

星载 TOPSAR 方位变标成像算法

徐 伟^{1,2}, 邓云凯¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: Burst 工作模式和方位波束主动扫描使得 TOPSAR 回波信号同时存在多普勒频率混叠和方位输出时间混叠的问题. 时域和频域同时升采样操作的“全孔径”方法虽然能够解决混叠问题, 但同时带来成像运算量和内存消耗显著增加. 根据星载 TOPSAR 回波特殊的方位时频关系, 提出了一种结合方位变标操作的 CS 成像算法. 方位变标操作可以避免“子孔径”分块和拼接操作, 且更加有利于方位“锯齿状”天线方向图的补偿, 同时该算法不需要进一步的方位时域扩展, 从而大大提高了成像算法的效率. 文中点目标和分布目标的仿真结果验证该算法的有效性.

关键词: TOPSAR; 脉冲串模式; 混叠; 天线方向图补偿; CS 算法

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0913-06

Processing of Spaceborne TOPSAR Data Using Azimuth Scaling

XU Wei^{1,2}, DENG Yun-kai¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Burst mode scheme and azimuth beam steering lead to the aliasing phenomenon of TOPSAR data existing in both the Doppler frequency and the azimuth output time domain. The “full-aperture” imaging approach with up-sampling operation in both azimuth time and frequency domain can overcome the aliasing problem. However, it brings an unwanted result of seriously increased computational complexity and memory consumption. Based on the special spaceborne TOPSAR raw data support in the slow time/frequency domain (TFD), a new imaging approach combined with azimuth scaling operation and chirp scaling algorithm (CSA) is proposed in this paper. In this approach, sub-aperture formation and recombination are avoided and the sawtoothed azimuth antenna pattern correction can be easily implemented. As azimuth data extension in the output time domain is not required, efficiency of the presented algorithm is seriously improved. Simulation results of point and distributed targets validate the presented algorithm.

Key words: TOPSAR (terrain observation by progressive scans); burst mode; aliasing; antenna pattern correction; chirp scaling algorithm

1 引言

星载 ScanSAR 模式采用 Burst 工作方式周期性地调整距离向波束指向来获取宽幅测绘能力^[1]. 但方位主波束对目标的不完全照射使得 ScanSAR 图像中存在明显的扇贝效应, 同时系统的方位模糊比和输出信噪比都会随着目标方位位置而改变, 这些都不利于后续的干涉处理. 针对 ScanSAR 的缺陷, 2006 年 Zan^[2]给出了一种新型的星载 SAR 工作模式, 即 TOPSAR (Terrain Observation by Progressive Scans) 模式. 该模式利用 Burst 工作方式和方位波束主动扫描来获取宽幅测绘能力, 而且方位波束主动扫描能很好地削弱 ScanSAR 模式的扇贝效应和模糊比与信噪比在方位向严重不一致问题^[2]. 星载 TOPSAR 模式强大的宽幅测绘能力及其优良的系统性能使其很

快被运用到工程中. 2007 年, 德国宇航中心 (DLR) 利用 TerraSAR-X 卫星成功获得了第一张星载 TOPSAR 图像及干涉结果^[3,4]. 目前, 欧洲宇航局 (ESA) 也正准备在 Sentinel-1 卫星利用 TOPSAR 模式来替代传统的 ScanSAR 模式, 从而来获得宽幅干涉图像^[3,4].

Burst 工作模式和方位波束主动扫描使得星载 TOPSAR 回波兼有 ScanSAR 回波方位输出时间混叠^[5]和聚束/滑动聚束回波多普勒频谱混叠^[6]的问题. 方位向频域和时域的升采样操作能够分别解决输出时间混叠和多普勒频谱混叠的问题, 但同时升采样操作大大增加了方位向总采样点数, 使得成像算法运算量和内存消耗显著提高. 针对 TOPSAR 方位回波特殊的时频关系, 本文提出了一种结合方位变标操作的 CS 成像算法, 这种成像算法主要有三大优势: (1) 它能够很好地解决方位频

谱混叠问题同时避免了“子孔径”分块和拼接操作;(2)方位变标操作便于方位向“锯齿状”天线方向图的补偿;(3)在方位时间不进行扩展的前提下就能得到不混叠时域聚焦的 TOPSAR 图像,从而大大提高了算法的效率.文中点阵目标和分布目标的成像结果验证了这种成像算法的有效性.

2 星载 TOPSAR 工作原理

TOPSAR 是一种新型星载 SAR 工作模式,它结合了 ScanSAR 和滑动聚束模式的共同特点,它的几何工作模型如图 1 所示.在距离向上与 ScanSAR 相同,都采用 Burst 工作方式合理分配雷达在各条子测绘带上的工作时序,通过多条子测绘带拼接形成较宽的测绘区域;而在方位向上则采用

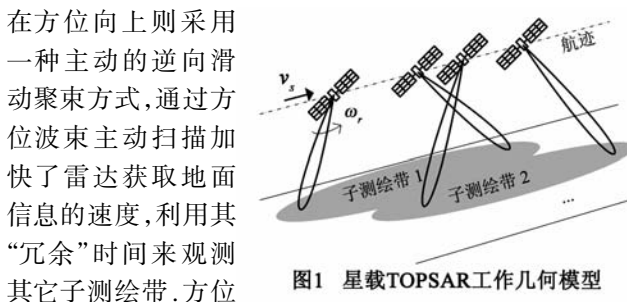


图1 星载TOPSAR工作几何模型

一种主动的逆向滑动聚束方式,通过方位波束主动扫描加快了雷达获取地面信息的速度,利用其“冗余”时间来观测其它子测绘带.方位向的逆向滑动聚束扫描方式可以让所有目标都被完整的方位主波束照射,从而削弱了 ScanSAR 模式下的扇贝效应和模糊比与信噪比在方位向严重不一致问题^[2].与 ScanSAR 模式相同,星载 TOPSAR 模式也是通过牺牲方位分辨率来获得较大的测绘带宽.

3 星载 TOPSAR 回波

3.1 回波模型

星载 TOPSAR 回波平面几何模型如图 2 所示.假设雷达发射的是线性调频信号,则雷达在一个 Burst 数据块内获得的基带回波数据可以表示为:

$$s_r(t, \tau) = \iint_{\text{scene}} \sigma(x, r) ss(t, \tau; x, r) dx dr \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} ss(t, \tau; x, r) = & W_a \left[\frac{vt - x}{X} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t; r, x) \right] \\ & \times \exp \left\{ -j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R(t; r, x)}{c} \right]^2 \right\} \\ & \times \text{rect} \left[\frac{\tau - 2R(t; r, x)/c}{\tau_p} \right] \text{rect} \left[\frac{t}{T_b} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$R(t; r, x) = \sqrt{r^2 + (v_s t - x)^2} \quad (3)$$

其中: \$\sigma(x, r)\$ 表示 \$(x, r)\$ 处目标的散射系数, \$t, \tau\$ 分别对应系统的慢时间和快时间, \$W_a[\cdot]\$ 表示方位向天线方向图, \$X\$ 表示波束“足印”的长度, \$K_r\$ 和 \$\tau_p\$ 分别表示发射

线性调频信号的调频率和脉冲宽度, \$v_s\$ 和 \$v_f\$ 分别为雷达平台的有效速度和波束在地面的移动速度, \$T_b\$ 表示方位向波束在子测绘带的驻留时间, \$c\$ 表示光速.

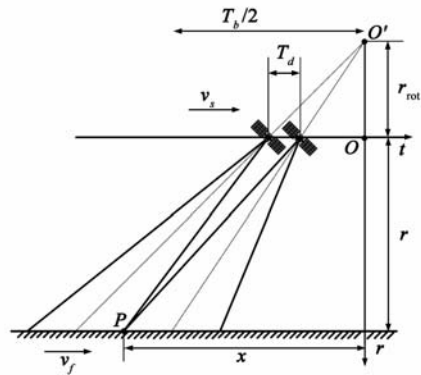


图2 TOPSAR的回波平面几何模型

根据图 2 的几何关系,可以容易得到下面关系:

$$A = \frac{-r_{rot} + r}{-r_{rot}} = \frac{v_f}{v_s} \approx \frac{\omega_r r + v_s}{v_s} \quad (4)$$

式中: \$A\$ 为分辨率改变因子.此时 \$r_{rot} = -v_s/\omega_r\$, 这说明在同一 Burst 数据块中,方位波束扫描有一个固定的虚拟旋转中心 \$O'\$, 它的位置与目标在测绘带的位置无关.此时 TOPSAR 目标回波的多普勒中心随方位时间 \$t\$ 的变化率可以表示为:

$$k_{rot} = \frac{\partial f_{dc}(t)}{\partial t} = \frac{2v_s \omega_r}{\lambda} = -\frac{2v_s^2}{\lambda r_{rot}} \quad (5)$$

式中: \$f_{dc}(t)\$ 表示目标的多普勒中心频率.由式(5)可得,目标的多普勒中心频率随方位时间的变化率近似为常数.

3.2 方位回波时频关系

星载 TOPSAR 回波信号与传统条带模式的差异主要体现在方位向上,为了简化分析,这里只分析回波信号中的方位向部分,此时式(2)可以写成:

$$\begin{aligned} ss_a(\tau, t; x, r) = & \text{rect} \left[\frac{vt - x}{X} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \\ & \times \text{rect} \left[\frac{t}{T_b} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t; x, r) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\Delta R(t; x, r) \approx \frac{(v_s t - x)^2}{2r} \quad (7)$$

式(7)中忽略了二次以上的高阶项,这主要是为了便于分析 TOPSAR 回波方位时频关系.根据驻点相位原理,式(6)的方位频谱表达式可以写成:

$$\begin{aligned} sS_a(\tau, f_a; x, r) = & \text{rect} \left[\frac{f_a + (x/v_s - x/v_f)k_a}{B_d} \right] \\ & \times \text{rect} \left[\frac{f_a/k_a + x/v_s}{k_a T_b} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \\ & \times \exp \left[-j\pi f_a^2/k_a - j2\pi f_a \frac{x}{v_s} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $k_a = -2v_s^2/\lambda r$

根据式(6)和(8),可以得到 TOPSAR 回波信号方位时频关系如图 3 所示.图 3 中 B_b 和 B_d 分别表示方位向总带宽和点目标多普勒带宽, T_d 和 B_f 分别对应方位波束在目标上的驻留时间和方位波束带宽, t_c 和 t_z 分别对应某点目标的波束中心时刻和多普勒为零的时刻.从图 3 可得到 TOPSAR 回波方位时频关系具有以下的特点:(1)目标的多普勒中心频率和波束中心时刻都随目标方位位置的变化而变化;(2)系统数据采集时间 T_b 要小于 TOPSAR 图像的最后输出时间 T_{out} ; (3)方位向总带宽要大于系统的 PRF,而点目标多普勒带宽要小于 PRF.

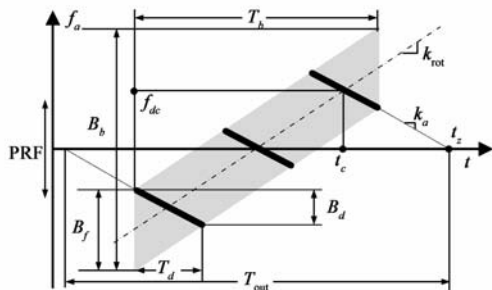


图3 TOPSAR回波方位时频关系

在 SAR 成像算法中,其中要解决的最主要问题是距离徙动校正(RCMC),RCMC 与目标的多普勒瞬时频率有关,所以必须首先解决 TOPSAR 场景回波多普勒混叠问题.文献[4]利用“子孔径”分块方法,将一个完整 Burst 回波数据分成若干个具有一定重叠度的数据块,且每块回波数据都不存在多普勒频谱混叠问题,然后分别对每块数据进行 RCMC,最后再在方位时域完成数据块的拼接.此时数据块的长度 T_{Block} 必须满足下面的条件:

$$T_{Block} \leq \frac{PRF - B_f}{k_{rot}} = \frac{(k_s - 1) B_f}{k_{rot}} \quad (9)$$

式中: B_f 表示方位向波束带宽, k_s 表示方位向过采样率.由式(9)可得,当方位向过采样率较小(星载 SAR 方位向过采样率通常为 1.1 ~ 1.4^[7])和 k_{rot} 取值较大时,“子孔径”数据块长度会较短且数量会很多,这在一定程度上影响了成像的效率和质量.如果采用时域升采样的方法来解决方位向频谱混叠,此时要求方位向总采样点数必须从 $PRF \cdot T_b$ 增加到 $B_b \cdot T_b$.同时考虑到 TOPSAR 方位回波还存在着输出时间混叠问题,如果要直接采用传统条带模式的成像算法,方位时间需要进一步从 T_b 扩展到 $A \cdot T_b$.方位向两次升采样操作大大增加了总采样点数,此时方位向总采样为 $B_b \cdot A \cdot T_b$,所以这种“全孔径”的成像方法是十分低效的.

4 TOPSAR 成像算法

由图 3 可得, TOPSAR 方位回波时频关系呈“倾斜

状”,本文根据 TOPSAR 方位回波这一特殊的时频关系,提出了一种基于方位变标的成像算法,这种算法不仅不需要对 Burst 回波数据进行“子孔径”数据分块和拼接操作,而且它能完成对“锯齿状”天线方向图的校正,同时这种方法在不进行方位时域扩展的前提下得到不混叠的时域聚焦 SAR 图像.这种算法的流程如图 4 所示,主要分为两大部份:解决方位频谱混叠的方位变标预处理操作和结合方位变标的 CS 成像算法.

4.1 基于时域升采样的方位变标预处理

基于时域升采样的方位变标预处理主要是为了解决方位多普勒混叠的问题.本文采用方位变标和频域补零操作来完成时域升采样,同时这种方法更利于“锯齿状”方位天线方向图的补偿.基于时域升采样的方位变标预处理过程如图 5 所示.

基于时域升采样的方位变标预处理过程主要由以下几步组成:

(1)利用去斜函数 $h_d(t)$ 移除随方位位置变化的目标多普勒中心,去斜函数 $h_d(t)$ 可以表示为:

$$h_d(t) = \exp[-j\pi k_{rot}(t - t_{sc})^2] \quad (10)$$

式中: t_{sc} 表示 Burst 中心时刻(为了便于分析这里设定 $t_{sc} = 0$).经方位变标去斜后,方位回波的场景多普勒带宽与点目标多普勒带宽相同,均为 B_{d1} :



图5 基于时域升采样的方位变标预处理

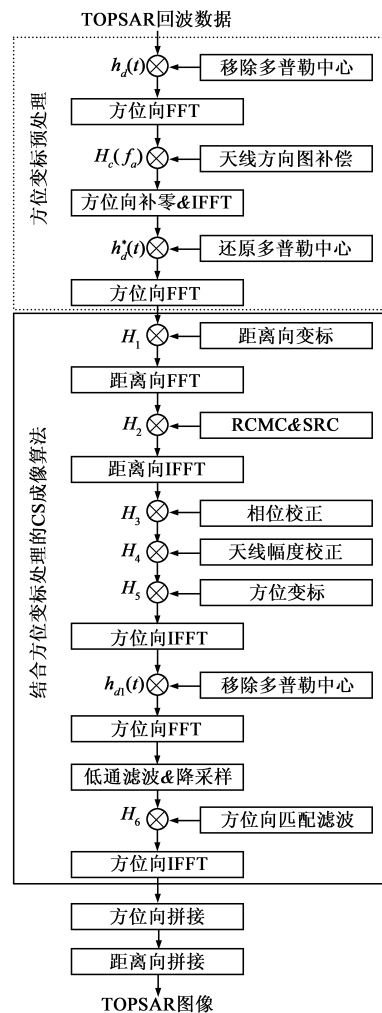


图4 星载TOPSAR成像算法流程图

$$B_{d1} = \frac{B_d \cdot (|k_a| + k_{rot})}{|k_a|} = A \cdot B_d = B_f < \text{PRF} \quad (11)$$

从式(11)可得,方位变标去斜操作能够使方位向总带宽小于系统 PRF,从而不会发生多普勒混叠现象。

(2)将方位回波信号从时域转换到频域,然后在频域区间 $[-B_b/2, -\text{PRF}/2]$ 和 $[\text{PRF}/2, B_b/2]$ 处补零,最后再将方位回波信号恢复到时域。

(3)由于 RCMC 与方位回波信号的多普勒瞬时频率有关,所以必须利用去斜函数 $h_d(t)$ 的共轭函数 $h_d^*(t)$ 还原目标回波信号的原始多普勒历程,这样就完成了对星载 TOPSAR 回波信号的方位时域升采样操作。

4.2 方位向“锯齿状”天线方向图补偿

星载 TOPSAR 模式要求天线波束在距离向和方位向上都能进行扫描,所以系统通常采用具有二维电扫能力的平面相控阵天线。但由于相控阵天线移相器位数的离散性及虚位技术的使用,使天线波束指向位置也是离散的,相邻两个波束指向之间的角度间隔被称为波束跃度^[8]。所以星载 TOPSAR 模式在实现方位波束扫描的过程是一个非连续的过程,这种非连续的步进扫描方式使得方位合成天线方向图不再是理想的 sinc 函数而是带有“锯齿”的曲线,在方位压缩时这会导致成对回波的产生从而影响 SAR 图像的质量^[3],所以必须对方位向“锯齿状”天线方向图进行补偿。

由于星载 TOPSAR 回波信号的目标多普勒中心频率和波束中心时刻都随着目标方位位置而变化,这给“锯齿状”天线方向图的补偿带来了困难。当随方位位置变化的多普勒中心被移除后,就可以采用统一的方向图校正函数 $H_c(f_a)$ 完成“锯齿状”天线方向图的补偿。假设波束跃度采用下式(12)的量化方法对整个方位扫描范围进行量化^[2]:

$$\theta_q = \theta - \text{mod}(\theta, q) + q/2 \quad (12)$$

式中: θ_q 为量化后实际波束指向, θ 为理论上要求的波束指向, q 为波束跃度, $\text{mod}(\cdot)$ 表示取余运算。此时方位频域方向图校正函数 $H_c(f_a)$:

$$H_c(f_a) = \left\{ \text{sinc} \left[\frac{L_{ae} \omega_r}{\lambda k_{a1}} \cdot \varphi(f_a) \right] \right\}^{-2} \quad (13)$$

其中

$$\varphi(f_a) = f_a - f_{sdc} - \text{mod}(f_a - f_{sdc}, B_q) + \frac{B_q}{2} + \frac{v_s(f_a - f_{sdc})}{r\omega_r} \quad (14)$$

$$B_q = \frac{q}{\omega_r |k_{a1}|} \quad (15)$$

$$k_{a1} = -\frac{2v_s^2}{\lambda r \beta(f_a)} - k_{rot} \approx -\frac{2v_s^2}{\lambda r} - k_{rot} \quad (16)$$

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_s} \right)^2} \quad (17)$$

式中: f_{sdc} 表示场景中心的多普勒中心频率。

4.3 基于方位变标的 CS 成像算法

图 4 中的传递函数 H_1 , H_2 和 H_3 分别用来完成距离向变标处理,距离徙动校正与距离压缩和残余相位补偿,根据参考文献[9]可以得到:

$$H_1 = \exp \left\{ -j\pi k(f_a; r_{ref}) \left[\frac{1}{\beta(f_a)} - 1 \right] \left(\tau - \frac{2r}{c\beta(f_a)} \right)^2 \right\} \quad (18)$$

$$H_2 = \exp \left\{ -j\pi \frac{\beta(f_a) f^2}{k(f_a; r_{ref})} + j\pi \frac{4r_{ref}[1 - \beta(f_a)]f}{c\beta(f_a)} \right\} \quad (19)$$

$$H_3 = \exp \left\{ -j4\pi \frac{k(f_a; r_{ref})[1 - \beta(f_a)]}{c^2 \beta^2(f_a)} (r - r_{ref})^2 \right\} \quad (20)$$

式中: r_{ref} 表示参考最短斜距, $k(f_a; r_{ref})$ 表示距离向变标后的参考斜距处的调频率^[9]。

星载 TOPSAR 系统通常采用具有二维电扫能力的平面相控阵天线,而平面相控阵天线方向图受单个阵元天线方向图的幅度调制。TOPSAR 系统中随目标方位位置变化有限的斜视角使得 TOPSAR 图像中存在着残余的扇贝效应,但它要明显好于传统的 ScanSAR 模式^[3],它可以通过校正函数 H_4 进行校正。假设方位向天线方向图采用均匀加权方式,则校正函数 H_4 可以表示为:

$$H_4(f_a) = \text{sinc}^{-2} [L_{ae}(f_a - f_{sdc}) \cdot \beta(f_a) / (2v_s)] \quad (21)$$

式中: L_{ae} 表示方位向单个阵元天线长度。

在 Burst 工作模式下,由于系统方位回波信号数据采集时间 T_b 要小于最后的图像输出长度 T_{out} ,最后输出的 SAR 图像会发生混叠。文献[2,5]采用了一种复制拼接和去斜的后处理方法,它能有效地解决 SAR 图像混叠的问题,但由于复制拼接操作大大增加了方位向总采样点数故其运算效率也不是很高。根据星载 TOPSAR 特殊的方位时频关系,本文通过方位变标处理来移除随方位位置变化的目标多普勒中心,最后采用统一的方位频域滤波器完成方位向的压缩,目标方位聚焦时刻则对应于目标方位回波信号的中心时刻。经过方位变标处理后,不仅能够有效地压缩成像输出时间,而且场景多普勒总带宽会变小,利用时域降采样(频域低通滤波截取)能够有效地减少方位向总采样点数从而提高成像算法的效率,如图 6 所示。

基于时域降采样的方位变标处理过程主要由以下几步组成:

(1)首先利用方位 FFT 操作将距离向已经压缩的星载 TOPSAR 回波信号从距离-多普勒域转换到距离-时间域。

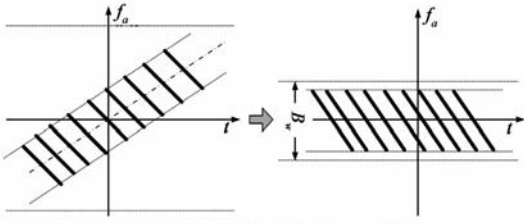


图6 基于时域降采样的方位变标

(2)利用时域去斜函数 $h_d(t)$ 移除随方位位置变化的目标多普勒中心。

(3)利用多普勒频域低通滤波器截取有效的信号,如图6所示,其中低通滤波器的带宽 B_w 必须满足下面的关系:

$$B_w \geq B_{d1} = B_a \quad (22)$$

如果对经过上述方位变标操作后的方位回波信号直接利用文献[9]中的传递函数来进行方位聚焦,由于波束在地面移动与目标的最短斜距 r 有关,它使得地距采样间隔 Δx 也与 r 有关,它可以表示为:

$$\Delta x(r) = \frac{v_f}{B_w} = \frac{Av_s}{B_w} = \frac{v_s}{B_w} \left(1 + \frac{\omega_r r}{v_s} \right) \quad (23)$$

从式(23)中可以看出,由于方位向采样间隔与目标的距离 r 有关,这会导致输出 TOPSAR 图像的扇形畸变.为了解决这个问题,我们先利用传递函数 H_5 可以移除双曲线型相位引入一个二次线性调频相位,其中假设参考斜距 $r_{scl}(r)$ 为 r 的函数,则 H_5 可以表示为:

$$H_5(f_a, r) = \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} r \cdot (\beta(f_a, r) - 1) \right] \times \exp \left[j \frac{\pi \lambda \cdot r_{scl}(r)}{2v_s^2} f_a^2 \right] \quad (24)$$

式(24)中的第一项和第二项都会引起方位时间的偏移,偏移的时间量分别为:

$$t_{p1}(r) = \frac{\lambda r(f_{dc} - f_{sdc})}{2v_s^2 \beta(f_{dc})} \approx \frac{\lambda r(f_{dc} - f_{sdc})}{2v_s^2} \quad (25)$$

$$t_{p2}(r) = - \frac{\lambda r_{scl}(r) \cdot (f_{dc} - f_{sdc})}{2v_s^2} \quad (26)$$

式中: $f_{dc} = f_{sdc} + (t_c - t_{sc})/k_{rot}$ 表示目标的多普勒中心.然后再对方位回波信号进行压缩,此时地距采样间隔 $\Delta x'(r)$ 则可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta x'(r) &= \Delta x(r) + (t_p - t'_p) v_f \\ &= \frac{v_f}{B_w} + \frac{\lambda}{2v_s^2} (r - r_{scl}(r)) \cdot \frac{k_{rot}}{B_w} \cdot v_f \\ &= \frac{v_s + \omega_r r}{B_w v_s} (v_s + \omega_r r - \omega_r r_{scl}) \end{aligned} \quad (27)$$

式中: t_p 和 t'_p 分别表示方位变标后方位向两相邻采样点的时间偏移.如果这里以参考距离 r_0 处的地距间隔为准,即令 $\Delta x'(r) \equiv \Delta x'(r_0)$ 且 $r_{scl}(r_0) = r_0$, 由式(23)和(27)可得:

$$r_{scl}(r) = \frac{2r + \omega_r r^2 / v_s - r_0}{1 + \omega_r r / v_s} \quad (28)$$

此时方位向地距采样间隔为 $\Delta x'(r_0) = v_f(r_0)/B_w$, 它与目标的斜距无关.由于传递函数 H_5 引起方位时间的偏移,所以此时多普勒中心变化率不再是式(5)中的 k_{rot} , 而是 k'_{rot} 可以表示为:

$$k'_{rot} = \frac{f_{dc} - f_{sdc}}{(f_{dc} - f_{sdc})/k_{rot} + t_{p1} + t_{p2}} = \frac{2v_s^2}{\lambda(v_s/\omega_r + r - r_{scl})} \quad (29)$$

此时用于移除随方位位置变化多普勒中心频率的时域去斜函数 h_{d1} 可以表示为:

$$h_{d1} = \exp[-j\pi k'_{rot} t^2] \quad (30)$$

为了得到方位时域聚焦的 TOPSAR 图像,用于方位压缩的匹配滤波函数 H_6 可以表示为:

$$H_6(f_a, r) = \exp[-j\pi(f_a - f_{sdc})^2/k_{a2}] \quad (31)$$

其中 $k_{a2} = -\frac{2v_s^2}{\lambda r_{scl}(r)} - k'_{rot}$ (32)

5 仿真试验

为了验证本文提出成像算法的有效性,分别对点阵目标和分布目标进行仿真成像试验,其中星载 TOPSAR 系统仿真参数如表1所示。

如图7所示,

表1 仿真参数

参数	值
雷达载频 f_c	9.65GHz
方位向波束宽度 θ	0.33°
平台飞行有效速度 v_s	6800m/s
发射带宽 B	15MHz
系统 PRF	3475Hz
波束转动速度 ω_r	3.225°/s
Burst 长度 T_b	0.48s
场景中心斜距 R_c	598km

设置一个点阵场景目标,其相对几何关系如图7(a)所示,其成像结果如图7(b)所示.图8给出了点阵目标中点目标 P1, P2 和 P3 经过插值后点目标的成像结果,从图中可以看出由于点目标 P1 和 P3 位于场景的两侧点目标存在一定的斜视角,但斜视角十分有限. P1, P2 和 P3 对应的斜视角分别为 -0.710° , 0° 和 0.727° . 表2给出了点目标 P1, P2 和 P3 成像性能指标,从表中的数据可以看出,成像结果性能指标与理论值基本相符(其中方位分辨率会随最短斜距发生变化,这里给出的理论值是针对场景中

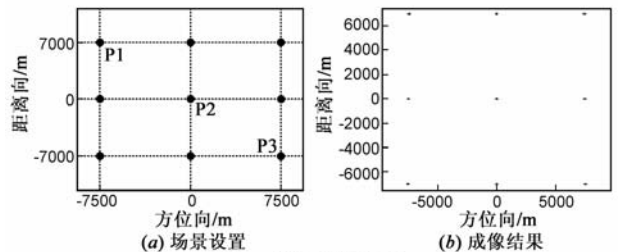
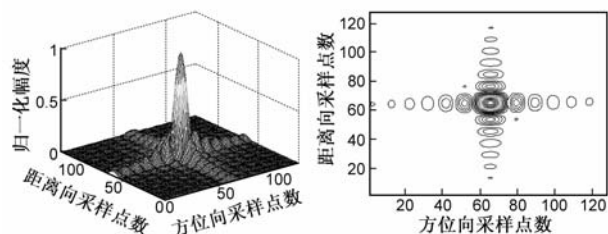


图7 点阵目标仿真

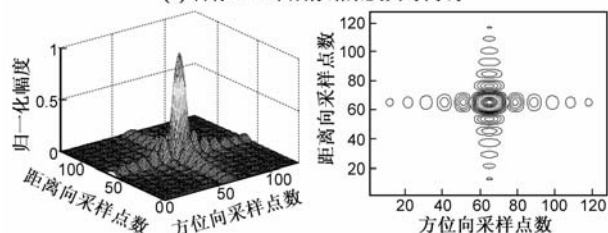
心的点目标),验证了本文提出的成像算法.从表2可以看出,目标方位分辨率随目标斜距的增加而变差.

表2 点目标成像性能参数

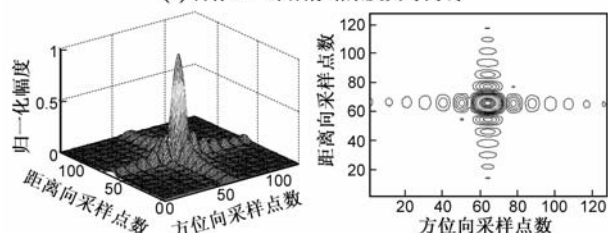
性能	方位向			距离向		
	分辨率 (m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	分辨率 (m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
理论值	14.28	-13.26	-9.80	8.86	-13.26	-9.80
P1	14.39	-13.21	-9.96	8.88	-13.39	-10.18
P2	14.26	-13.19	-10.04	8.86	-13.26	-10.02
P3	14.15	-13.16	-9.94	8.88	-13.29	-10.12



(a) 目标P1三维成像结果及其等高线



(b) 目标P2三维成像结果及其等高线



(c) 目标P3三维成像结果及其等高线

图8 插值后点目标的成像结果

为了进一步验证本文的成像算法,对一个像素大小为 100×100 的分布目标进行成像,其中假设方位向和距离向像素间距均为 8m 小于方位和距离向理论分辨率,图9给出了分布目标的成像结果.

6 结论

本文针对星载 TOPSAR 回波信号的特点,提出了一种结合方位变标的 CS 成像方法.方位变标和频域补零操作解决了场景多普勒混叠问题,利用方位变标操作移除随方位位置变化的多普勒中心能够在方位时间不需要扩展的条件下得到时域聚焦的 TOPSAR 图像,同

时它能够一定程度上减少成像算法的运算量.文中的仿真结果验证了本文成像算法.

参考文献

- [1] 魏杰,周荫清,李春升.星载 ScanSAR 等效斜视距离模型的 ECS 成像算法[J].电子学报,2005,33(9):1545-1548. Wei Jie, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng. Equivalent squint extended chirp scaling algorithm for spaceborne ScanSAR[J]. Acta Electronic Sinica, 2005, 33(9): 1545-1548. (in Chinese)
- [2] Zan F D, Guarnieri A M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans[J]. Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352-2360.
- [3] Meta A, Mittermayer J, Prats P, et al. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. IEEE Trans on Geosciences Remote Sensing, 2010, 48(2): 759-769.
- [4] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. IEEE Trans on Geosciences Remote Sensing, 2010, 48(2): 770-780.
- [5] Guarnieri A M, Prati C. ScanSAR focussing and interferometry[J]. IEEE Trans on Geosciences Remote Sensing, 1996, 34(4): 1029-1038.
- [6] Blecher D P, Baker C J. High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR[J]. IEEE-Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(6): 366-374.
- [7] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Radar: Algorithms and Implementation[M]. Norwood: Artech House, 2005. 140-141.
- [8] 张光义,赵玉洁.相控阵雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2007.15-19. Zhang Guang-yi, Zhao Yu-jie. Techniques of the Phased Array Radar[M]. Beijing: Publish Company of Electronic Industries, 2007. 15-19. (in Chinese)
- [9] Moreira A, Mittermayer J, Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. IEEE Trans on Geosciences Remote Sensing, 1996, 34(5): 1123-1136.

作者简介



徐伟男,1983年8月出生于江苏苏州.2005年和2008年分别在中国矿业大学和南京电子技术研究所获工学学士和工学硕士学位.2008年进入中科院电子学研究所,现为博士研究生.主要从事星载/机载 SAR 系统仿真及其信号处理方面的研究.

E-mail: iecasxuwei@gmail.com

邓云凯男,研究员、博士生导师.1962年出生于湖北.1993年毕业于北京理工大学获工学硕士学位,现为中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部主任,主要从事星载/机载 SAR 系统设计工作.

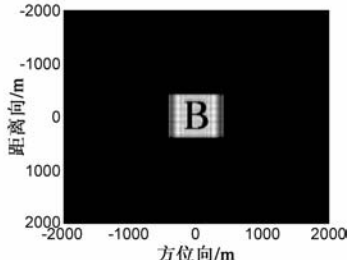


图9 分布目标仿真

