Tef} - R_{Tcen})/R_{Tef}$ , 对于逆滑动聚束模式,滑动系数定义为  $\delta = (R_{Ref} + R_{Rcen})/R_{Ref}$ 。

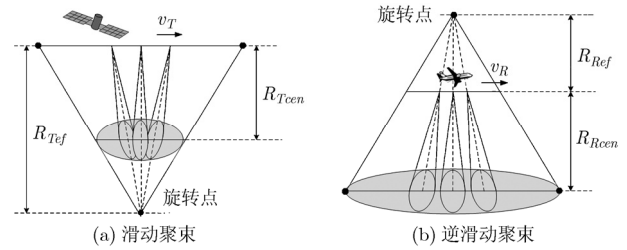


图2 滑动聚束/逆滑动聚束示意图

设场景中任意点目标  $P$  坐标为  $(x_0, y_0, 0)$ ,  $t_a$  为方位慢时间,则发射平台瞬时位置坐标为  $(v_T t_a, -Y_T, H_T)$ , 接收平台瞬时位置坐标为  $(v_R t_a, -Y_R, H_R)$ , 其中  $Y_T = \sqrt{R_{Tcen}^2 - H_T^2}$ ,  $Y_R = \sqrt{R_{Rcen}^2 - H_R^2}$  分别为收发平台对应的地距。点目标  $P$  的斜距历程为

$$R(t_a) = R_T(t_a) + R_R(t_a) \quad (1)$$

其中  $R_R(t_a)$  和  $R_T(t_a)$  分别为收发平台瞬时斜距,有

$$\left. \begin{aligned} R_T(t_a) &= \sqrt{(v_T t_a - x_0)^2 + (Y_T + y_0)^2 + H_T^2} \\ R_R(t_a) &= \sqrt{(v_R t_a - x_0)^2 + (Y_R + y_0)^2 + H_R^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

假设卫星雷达发射线性调频脉冲信号,则接收回波的基频信号可表示为

$$S(\hat{t}, t_a) = w_r \left( \hat{t} - \frac{R(t_a)}{c} \right) w_a(t_a) \cdot \exp \left[ j\pi\gamma \left( \hat{t} - \frac{R(t_a)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{R(t_a)}{\lambda} \right] \quad (3)$$

其中  $\hat{t}$  为距离快时间,  $w_r(\hat{t})$  为发射脉冲包络,  $w_a(t_a)$

为方位包络,由收发系统天线的方向性函数决定, $\gamma$ 为调频率, $c$ 为光速, $\lambda$ 为载波波长。

### 3 星/机双基地混合滑动聚束SAR成像算法

#### 3.1 基于级数反演的2维频谱推导

为了提高成像效率,建立合适的成像算法,需要得到准确的目标2维频谱。NEO在文献[8]中用级数反演法对任意双基地SAR的双程斜距做了泰勒展开分析,本文直接引用其推导结果。设双程斜距泰勒展开后可表示为

$$R(t_a) = k_0 + k_1 t_a + k_2 t_a^2 + k_3 t_a^3 + k_4 t_a^4 + \dots \quad (4)$$

由级数反演法,可以得到回波信息 $S(\hat{t}, t_a)$ 的2维频谱为

$$S(f_r, f_a) = W_r(f_r) W_a(f_a) \exp(j\psi(f_r, f_a)) \quad (5)$$

其中 $f_r$ 和 $f_a$ 分别为 $\hat{t}$ 和 $t_a$ 对应的频域变量,且

$$\begin{aligned} \psi(f_r, f_a) \approx & -2\pi \frac{f_c + f_r}{c} (R_{Tcen} + R_{Rcen}) \\ & + 2\pi \frac{c}{4k_2(f_c + f_r)} \left( f_a + \frac{k_1}{c} (f_c + f_r) \right)^2 \\ & + 2\pi \frac{c^2 k_3}{8k_2^3 (f_c + f_r)^2} \left( f_a + \frac{k_1}{c} (f_c + f_r) \right)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

一般载频 $f_c$ 远大于 $f_r$ ,可得

$$\frac{1}{(f_c + f_r)} \approx \frac{1}{f_c} - \frac{f_r}{f_c^2} + \frac{f_r^2}{f_c^3}, \quad \frac{1}{(f_c + f_r)^2} \approx \frac{1}{f_c^2} - \frac{2f_r}{f_c^3} + \frac{3f_r^2}{f_c^4} \quad (7)$$

利用式(7)对 $\psi(f_r, f_a)$ 进一步展开成 $f_r$ 幂级数的形式,舍弃 $f_r$ 和 $f_a$ 的高次项后得到

$$\psi(f_r, f_a) \approx \varphi_0(f_a, \Delta R) + \varphi_1(f_a, \Delta R) f_r + \varphi_2(f_a, \Delta R) f_r^2 \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_0(f_a, \Delta R) = & \frac{2\pi f_c}{c} \left( -k_0 + \frac{k_1^2}{4k_2} + \frac{k_1^3 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} k_1^4 \right) \\ & + 2\pi \left( \frac{k_1}{2k_2} + \frac{3k_1^2 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \cdot 4k_1^3 \right) f_a \\ & + \frac{2\pi c}{f_c} \left( \frac{1}{4k_2} + \frac{3k_1 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \cdot 6k_1^2 \right) f_a^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1(f_a, \Delta R) = & \frac{2\pi}{c} \left( -k_0 + \frac{k_1^2}{4k_2} + \frac{k_1^3 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} k_1^4 \right) \\ & - \frac{2\pi c}{f_c^2} \left( \frac{1}{4k_2} + \frac{3k_1 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \cdot 6k_1^2 \right) f_a^2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varphi_2(f_a, \Delta R) = \frac{2\pi c}{f_c^3} \left( \frac{1}{4k_2} + \frac{3k_1 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \cdot 6k_1^2 \right) f_a^2 \quad (11)$$

其中 $\Delta R$ 代表目标相对场景中心的距离位置偏移量,在方位中心时刻有

$$R_R + R_T = R_{Rcen} + R_{Tcen} + 2\Delta R \quad (12)$$

式(8)中的第1项 $\varphi_0$ 与 $f_r$ 无关,为双基地SAR的方位调制项;第2项 $\varphi_1$ 为 $f_r$ 线性项的系数,表征了参考距离上的距离徙动;第3项是距离压缩项, $\varphi_2$ 表征了目标的距离调频率。2维频谱相位 $\psi(f_r, f_a)$ 的各项都与 $\Delta R$ 有关,说明星/机双基地混合滑动聚束SAR具有较复杂的距离空变性。

在星载情况下,测绘带宽度远远小于斜距,可以不考虑地球曲率,近似认为成像场景为一平面,因而可用二次多项式来近似拟合双程斜距与 $\Delta R$ 的变化关系。设

$$\begin{cases} Y_T(\Delta R) = Y_T + \alpha \Delta R + \beta \Delta R^2 \\ Y_R(\Delta R) = Y_R + \alpha \Delta R + \beta \Delta R^2 \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 为待定系数。将式(13)代入式(12),并对左边泰勒展开,可以得到

$$\begin{cases} \alpha = 2 \left/ \left( \frac{Y_T}{R_{Tcen}} + \frac{Y_R}{R_{Rcen}} \right) \right. \\ \beta = \alpha^2 \left( \frac{Y_T^2}{2R_{Tcen}^3} + \frac{Y_R^2}{2R_{Rcen}^3} - \frac{1}{2R_{Tcen}} - \frac{1}{2R_{Rcen}} \right) \\ \left/ \left( \frac{3Y_T}{R_{Tcen}} + \frac{3Y_R}{R_{Rcen}} \right) \right. \end{cases} \quad (14)$$

由地距 $Y_T(\Delta R)$ 和 $Y_R(\Delta R)$ 易得双程斜距 $R(t_m, \Delta R) = R_T(\Delta R) + R_R(\Delta R)$ 及其泰勒展开式系数与 $\Delta R$ 的变化关系。

$$\begin{cases} k_0(\Delta R) = R_{Tcen} + R_{Rcen} \\ k_1(\Delta R) = k_3(\Delta R) = 0 \\ k_2(\Delta R) = \frac{v_T^2}{2R_T(\Delta R)} + \frac{v_R^2}{2R_R(\Delta R)} \\ k_4(\Delta R) = -\frac{v_T^4}{8R_T(\Delta R)^3} - \frac{v_R^4}{8R_R(\Delta R)^3} \end{cases} \quad (15)$$

由 $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ 可以进一步得到 $\varphi_0, \varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 相对 $\Delta R$ 的解析表达式 $\varphi_i(f_a, \Delta R), i = 1, 2, 3$ 。

#### 3.2 方位频谱混叠与解决方法分析

图3为场景中目标P的时频关系图。从图中可知,滑动聚束式SAR的全场景多普勒带宽 $B_a$ 由两部分组成,一部分是回波信号的瞬时多普勒带宽 $B_{inst}$ ,另一部分为合成孔径时间 $T_a$ 照射产生的带宽 $B_d$ 。

$$B_{inst} = \frac{v_T}{Da_T} + \frac{v_R}{Da_R} \quad (16)$$

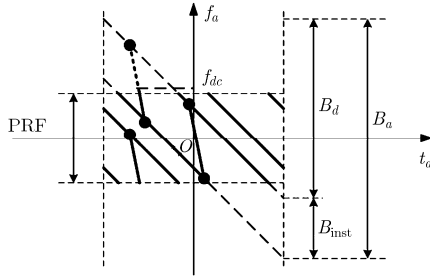


图 3 场景中目标 P 的时频图

$$B_d = \left( \frac{v_T^2}{\lambda R_{Tef}} + \frac{v_R^2}{\lambda R_{Ref}} \right) T_a \quad (17)$$

其中  $D_{a_T}$  和  $D_{a_R}$  分别为发射和接收天线孔径。由于方位点的多普勒中心随方位位置变化，会导致整个场景的方位带宽增加，通常方位带宽会达到 PRF 的好几倍。当方位采样率 PRF 大于瞬时多普勒带宽  $B_{inst}$  但小于场景带宽  $B_d$  时，若 P 点位于场景边缘，方位多普勒中心就会超出 PRF，回波产生混叠。

为了解决小 PRF 采样下的大成像场景时的方位混叠问题，本文根据 SPECAN 技术的思想<sup>[12-15]</sup>，能够在不显著增加数据量的情况下，完成 PRF 仅略微大于  $B_{inst}$  时对成像场景的无模糊恢复，保证整个场景的高精度成像。

图 4 给出了基于 SPECAN 操作进行无模糊 2 维频谱恢复过程中信号在时频平面的变化。图 4(a) 为原始信号的时频图，从图中可以看出，信号在频率域是混叠的，但在时域是不混叠的。为了得到二维频谱的无模糊表达，将回波信号转换到距离频域，并将双程斜距进行泰勒展开，可以将相位表达式近似写为

$$S_{ech}(f_r, t_a) = \exp \left( -j2\pi \frac{f_c + f_r}{c} \left( R_{Tcen} + R_{Rcen} - \frac{v_T^2 t_a^2}{2R_{Tcen}} - \frac{v_R^2 t_a^2}{2R_{Rcen}} \right) \right) \quad (18)$$

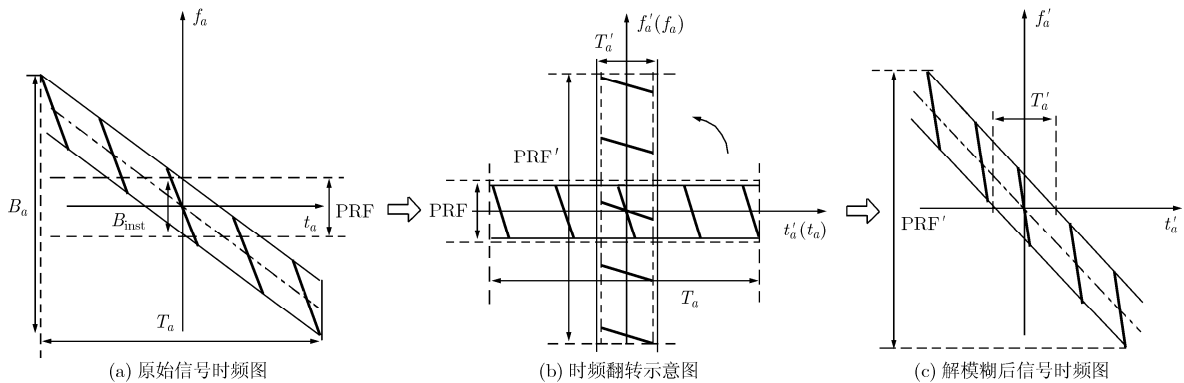


图 4 无模糊 2 维频谱恢复的过程图

构造参考函数

$$S_{ref}(t_a) = \exp(j\pi\delta t_a^2), \quad \delta = \frac{v_T^2}{\lambda R_{Tef}} + \frac{v_R^2}{\lambda R_{Ref}} \quad (19)$$

其中调频率系数  $\delta$  的构造与双机构型参数相关。将式(18)与参考函数卷积得到

$$\begin{aligned} S_2(f_r, t'_a) &= \exp(j\pi\delta t_a^2) \int S_{ech}(f_r, z) \exp(j\pi\delta z^2) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi\delta t_a z) dz \\ &= S_{ref}(t'_a) \cdot \text{FFT}[S_{ech}(f_r, t_a) S_{ref}(t_a)] \quad (20) \end{aligned}$$

从式(20)可以看出，积分号里的表达式可以理解成信号与二次相位信号进行相乘然后求傅里叶变换。乘以二次相位信号  $S_{ref}(t_a)$  后，信号在时域和频域集中在参数对  $(T_a, PRF)$  内，之后做 FFT 变换，相当于时频轴之间的互换，如图 4(b)。最后再补偿一个二次剩余相位  $S_{ref}(t'_a)$ ，得到新坐标下方位频域无模糊的信号  $S_2(f_r, t'_a)$ ，如图 4(c)。其中 FFT 变换可以被看为信号从原尺度的时域坐标  $t_a$ ，变换到另一种尺度的坐标  $t'_a$ ，而新的坐标  $t'_a$  相当于对原信号的频率坐标  $f_a$  进行了标度变换。从而，仅通过复数乘法和 FFT 运算就能获得无模糊的频谱，避免了插值运算带来的运算量和复杂度。 $t_a, f_a$  与  $t'_a, f'_a$  有关系如下：

$$f_a = \delta t'_a, \quad f'_a = \delta t_a \quad (21)$$

由式(21)可得变换前后的 PRF 比值和方位点数 nan 的比值分别为

$$\varepsilon_f = \frac{PRF'}{PRF} = \frac{\text{nan}'}{\lambda PRF^2} \delta, \quad \varepsilon_t = \frac{\text{nan}'}{\text{nan}} = \frac{\varepsilon_f T_a'}{T_a} < \varepsilon_f \quad (22)$$

利用卷积的 FFT 性质，知对  $S_2(f_r, f'_a)$  乘以补偿函数  $S_{com}(f'_a)$  即可得到回波信号无混叠的 2 维频谱

$$S_{ech}(f_r, f'_a) = S_2(f_r, f'_a) S_{com}(f'_a) \quad (23)$$

其中  $S_{com}(f'_a) = S_{ref}^*(f'_a)$ 。从图 4(c) 可以看出  $S_{ech}(f_r, f'_a)$  在  $f'_a$  域中不模糊，但在  $t'_a$  域是模糊的。在之后的运算中，我们直接在 2 维频域设计 RD 算法完成 RCMC 和方位脉压，得到方位频域无模糊成像。

### 3.3.2 维频谱无模糊成像算法

在星/机双基地混合滑动聚束构型下, 双程斜距远大于场景宽度, 可以忽略场景距离弯曲差来设计距离多普勒成像算法, 完成 RCMC 和方位聚焦。

得到回波信号无混叠的 2 维频谱后, 我们结合式(8)进行分析。构造 2 维频域的距离压缩函数  $H_1(f_r, f'_a)$  为

$$H_1(f_r, f'_a) = \exp\left(j\pi \frac{1}{\gamma} f_r^2 - j\varphi_2(f_a, \Delta R) f_r^2\right) \quad (24)$$

其中

$$\varphi_2(f_a, \Delta R) = \pi \left( \frac{c}{2k_2(\Delta R) f_c^3} f_a^2 \right) \quad (25)$$

在斜视角度不大的情况下, 由于  $R_{Tcen} \gg R_{Rcen}$ ,  $\varphi_1(f_a, \Delta R)$  及  $f_r$  高次项系数随  $\Delta R$  的变化很小, 可用  $\Delta R = 0$  时来近似, 则有

$$H_1(f_r, f'_a) = \exp\left(j\pi \frac{1}{\gamma} f_r^2 - j\varphi_2(f_a, 0) f_r^2\right) \quad (26)$$

再进行距离徙动校正, 其补偿函数  $H_2(f_r, f'_a)$  为

$$H_2(f_r, f'_a) = \exp(-j\varphi_1(f_a, 0) f_r) \quad (27)$$

其中

$$\varphi_1(f_a, \Delta R) = -\frac{4\pi}{c} \left( \frac{k_0(\Delta R)}{2} + \frac{c^2}{8k_2(\Delta R) f_c^2} f_a^2 \right) \quad (28)$$

距离向徙动校正后, 进行距离 IFFT, 此时信号可以表示为

$$S(\hat{t}, f'_a) = w_r(\hat{t}) W_a(f'_a) \exp(j\varphi_0(f'_a, \Delta R)) \quad (29)$$

其中

$$\varphi_0(f_a, \Delta R) = -2\pi \left( \frac{f_c}{c} k_0(\Delta R) - \frac{c}{4k_2(\Delta R) f_c} f_a^2 \right) \quad (30)$$

3.2 节的分析表明, 这时信号在  $t'_a$  域是混叠的, 可以再进行一次 SPECAN 操作解方位混叠。但为了对场景进行快速成像, 本文结合 Dechirp 处理的思想, 将点目标直接聚焦在  $f'_a$  域。构造函数  $H_3(f'_a)$  将式(29)的曲线相位转换为二次项相位, 并将信号旋转到竖直的区域

$$H_3(f'_a) = \exp\left(-j2\pi\varphi_0(f_a, \Delta R) + j\pi \frac{\lambda^2}{\eta} f_a'^2 - j\pi \frac{\lambda^2}{\delta} f_a'^2\right),$$

$$\eta = \frac{v_T^2}{\lambda R_{Tcen}} + \frac{v_R^2}{\lambda R_{Rcen}} \quad (31)$$

将式(31)与式(29)相乘, 方位 IFFT 转换到无模糊的方位时域, 再乘以 Dechirp 函数

$$H_4(t'_a) = \exp\left(-j\pi \frac{\delta\eta}{\lambda^2(\eta - \delta)} t_a'^2\right) \quad (32)$$

最后 FFT 变换到频域, 即可得到场景无模糊的 2 维成像。星机双基地混合滑动聚束 SAR 成像算法流程图如图 5 所示。

## 4 仿真结果及分析

为了验证本文提出的星/机双基地混合滑动聚束 SAR 成像算法, 利用表 1 中参数进行点目标仿真, 原始回波信号距离采样 8640 点, 方位采样 5400 点。仿真场景为  $5 \times 5$  的矩形点阵, 均匀的分布于  $7.2 \text{ km} \times 7.641 \text{ km}$  的场景范围内, 见图 6(a)。由表 1 参数可知, 发射雷达地面照射孔径为  $3 \text{ km}$ , 仿真假设接收雷达可接收整个发射雷达照射孔径内回波信号。这样在整个合成孔径时间内, 波束滑动了约 2.55 个孔径长度, 且所有仿真目标不处于同一个波束孔径。

表 1 雷达仿真参数

信号载频(GHz)	10	卫星	飞机
波长(cm)	3	斜距(km)	800 40
合成孔径时间(s)	3.6	旋转中心距(km)	1110 1.978
脉冲宽度( $\mu\text{s}$ )	20	高度(km)	515 8
信号带宽(MHz)	150	速度(m/s)	7600 100
距离采样率(MHz)	180	天线孔径(m)	8 0.4
PRF(Hz)	1500	滑动系数	0.279 21.225

由式(16)和式(17)可以计算得到此时方位瞬时多普勒带宽  $B_{\text{inst}} = 1200 \text{ Hz}$ , 全场景带宽  $B_a \approx 8051 \text{ Hz}$ , 此时 PRF 大于  $B_{\text{inst}}$  但是远小于  $B_a$ 。由图 6(b)可见, 原始回波信号在方位频域产生了严重混

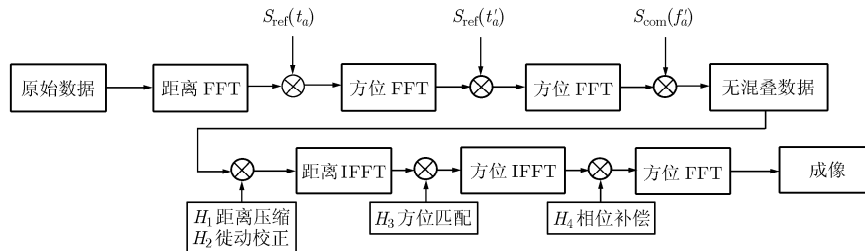


图 5 星/机双基地混合滑动聚束 SAR 成像算法流程图

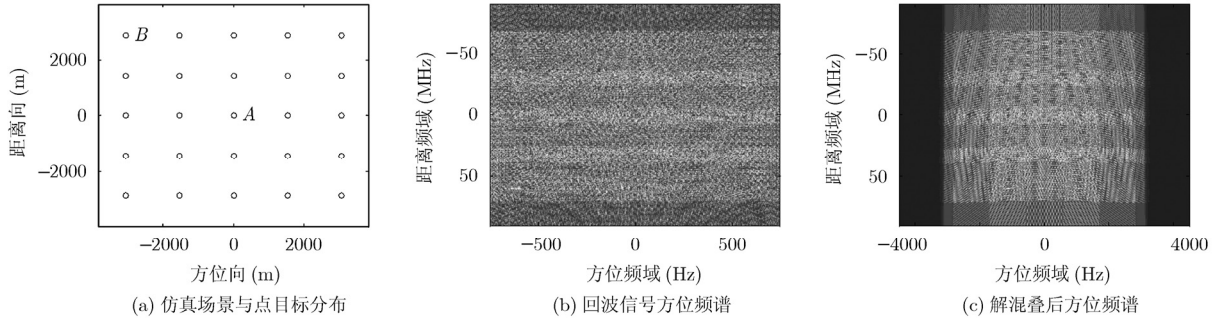


图 6 仿真结果

叠。图 6(c)为根据 SPECAN 技术去方位混叠后的频谱,此时方位向扩展到 8624 点,仅扩大约 1.59 倍,而 PRF 扩大了约 6 倍。

图 7(a)和图 7(b)分别为场景中心点 A、场景边缘点 B 的成像结果高度图。对场景边缘点 B 成像结果进行性能分析,距离剖面图和方位剖面图分别见图 8(a)和图 8(b)。B 点成像结果距离向的峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)分别为-13.26 dB 和 -10.17 dB,方位向分别为-13.22 dB 和 -10.28 dB,

成像处理中距离和方位均未加权,可见对整个场景都得到良好聚焦。

### 5 结论

本文结合可以得到高精度 2 维频谱的级数反演法和可以高效率解除回波数据方位混叠的 SPECAN 技术,提出了一种适用与星/机双基地混合滑动聚束式 SAR 构型下的全场景距离-多普勒成像算法。本算法运算量小,成像结果理想,具有较高的实用性。

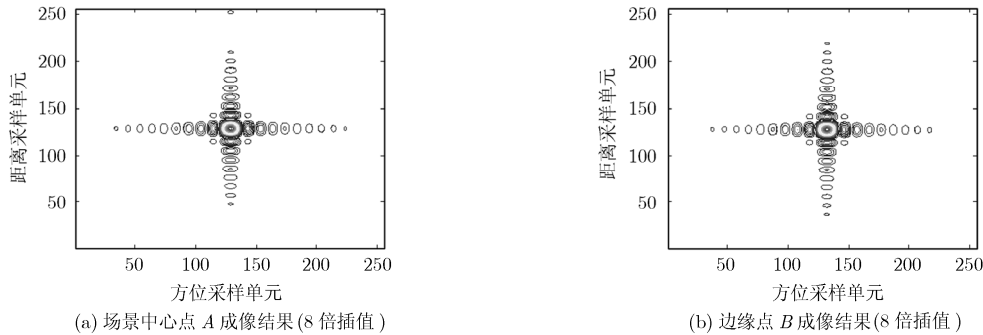


图 7 场景中心 A 和边缘点 B 成像结果

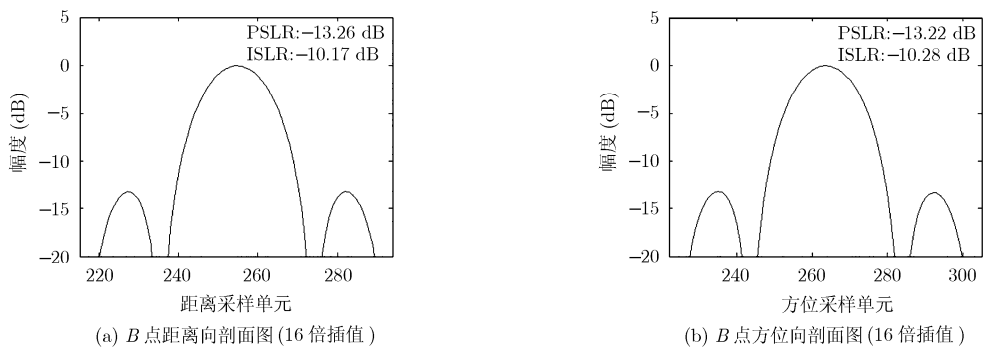


图 8 B 点距离剖面图和方位剖面图

### 参考文献

[1] Moccia A, Salzillo G, D'Errico M, et al. Performance of spaceborne bistatic synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005,

41(4): 1383-1395.  
 [2] Yin Can-bin, Jia Xin, and Qin Wei-dong. Investigation on converse beam cross sliding spotlight SAR[C]. *APSAR 2009*, Xi'an, China, Oct. 26-30, 2009: 25-28.

- [3] Wang R, Loffeld O, Nies H, and Knedlik S, *et al.* Frequency-domain bistatic SAR processing for spaceborne/airborne configuration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1329-1345.
- [4] Cumming I and Wong F. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston & London: Artech House, 2005: 47-49.
- [5] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi-and multistatic SAR: potential and challenges [J]. *IEE Proceeding of Radars, Sonar Navigation*, 2006, 153(3): 184-198.
- [6] Loffeld O, Nies H, Peters V, *et al.* Models and useful relations for bistatic SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [7] Zhang Zhen-hua, Xing Meng-dao, and Ding Jin-shan. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [8] Yem Lam Neo, Wong F, and Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93-96.
- [9] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [10] 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]. *IEEE Proceeding of IGARSS*, Toulouse, France, July 21-25, 2003: 1462-1464.
- [11] 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 Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [12] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993-2004.
- [13] Engen G and Larsen Y. Efficient full aperture processing of TOPS mode data[C]. *EUSAR 2010*, Eurogress, Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 13-16.
- [14] 张磊, 井伟, 邢孟道, 等. 同航线双基聚束式SAR宽场景成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1679-1683.
- Zhang Lei, Jing Wei, Xing Meng-dao, *et al.* An algorithm for repeated trajectory bistatic spotlight SAR widefield imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1679-1683.
- [15] 井伟, 张磊, 邢孟道, 等. 聚束式SAR的宽场景成像算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 470-475.
- Jing Wei, Zhang Lei, Xing Meng-dao, *et al.* Algorithm for wide-swath spotlight SAR data processing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 470-475.
- [16] Walterscheid I, Espeter T, Andreas R, *et al.* Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR-X — setup, processing and image results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3268-3279.
- [17] Wang R, Loffeld O, Nies H, *et al.* Focusing spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR data using wavenumber-domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2275-2283.
- 周芳: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、运动补偿。
- 孙光才: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、动目标检测等。
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别等。
- 唐禹: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为SAR成像、运动补偿以及新体制雷达等。
- 保铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为SAR成像、目标识别、天波超视距、空时二维自适应等。