

## 机载并行双站大斜视 SAR 两步式成像算法

冉金和\* 张剑云 武拥军

(合肥电子工程学院 合肥 230037)

**摘要:** 该文提出了机载并行双站大斜视 SAR 的两步式成像算法。针对双站大斜视回波信号的距离-方位强耦合,在距离频域-方位时域校正收、发载机大斜视引起的大距离走动,然后推导改进点目标频谱公式,并用 Chirp Scaling 方法校正残余距离徙动得到成像结果。针对成像结果中出现的点目标位置偏移的问题,推导了成像场景到地面场景的目标位置校正方法。最后,通过仿真验证了所提的两步式成像算法和目标位置校正方法的有效性。

**关键词:** 双站 SAR; 大斜视; 距离走动校正; 目标位置校正

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)05-1036-08

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.00945

## Two-step Imaging Algorithm for Airborne Parallel High Squint SAR

Ran Jin-he Zhang Jian-yun Wu Yong-jun

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** A two-step imaging algorithm for focusing airborne parallel high squint Synthetic Aperture Radar (SAR) data is proposed in this paper. For the serious cross coupling of echo signal in bistatic high squint SAR, Linear Range Walk Correction (LRWC) is performed in range frequency-azimuth time domain to correct the large LRW induced by the high squint model of receiver and transmitter. A Modified Bistatic Point Target Reference Spectrum (MBPTRS) is derived, and residual Range Cell Migration (RCM) is corrected by Chirp Scaling (CS) method to get the focusing result. To solve the target position displacements in the focusing result, a method of target position correction that converts the focusing image to the ground plane is derived. Finally, the experimental results with simulated data validate the effectiveness of the proposed two-step imaging algorithm and the method of target position correction.

**Key words:** Bistatic SAR; High squint; Range Walk Correction (RWC); Target position correction

### 1 引言

机载并行双站 SAR 保留了双站 SAR 的优点,又能利用回波的方位空(移)不变性构建成像算法,成为双站 SAR 优先发展的构型之一<sup>[1]</sup>。其大斜视工作时,雷达波束可重访热点区域,提高了系统的机动性,又可以远离成像区域成像,具有较高的安全性,所以更能满足未来战争的需求<sup>[2,3]</sup>。

时域成像算法<sup>[4]</sup>能实现任意斜视角的并行双站 SAR 成像,但其计算量极大,无法满足实时成像要求。为提高成像效率,人们提出了并行双站 SAR 的频域成像算法,如基于瞬时频率法的 CSA<sup>[5]</sup>,基于 LBF 的 RDA<sup>[6]</sup>, CSA<sup>[7]</sup>, CZT 算法<sup>[8]</sup>等,这些算法在双站中/小斜视时可获得较好的聚焦结果。但双站大斜视工作时,回波具有很强的距离-方位 2 维耦合,且距离徙动空变性增大,使得前述算法<sup>[5-8]</sup>的聚焦性能下降。文献[9,10]基于 MSR 频谱公式提出了

RDA 与 WKA,算法在 2 维时域校正线性距离走动,有效减小了回波的距离徙动空变性,可用于并行双站大斜视 SAR 成像,但算法插值操作降低了成像效率。频率类成像算法在实现移不变双站 SAR 成像时,成像结果将出现方位向位置偏移,影响成像结果的实际应用,如文献[9-11]的成像结果。然而,文献[11]的目标位置校正方法需满足等效相位中心原理,具有局限性;文献[9]给出了运用坐标变换校正点目标位置偏移的思路与校正结果,未给出具体校正方法;文献[10]推导了具有相同多普勒质心的点目标位置偏移校正方法,其要求所校正的点目标具有相同的多普勒质心,不适用于观测场景任一点目标的位置偏移校正。

为此,本文针对机载并行双站条带大斜视 SAR 的成像问题,提出一种两步式成像算法。算法分线性距离徙动校正(LRWC)与残余距离徙动校正两步校正距离徙动,在距离频域-方位时域实施 LRWC 以削弱回波距离-方位 2 维耦合并减小距离徙动空变性,推导了 LRWC 后的改进点目标频谱公式

2013-07-01 收到, 2013-11-01 改回

\*通信作者: 冉金和 jinhe\_ran@163.com

(MELBF), 运用 CS 方法校正残余距离徙动提高成像效率。推导了观测场景的任一点目标的位置偏移校正方法以解决成像结果位置偏移的问题。仿真表明, 算法能很好地实现机载并行双站大斜视 SAR 成像, 同时本文目标位置偏移校正方法能有效解决整个观测场景成像结果的位置偏移问题。

## 2 机载并行双站大斜视 SAR 信号模型

机载并行双站大斜视 SAR 几何模型如图 1 所示, 收、发载机分别沿平行轨迹做匀速直线飞行,  $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_T = \mathbf{v}$ 。发射机以斜视角  $\theta_{T0}$  向观测场景辐射电磁脉冲信号, 接收机以斜视角  $\theta_{R0}$  接收观测场景侧向散射回波, 双站基线为  $\mathbf{l}$ 。观测场景内任一点目标的位置为  $\mathbf{P}_0(R_{R0}, t_{R0})$ ,  $t_{R0}$  为接收机垂直飞过  $\mathbf{P}_0$  的时刻, 对应该时刻的目标斜距  $R_{R0} = |\mathbf{R}(t_{R0}; R_{R0}, t_{R0})|$  为接收机最近斜距。同理, 可定义发射机最近斜距  $R_{T0} = |\mathbf{R}(t_{T0}; R_{T0}, t_{T0})|$ 。

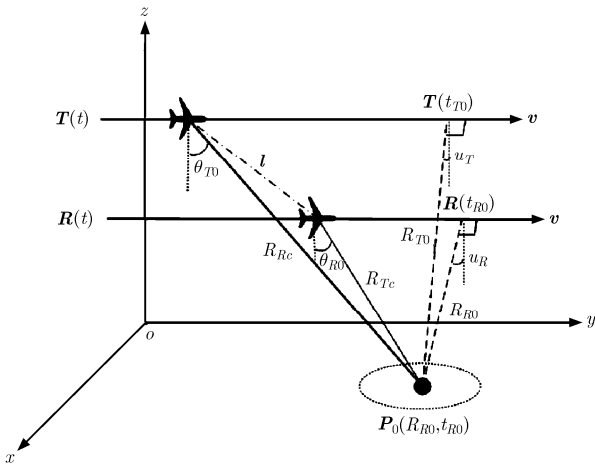


图 1 机载并行双站大斜视 SAR 几何模型

$\mathbf{P}_0$  的双站斜距历程  $R_B(t)$  为

$$\begin{aligned} R_B(t) &= \sqrt{R_{R0}^2 + v^2(t - t_{R0})^2} + \sqrt{R_{T0}^2 + v^2(t - t_{T0})^2} \\ &= \sqrt{R_{R0}^2 + v^2(t - t_{R0})^2} \\ &\quad + \sqrt{a_2^2 R_{R0}^2 + v^2(t - a_0 - t_{R0})^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $t$  为方位(慢)时间,  $a_0$  与  $a_2$  分别为载机垂直飞过  $\mathbf{P}_0$  的方位时间差与最近斜距比值<sup>[12]</sup>。

设发射机辐射 LFM 信号  $s(\tau) = \text{rect}(\tau/T_p) \cdot \exp\{j2\pi f_c \tau + j\pi k_r \tau^2\}$ , 辐射信号经观测场景目标散射形成回波, 接收机对回波解调得到其归一化基带信号为

$$\begin{aligned} ss(\tau, t; R_{R0}, t_{R0}) &= \exp\left\{j\pi k_r \left(\tau - R_B(t)/c\right)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j2\pi R_B(t)/\lambda\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\tau$  为距离(快)时间,  $k_r$  为信号调频率,  $\lambda$  为发射信号中心频率  $f_c$  对应的波长。

## 3 LRWC 及改进 BPTRS 推导

对式(1)在  $t = 0$  处做 Taylor 展开:

$$R_B(t) \approx (R_{Rc} + R_{Tc}) - \lambda f_{dc} t - \lambda f_r t^2 / 2 - \lambda \dot{f}_r t^3 / 6 + \dots \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} f_{dc} &= v(\sin \theta_{T0} + \sin \theta_{R0})/\lambda \\ f_r &= -v^2(\cos^2 \theta_{T0}/R_{Tc} + \cos^2 \theta_{R0}/R_{Rc})/\lambda \\ \dot{f}_r &= -3v^3(\cos^2 \theta_{R0} \sin \theta_{R0}/R_{Rc}^2 \\ &\quad + \cos^2 \theta_{T0} \sin \theta_{T0}/R_{Tc}^2)/\lambda \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)中,  $R_{Rc}$  和  $R_{Tc}$  分别为载机天线波束中心扫过  $\mathbf{P}_0$  时的斜距,  $f_{dc}$  为多普勒质心,  $f_r$  为多普勒调频率,  $\dot{f}_r$  为多普勒调频率的变化率。  $t$  的一次项为距离走动, 二次项为距离弯曲, 三次及其以上项为高阶距离徙动项, 双站大斜视工作时, 距离走动为距离徙动的主要分量。为减小双站大斜视模式下大距离走动带来的回波信号距离-方位 2 维强耦合, 应首先对回波数据进行 LRWC。结合单站大斜视 SAR 的 LRWC 思想<sup>[3]</sup>, 本文在距离频域-方位时域进行 LRWC, 并推导经 LRWC 后的 BPTRS。

### 3.1 距离走动校正

对式(2)做距离向 FFT 同时分离出距离走动对应的相位项:

$$\begin{aligned} Ss_r(f_r, t; R_{R0}, t_{R0}) &= \exp\left\{-j2\pi(f_r + f_c)(R_B(t) + \lambda f_{dc} t)/c\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\pi f_r^2/k_r\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi f_{dc}(1 + f_r/f_c)t\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j\pi/4\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $f_r$  为距离频率,  $B_r$  为发射信号带宽。根据式(5)得到 LRWC 相位函数:

$$H_{LRWC}(f_r, t; R_{R0}, t_{R0}) = \exp\left\{-j2\pi f_{dc}(1 + f_r/f_c)t\right\} \quad (6)$$

式(6)的相位函数能有效减小回波信号的距离-方位 2 维耦合, 同时将多普勒质心校正为零值, 式(5)乘以式(6)可得 LRWC 后的回波信号。

### 3.2 改进 BPTRS 推导

对 LRWC 后的回波信号做方位向 FFT, 并运用驻定相位原理<sup>[12]</sup>求解积分, 得到回波频谱表达式:

$$\begin{aligned} SS'_{ra}(f_r, f_t; R_{R0}, t_{R0}) &= \exp\left\{-j\Psi_1(f_r, f_t; R_{R0}, t_{R0})\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\Psi_2(f_r, f_t; R_{R0}, t_{R0})\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\pi f_r^2/k_r\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\Psi_1(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0}) &= \frac{2\pi}{c} R_{R0} (f_c + f_\tau)^2 \left( \frac{1}{F_R(f_\tau, f_i)} + \frac{a_2}{F_T(f_\tau, f_i)} \right) \\
&+ \frac{2\pi\lambda}{c} (f_c + f_\tau) (t_{R0} f_{dc} + a_0 f_{dcT}) \\
&+ 2\pi f_i (t_{R0} + a_0 k_T) - 2\pi R_{R0} f_i \\
&\cdot \left( \frac{k_R \beta_R(f_\tau, f_i)}{v^2 F_R(f_\tau, f_i)} + \frac{a_2 k_T \beta_T(f_\tau, f_i)}{v^2 F_T(f_\tau, f_i)} \right) \\
&- \frac{2\pi\lambda}{c} (f_c + f_\tau) R_{R0} \\
&\cdot \left( \frac{f_{dcR} \beta_R(f_\tau, f_i)}{v^2 F_R(f_\tau, f_i)} + \frac{a_2 f_{dcT} \beta_T(f_\tau, f_i)}{v^2 F_T(f_\tau, f_i)} \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_2(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0}) &= \frac{2\pi}{c R_{R0}} \frac{v^2}{(f_c + f_\tau)^2} \frac{F_R^3(f_\tau, f_i) \cdot F_T^3(f_\tau, f_i)}{a_2 F_R^3(f_\tau, f_i) + F_T^3(f_\tau, f_i)} \\
&\cdot \left\{ a_0 - \frac{c f_i}{v^2} \cdot \frac{R_{R0}}{F_R(f_\tau, f_i) \cdot F_T(f_\tau, f_i)} \right. \\
&\cdot (a_2 k_T F_R(f_\tau, f_i) - k_R F_T(f_\tau, f_i)) - \frac{\lambda(f_c + f_\tau)}{v^2} \\
&\cdot \frac{R_{R0}}{F_R(f_\tau, f_i) \cdot F_T(f_\tau, f_i)} \\
&\left. \cdot (a_2 f_{dcT} F_R(f_\tau, f_i) - f_{dcR} F_T(f_\tau, f_i)) \right\}^2 \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
\beta_{T,R}(f_\tau, f_i) &= c k_{T,R} f_i + \lambda f_{dcT,dcR} (f_c + f_\tau) \\
F_{T,R}(f_\tau, f_i) &= \sqrt{(f_c + f_\tau)^2 - (\beta_{T,R}(f_\tau, f_i)/v)^2}
\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中  $f_i$  为多普勒频率,  $f_{dcT} = v \sin \theta_{T0} / \lambda$  与  $f_{dcR} = v \sin \theta_{R0} / \lambda$  分别为收、发载机的半单站多普勒质心,  $k_R$  与  $k_T$  分别为收、发载机对双站多普勒调频率的贡献比<sup>[12]</sup>。式(7)为 LRWC 后的改进 ELBF (MELBF), 当  $f_{dcT}$  与  $f_{dcR}$  均为零时, 式(7)退化为文献[12]的 ELBF。 $\Psi_1(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0})$  为准单站项,  $\Psi_2(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0})$  为双站扭曲项, 经 LRWC 后多普勒频率变化范围为  $-B_a/2 \leq f_i \leq B_a/2$ ,  $B_a$  为多普勒带宽。

为分析 LRWC 后回波频谱与原始回波频谱的区别, 图 2 给出了两种频谱的比较结果, 其中, 发射机飞行高度为 8 km, 斜视角为  $41^\circ$ , 对应点目标最近斜距为 22.5 km, 接收机飞行高度为 6 km, 斜视角为  $43^\circ$ , 对应点目标的最近斜距为 16 km, LFM 信号载频为 10 GHz, 脉冲宽度为 5  $\mu$ s, 信号带宽为 75 MHz, 距离采样率为 180 MHz, PRF 为 101 Hz。图 2 表明, 由于双站大斜视工作, 原始回波频谱为一倾斜 2 维谱, 具有很强的距离-方位 2 维耦合。而经 LRWC 后的回波频谱距离-方位耦合大大降低, 表明本文 LRWC 方法能很好地消除双站大斜视带来的频谱倾斜现象。

## 4 成像算法构建

### 4.1 算法推导

式(7)的双站扭曲项经 LRWC 后的相位值相对总的频谱相位值很小, 在宽场景成像中可通过距离向数据分块进行补偿。成像第 1 步是对回波数据进行数据分块, 以数据块中心点目标  $\mathbf{P}_m(R_{Rm}, t_{Rm})$  为参考进行 LRWC, 数据块内点目标双站扭曲项以  $\mathbf{P}_m$  双站扭曲项进行近似, 并在 2 维频域中补偿。基于此, 式(7)可记为

$$\begin{aligned}
SS'_{ra}(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0}) &= \exp\{-j\Psi_1(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0})\} \\
&\cdot \exp\{-j\Psi_2(f_\tau, f_i; R_{Rm}, t_{Rm})\} \\
&\cdot \exp\{-j\pi f_\tau^2 / k_r\} \quad (11)
\end{aligned}$$

以  $\mathbf{P}_m$  为参考, 数据块内任一点目标  $\mathbf{P}_0(R_{R0}, t_{R0})$  到载机轨迹的最近斜距为

$$\left. \begin{aligned}
R_{R0} &= R_{Rm} + \Delta R_R \\
R_{T0} &= R_{Tm} + \sin u_T / \sin u_R \Delta R_R
\end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中  $u_R$  与  $u_T$  分别为收、发载机垂直照射  $\mathbf{P}_m$  时的视线投射角。

为构建式(11)的空变性及距离-方位耦合并对其

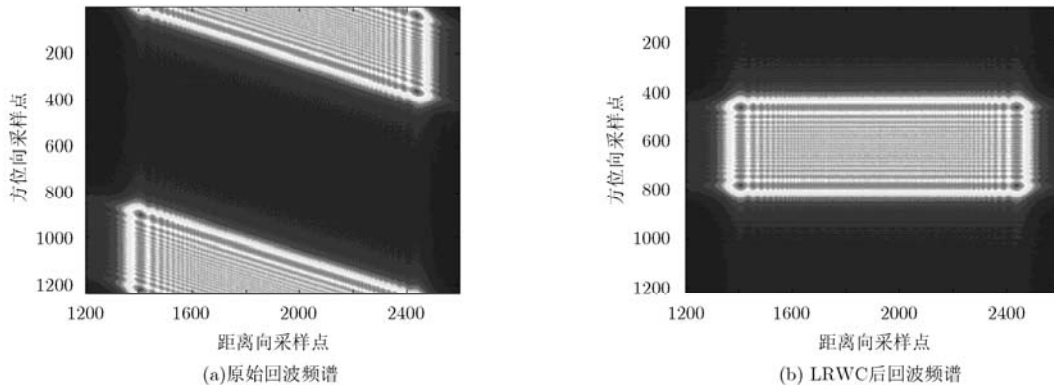


图 2 回波频谱比较

进行处理，对  $\Psi_1(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0})$  按距离频率进行 Taylor 展开：

$$\Psi_1(f_\tau, f_i; R_{R0}, t_{R0}) \approx \phi_0(f_i; R_{R0}) + \phi_1(f_i; R_{R0})f_\tau + \phi_2(f_i; R_{R0})f_\tau^2 + O(f_\tau^3; f_i; R_{R0}) \quad (13)$$

式中  $\phi_0(f_i; R_{R0})$  为 LRWC 后回波的方位调制项； $\phi_1(f_i; R_{R0})f_\tau$  为  $f_\tau$  的一次方项，表示 LRWC 后回波残余距离徙动项； $\phi_2(f_i; R_{R0})f_\tau^2$  为  $f_\tau$  的二次方项同时与  $f_i$  相关，表示 LRWC 后的回波距离-方位耦合项，也称为二阶压缩项 (SRC) [7, 13]； $O(f_\tau^3; f_i; R_{R0}) = \sum_{n=3}^{\infty} \phi_n(f_i; R_{R0})f_\tau^n$  为高阶耦合相位项，LRWC 后其相位值非常小，可忽略其对成像的影响。 $\phi_2(f_i; R_{R0})$  表达式为

$$\begin{aligned} \phi_2(f_i; R_{R0}) &= -\frac{4\pi R_{R0}}{\lambda} \left( \frac{A'_R}{A_R^2} + a_2 \frac{A'_T}{A_T^2} \right) + \frac{2\pi R_{R0}}{c} \left( \frac{1}{A_R} + \frac{a_2}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{\pi R_{R0} f_c}{\lambda} \left( \frac{A''_R A_R - 2A_R'^2}{A_R^3} + a_2 \frac{A''_T A_T - 2A_T'^2}{A_T^3} \right) \\ &\quad - \pi R_{R0} f_t \left[ \frac{k_R (2B_R A_R'^2 - B_R A''_R A_R - 2\lambda f_{dcR} A_R A'_R)}{v_R^2 A_R^3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_2 k_T (2B_T A_T'^2 - B_T A''_T A_T - 2\lambda f_{dcT} A_T A'_T)}{v_T^2 A_T^3} \right] \\ &\quad - \frac{2\pi \lambda R_{R0}}{c} \left[ \frac{f_{dcR} (\lambda f_{dcR} A_R - B_R A'_R)}{v_R^2 A_R^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_2 f_{dcT} (\lambda f_{dcT} A_T - B_T A'_T)}{v_T^2 A_T^2} \right] \\ &\quad - \pi R_{R0} \left[ \frac{f_{dcR} (2B_R A_R'^2 - B_R A''_R A_R - 2\lambda f_{dcR} A_R A'_R)}{v_R^2 A_R^3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_2 f_{dcT} (2B_T A_T'^2 - B_T A''_T A_T - 2\lambda f_{dcT} A_T A'_T)}{v_T^2 A_T^3} \right] \quad (14) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} A_{T,R} &= \sqrt{f_c^2 - (B_{T,R}/v)^2} \\ A'_{T,R} &= (v^2 f_c^2 - c f_{dcT,dcR} B_{T,R}) / (v^2 f_c A_{T,R}) \\ A''_{T,R} &= \left[ v^2 A_{T,R}^2 (v^2 - \lambda^2 f_{dcT,dcR}^2) \right. \\ &\quad \left. - (v^2 f_c - \lambda f_{dcT,dcR} B_{T,R})^2 \right] / (v^4 A_{T,R}^3) \\ B_{T,R} &= c k_{T,R} f_t + c f_{dcT,dcR} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

结合式(11)的距离压缩相位项及式(13)的 SRC 项，得到新的距离调频率：

$$k_s(f_i; R_{R0}) = [1/k_r + \phi_2(f_i; R_{R0})/\pi]^{-1} \quad (16)$$

由于 LRWC 大大减小了回波 2 维耦合，故数据块内各点目标的 SRC 项可以数据块中心点目标进行近

似，即可得  $k_s(f_i; R_{R0}) \approx k_s(f_i; R_{Rm})$ ，并简记为  $k_s$ 。

将式(12)代入式(13)中的方位调制项与残余距离徙动项，并进行整理得到：

$$\phi_0(f_i; R_{R0}) + \phi_1(f_i; R_{R0})f_\tau = \Psi_{R_{Rm}}(f_\tau, f_i) + \Psi_{\Delta R_R}(f_\tau, f_i) \quad (17)$$

$\Psi_{R_{Rm}}(f_\tau, f_i)$  为数据块中心点目标回波在 2 维频域中的相位反映，为一固定相位值：

$$\Psi_{R_{Rm}}(f_\tau, f_i) = \varphi_{R_{Rm}}(f_i) + 2\pi \tau_{R_{Rm}} f_\tau \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{R_{Rm}}(f_i) &= \frac{2\pi f_c R_{Rm}}{\lambda} \left( \frac{1}{A_R} + \frac{a_{2m}}{A_T} \right) \\ &\quad + 2\pi (t_{R0} f_{dc} + a_0 f_{dcT}) \\ &\quad - \frac{2\pi R_{Rm} f_t}{v^2} \left( \frac{k_R B_R}{A_R} + \frac{a_{2m} k_T B_T}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{2\pi R_{Rm}}{v^2} \left( \frac{f_{dcR} B_R}{A_R} + \frac{a_{2m} f_{dcT} B_T}{A_T} \right) \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{R_{Rm}}(f_i) &= \frac{1}{f_c} (t_{R0} f_{dc} + a_0 f_{dcT}) + \frac{2R_{Rm}}{\lambda} \left( \frac{1}{A_R} + \frac{a_{2m}}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{R_{Rm} f_c}{\lambda} \left( \frac{A'_R}{A_R^2} + \frac{a_{2m} A'_T}{A_T^2} \right) \\ &\quad - \frac{R_{Rm} f_t}{v^2} \left[ \frac{k_R (\lambda f_{dcR} A_R - B_R A'_R)}{A_R^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_{2m} k_T (\lambda f_{dcT} A_T - B_T A'_T)}{A_T^2} \right] \\ &\quad - \frac{\lambda R_{Rm}}{c v^2} \left( \frac{f_{dcR} B_R}{A_R} + \frac{a_{2m} f_{dcT} B_T}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{R_{Rm}}{v^2} \left[ \frac{f_{dcR} (\lambda f_{dcR} A_R - B_R A'_R)}{A_R^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_{2m} f_{dcT} (\lambda f_{dcT} A_T - B_T A'_T)}{A_T^2} \right] \quad (20) \end{aligned}$$

$\Psi_{\Delta R_R}(f_\tau, f_i)$  为数据块中任一点目标相对于中心点目标回波在 2 维频域内的相位变化差值，是随  $\Delta R_R$  变化而变化的变量：

$$\Psi_{\Delta R_R}(f_\tau, f_i) = \varphi_{\Delta R_R}(f_i) + 2\pi \frac{\Delta R_R}{c} (\alpha(f_i) + 1) f_\tau + \varphi_1(f_i) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\Delta R_R}(f_i) &= \frac{2\pi f_c \Delta R_R}{\lambda} \left( \frac{1}{A_R} + \frac{\eta}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{2\pi f_i \Delta R_R}{v^2} \left( \frac{k_R B_R}{A_R} + \frac{k_T \eta B_T}{A_T} \right) \\ &\quad - \frac{2\pi \Delta R_R}{v^2} \left( \frac{f_{dcR} B_R}{A_R} + \frac{f_{dcT} \eta B_T}{A_T} \right) \quad (22) \end{aligned}$$

$$\alpha(f_i) = f_c \left( \frac{1}{A_R} + \frac{\eta}{A_T} \right) - \frac{f_c^2}{2} \left( \frac{A'_R}{A_R^2} + \frac{\eta A'_T}{A_T^2} \right) - \frac{cf_i}{2v^2} \left[ \frac{k_R (\lambda f_{dcR} A_R - B_R A'_R)}{A_R^2} + \frac{k_T \eta (\lambda f_{dcT} A_T - B_T A'_T)}{A_T^2} \right] - \frac{\lambda}{2v^2} \left( \frac{f_{dcR} B_R}{A_R} + \frac{f_{dcT} \eta B_T}{A_T} \right) - \frac{c}{2v^2} \left[ \frac{f_{dcR} (\lambda f_{dcR} A_R - B_R A'_R)}{A_R^2} + \frac{f_{dcT} \eta (\lambda f_{dcT} A_T - B_T A'_T)}{A_T^2} \right] - 1 \quad (23)$$

$$\varphi_1(f_i) = 2\pi(t_{R0} + a_0 k_T) f_i \quad (24)$$

其中  $\eta = \sin u_T / \sin u_R$ 。

对式(18)与式(21)各相位项物理意义及处理方法做如下说明:

(1)  $\varphi_{R_{Rm}}(f_i)$  为  $P_m$  回波经 LRWC 后在多普勒域内的方位调制项, 在距离-多普勒域内补偿。 $\tau_{R_{Rm}}(f_i)$  为  $P_m$  回波经 LRWC 后在多普勒域内的相位中心时刻, 是决定数据块中各点目标回波距离徙动的主要因子。

(2)  $\varphi_{\Delta R_R}(f_i)$  为  $P_0$  回波相对于  $P_m$  回波在多普勒域内的方位调制变化差值, 在距离-多普勒域内补偿。 $\alpha(f_i)$  为 LRWC 后的距离徙动因子, 反映了  $P_0$  回波相对于  $P_m$  回波在多普勒域内的距离徙动变化差值, 距离徙动校正方法(如 RDA, CSA 等)即是将其值变为零以消除回波距离空变性<sup>[7]</sup>。 $\varphi_1(f_i)$  为点目标在多普勒域内的方位位置。

为分析 LRWC 后的回波频谱特性, 基于图 2 仿真参数对距离徙动因子, 新距离调频率, 高阶耦合相位项的距离空变性进行仿真分析。图 3(a)为原始

回波与 LRWC 后回波  $\alpha(f_i)$  的比较结果。由图 3(a)可知, 双站大斜视模式下, 原始回波的  $\alpha(f_i)$  值很大, 表明回波距离徙动空变性很大, 但 LRWC 后  $\alpha(f_i)$  显著减小, 变化差值仅为原始回波的约 1/300, 说明 LRWC 有效减小了回波的距离徙动空变性。考虑  $R_{R0}$  分别为 16 km, 18 km, 20 km 的 3 个点目标  $P_0, P_1, P_2$ , 图 3(b)给出了  $k_s$  的距离空变性, 图 3(b)表明,  $P_1$  与  $P_2$  相对于  $P_0$  的调频率变化差值非常小, 仅为  $P_0$  调频率值的  $0.67 \times 10^{-5}$ , 故可忽略式(16)的近似对成像的影响<sup>[14]</sup>。图 3(c)给出了  $O(f_r^n, f_i; R_{R0})$  最大相位值的距离空变性, 由图 3(c)可知, LRWC 后高阶耦合项具有非常弱的距离空变性, 且相位值远小于  $\pi/4$ , 可忽略其对成像的影响。

综上, 本文 LRWC 方法很好地削弱了双站大斜视带来的回波频谱 2 维强耦合, 且回波距离空变性大大减小, 故可采用传统的单站 SAR 成像方法消除回波距离空变性得到成像结果。CS 方法运用相位函数相乘校正距离徙动, 避免了插值运算, 是一种高效简捷的距离徙动校正方法<sup>[7,13]</sup>, 本文采用 CS 方法构建成像算法。

### 4.2 目标位置偏移校正

LRWC 在校正距离走动的同时, 使得原本位于不同斜距处的目标位于同一斜距, 导致目标产生距离向位置偏移。为获得正确的成像结果, 需校正因 LRWC 带来的位置偏移, 其可视为 LRWC 的逆过程, 在距离频域-方位时域乘以一相位函数完成, 相位函数表达式为

$$H_{GC,R}(f_r, t; R_{Rm}, t_{Rm}) = \exp\{j2\pi f_{dc,m}(1 + f_r/f_c)t\} \quad (25)$$

校正距离向位置偏移后, 由于双站斜视工作, 目标存在方位向的线性倾斜, 其倾斜相位函数为  $\exp\{j2\pi f_{dc}t\}$ 。实际上, 并行双站 SAR 回波的距离空变性决定其多普勒质心也具有距离空变性, 从而使同一方位向不同距离向的点目标存在方位向位置

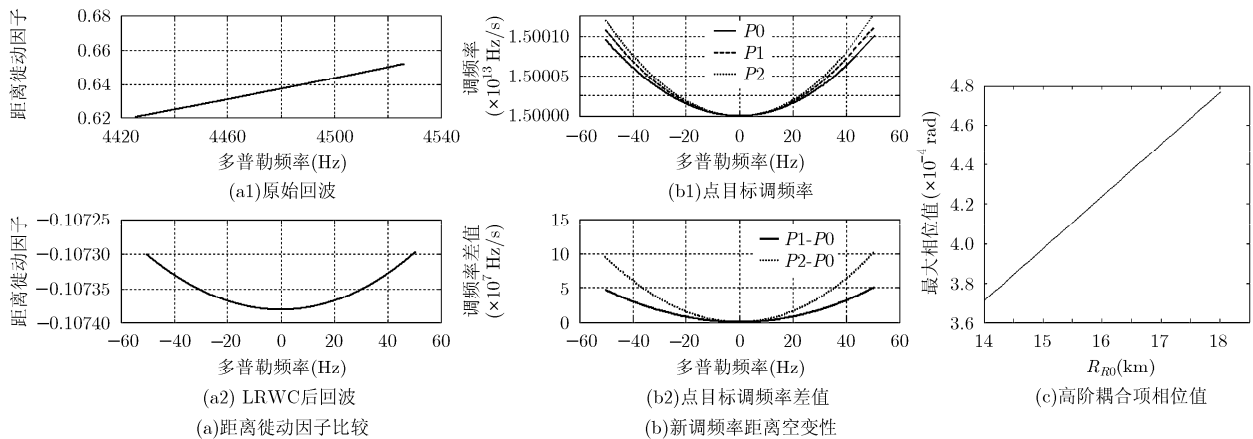


图 3 LRWC 后频谱特性

偏移。以中心点目标  $P_m(x_m, y_m, 0)$  为参考, 数据块内与  $P_m$  在同一方向不同距离向的点目标为  $P_1(x_m + \Delta x, y_m, 0)$ ,  $\Delta x$  为  $P_1$  相对于  $P_m$  在地面坐标系下的距离偏移。运用数值计算方法可将  $P_1$  与  $P_m$  的多普勒质心差值表示为  $\Delta x$  的函数:

$$\Delta f_{dc}(\Delta x) = \rho_{RA} \Delta x \quad (26)$$

$$\rho_{RA} = \frac{v}{\lambda} \left( \frac{(y_m - y_T)(x_T - x_m)}{R_{Tc, P_m}^3} + \frac{(y_m - y_R)(x_R - x_m)}{R_{Rc, P_m}^3} \right) \quad (27)$$

则校正  $P_1$  的方位位置偏移函数为

$$H_{GC,A}(\Delta x, t) = \exp\{-j2\pi\rho_{RA}\Delta xt\} \quad (28)$$

$P_1$  与  $P_m$  在地面坐标系下的距离偏移  $\Delta x$  与成像场景坐标下的距离偏移  $R_{B, P_1} - R_{B, P_m}$  关系可表示为

$$\Delta x = \rho_{BR} (R_{B, P_1} - R_{B, P_m}) \quad (29)$$

其中  $\rho_{BR}$  为一常数值, 其表达式可通过将  $P_1$  的斜距历程在  $\Delta x = 0$  处做 Taylor 展开得到

$$\rho_{BR} = 1/\left[-(x_T - x_m)/R_{Tc, P_m} - (x_R - x_m)/R_{Rc, P_m}\right] \quad (30)$$

具体校正目标位置偏移时, 第 1 步是根据式(25)校正因 LRWC 带来的距离向位置偏移, 第 2 步是根据式(29)将目标位置从成像场景坐标转换到地面场景坐标, 第 3 步是根据式(28)校正目标方位向位置偏移, 至此, 成像结果将正确聚焦在地面场景坐标系下。

### 4.3 算法流程

本文构建的机载并行双站大斜视 SAR 两步式成像算法流程图如图 4。决定回波距离分块的主要因子为残余距离徙动与二阶相位误差, 可借鉴文献[15]的数据分块准则进行分块。

(1)  $H_{LRWC}(f_r, t)$  为 LRWC 函数, 表达式见式(6)。

(2)  $H_1(\tau, f_t)$  用于补余距离徙动校正:

$$H_1(\tau, f_t) = \exp\left\{j\pi k_s \alpha(f_t) (\tau - \tau_{R_{Rm}}(f_t))^2\right\} \quad (31)$$

(3)  $H_2(f_r, f_t)$  用于距离压缩, 一致残余距离徙动校正以及补偿回波双站扭曲项:

$$H_2(f_r, f_t) = \exp\left\{j\pi \frac{f_r^2}{k_s [\alpha(f_t) + 1]}\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi [\tau_{R_{Rm}}(f_t) - \tau_0] f_r\right\} \cdot \exp\left\{j\Psi_2(f_r, f_t; R_{Rm}, t_{Rm})\right\} \quad (32)$$

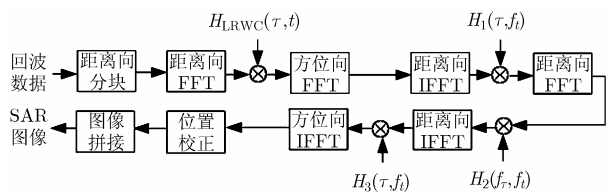


图 4 本文算法流程图

式中  $\tau_0$  为数据块中心点目标的回波时延。

(4)  $H_3(\tau, f_t)$  用于方位压缩与补偿因调频变标引起的剩余相位:

$$H_3(\tau, f_t) = \exp\left\{j\varphi_{\Delta R}(f_t) + j\varphi_{R_m}(f_t) - j\pi k_s \alpha(f_t) [\alpha(f_t) + 1] (2\Delta R/c)^2\right\} \quad (33)$$

## 5 仿真分析

为验证本文算法, 设收、发载机相对中心点目标的最近斜距为 13.41 km 与 19.84 km, 收、发载机斜视角分别为  $38^\circ$  与  $37.46^\circ$ , 双站基线长度为 8 km, 距离采样率为 300 MHz, PRF 为 250 Hz, 载机高度与 LFM 信号参数见图 2 仿真参数。观测场景选取为地面场景坐标下距离向间隔 600 m, 方位向间隔 100 m 的 9 个点目标。根据双站参数, 计算得到距离向数据块大小为 2.12 km, 目标位置校正系数  $\rho_{RA} = -0.1439$ ,  $\rho_{BR} = 0.6989$ 。

图 5 给出了本文算法的成像结果。从图 5(a)可知, 成像良好, 但由于 LRWC 与多普勒质心的距离空变性, 导致点目标在距离向和方位向均存在位置偏移。经目标位置校正后, 点目标在距离向和方位向均较好地聚焦在正确的位置, 如图 5(b)所示, 其中点目标 A 的位置坐标为  $(-598.90 \text{ m}, 0.59 \text{ m})$ , 点目标 B 的位置坐标为  $(600.80 \text{ m}, -0.72 \text{ m})$ , 其相对于真实位置偏移均小于一个分辨单元, 验证了本文推导的目标位置校正方法的有效性。

图 6 给出了图 5(b)中同一方位向不同距离向的 3 个点目标成像结果的等高线图(均未加窗函数), 由图 6 可知, 算法对相距 1.2 km 的 3 个点目标在距离向和方位向均能很好地聚焦。

表 1 给出了图 5(b)中标识的 5 个点目标的成像结果性能参数, 包括点目标沿距离向和方位向的峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)的测量值(均未加窗函数)。由表 1 可知, 算法在双站大斜视情况下的点目标成像指标均接近理论值, 成像结果理想, 表明算法能很好地解决机载并行双站大斜视 SAR 成像问题。

为进一步说明算法成像性能, 图 7 给出了本文算法, 文献[7]算法, 文献[9]算法以及未进行 LRWC 的 CSA(算法流程图中令  $f_{deT}$  与  $f_{deR}$  均为零)对点目标 O 的成像性能比较结果(均未加窗函数)。由图 7 可知, 双站大斜视带来的回波 2 维强耦合及大距离徙动空变性, 使得文献[7]基于 LBF 的 CSA 与未进行 LRWC 的 CSA 成像结果在距离向和方位向均出现严重散焦, 成像结果差。本文的 LRWC 方法很好地消除了双站大斜视工作的影响, 算法成像性能与

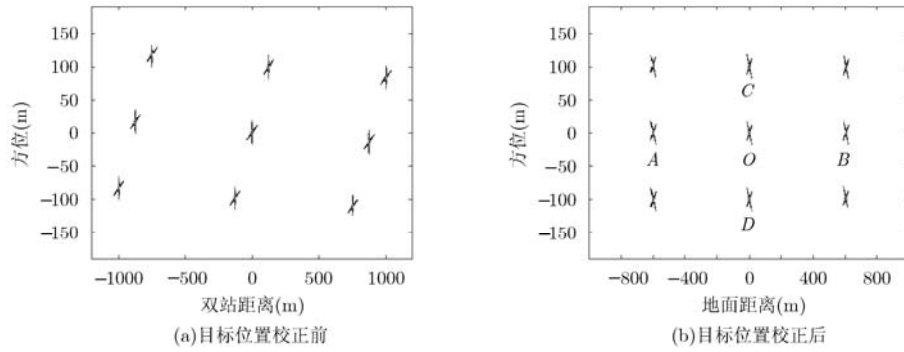


图 5 算法成像结果

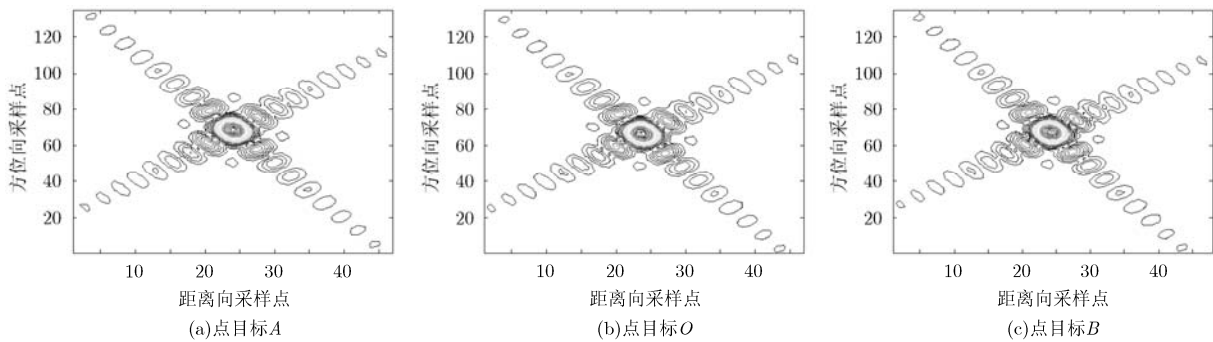


图 6 部分点目标成像结果

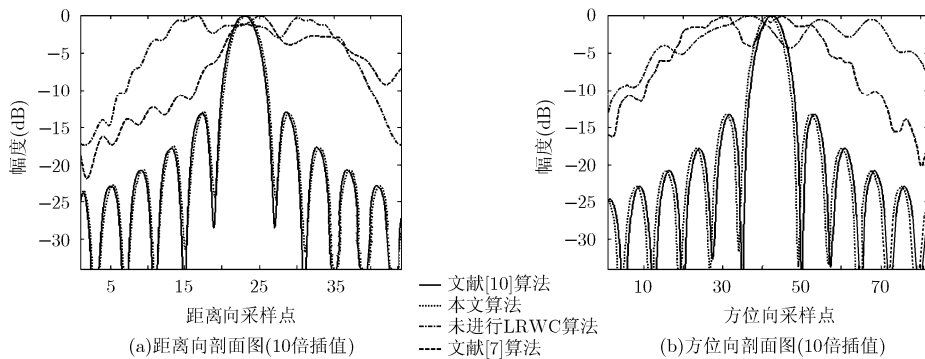


图 7 算法成像性能比较

表 1 部分点目标成像性能指标

		点目标 A	点目标 B	点目标 O	点目标 C	点目标 D
PSLR(dB)	距离向	-13.46	-13.49	-13.18	-13.22	-13.17
	方位向	-13.38	-13.44	-13.25	-13.28	-13.21
ISLR(dB)	距离向	-10.31	-10.35	-10.12	-10.14	-10.15
	方位向	-10.28	-10.31	-10.17	-10.19	-10.14

文献[9]基于 MSR 的 RDA 成像性能基本一致,但避免了插值操作校正距离徙动,故提高了成像效率。

### 6 结束语

本文提出的两步式成像算法立足于机载并行双站 SAR 大斜视工作模式。算法流程基于精确的解析表达式,只包含 FFT 和相位函数相乘,保留了原始

CS 方法保相、精确高效的优点,成像结果理想。推导的目标位置偏移校正方法能很好地解决观测场景内任一点目标的位置偏移问题,得到了地面场景坐标系下观测场景点目标的精确成像结果。此外,算法在调整双站系统参数的基础上,可进一步拓展到其它双站模式,如星载并行双站大斜视 SAR 成像。

## 参 考 文 献

- [1] Walterscheid I, Ender J, Brenner A, *et al.* Bistatic SAR processing and experiments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2710-2717.
- [2] Zhang S, Xing M, Xia X, *et al.* Focus improvement of high-squint SAR based on azimuth dependence of quadratic range cell migration correction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 150-154.
- [3] An D, Huang X, Jin T, *et al.* Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR data focusing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3595-3609.
- [4] Ding Y and Munson D. A fast back-projection algorithm for bistatic SAR imaging[C]. Proceedings of International Conference on Image Processing, Orlando, USA, 2002, 2: 449-452.
- [5] Zhang Z, Xing M, Ding J, *et al.* Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [6] Zare A, Masnadi S, and Samadi S. Range-Doppler algorithm for processing bistatic SAR data based on the LBF in the constant-offset constellation[C]. 2012 IEEE Radar Conference (RADAR), Atlanta, GA, 2012: 17-21.
- [7] Wang R, Loffeld O, Nies H, *et al.* Chirp-scaling algorithm for bistatic SAR data in the constant-offset configuration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 952-964.
- [8] 武拥军, 吴先良. 基于CZT的机载并行双站斜视SAR成像算法[J]. *航空学报*, 2010, 31(4): 825-830.  
Wu Yong-jun and Wu Xian-liang. Airborne bistatic SAR imaging algorithm for parallel squint mode based on CZT[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 825-830.
- [9] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14-21.
- [10] Liu B, Wang T, Wu Q, *et al.* Bistatic SAR data focusing using an omega-K algorithm based on method of series reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2899-2912.
- [11] 易予生, 张林让, 刘昕, 等. 双站SAR图像几何失真校正方法研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(2): 231-234.  
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu Xin, *et al.* Method for geometric distortion correction of the bistatic SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(2): 231-234.
- [12] Wang R, Loffeld O, Ul-Ann Q, *et al.* A bistatic point target reference spectrum for general bistatic SAR processing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 5(3): 517-521.
- [13] Zaugg E and Long D. Generalized frequency-domain processing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(11): 3761-3773.
- [14] 王亮, 黄晓涛, 周智敏. 非线性Chirp Scaling在机载SAR成像中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(5): 723-727.  
Wang Liang, Huang Xiao-tao, and Zhou Zhi-min. Application of nonlinear chirp scaling in airborne SAR imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 723-727.
- [15] Wong F H, Cumming I G, and Neo Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493-2505.
- 冉金和: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像算法.
- 张剑云: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达及目标环境模拟、雷达信号处理、高速信号处理.
- 武拥军: 男, 1970年生, 硕士生导师, 研究方向为天线技术与微波成像.