



论 文

基于仿真数据的 HJ-1C 卫星 SAR 成像处理方法

侯明辉

中国资源卫星应用中心, 北京 100094

E-mail: hmh@cresda.com

收稿日期: 2011-08-20; 接受日期: 2011-08-31

全国陆地观测卫星地面处理系统 HJ-1C 卫星数据处理预先研究资助项目

摘要 合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 是对地遥感观测的重要技术手段. 作为民用星载 SAR 的第一颗卫星, HJ-1C 卫星即将发射, 因此文中针对其成像处理中涉及的关键技术开展了研究工作, 包括精确的斜视等效距离模型下的扩展 ECS(extended chirp scaling) 算法的补偿因子、三次相位误差补偿因子形式的分析, 快速的回波数据模拟算法的建模和实现, 以及精确的 Doppler 参数计算方法以及对扫描模式成像算法中拼接环节的算法改进. 通过理论研究分析和仿真验证, 证明基于等效斜视模型的扩展 chirp scaling 算法是适应条带、扫描成像模式的精确算法.

关键词 SAR ECS 斜视等效距离模型 一维频域回波模拟 Doppler 参数

1 引言

“环境和灾害监测小卫星星座”是我国环境和灾害监测系统的空间段部分. 该星座的主要任务是对生态破坏、环境污染和灾害进行大范围、全天候、全天时动态监测, 及时反映生态环境和灾害发生、发展的过程, 对生态环境和灾害发展变化趋势进行预测, 对灾情进行快速评估, 并结合其他手段, 为紧急救援、灾后救助和重建工作提供科学依据.

环境一号卫星“2+1”星座方案由 2 颗光学小卫星 (HJ-1A、B) 和 1 颗合成孔径雷达小卫星构成 (HJ-1C). HJ-1C 的有效载荷是 S 频段合成孔径雷达, 具有全天候全天时成像的能力, 在应用方面也具有独特优势. HJ-1C 的 SAR 有效载荷工作频率为 3200 MHz, 采用 VV 极化方式, 具有 5 m 条带和 20 m 扫描两种成像模式, 幅宽分别为 40 和 100 km, 成像视角为 25°—47°. HJ-1C 设计寿命为 3 年, 星体质量 890 kg, 包括合成孔径雷达、抛物面网状天线 (6×2.8 m)、数据传输、结构和机械、温度控制、姿态和轨道控制、星务监控、电源等若干分系统.

HJ-1C 卫星采用太阳同步晨昏轨道, 高度为 499.226 km, 轨道倾角为 97.37 度, 回归周期为 31 天, 每圈的飞行时间为 94.454 min. 因为可以调整波束指向角度, HJ-1C 卫星在极地以外地区的重访时间最短可以达到 4 天.

HJ-1C 卫星的合成孔径雷达发射最大脉冲重复频率为 3700 Hz 的线性调频信号, 信号带宽为 60 MHz, 脉冲宽度为 33 μ s. 接收信号的采样频率为 66.66 MHz, 经过 BAQ 压缩后经由 X 波段数传系统传输下行.

环境与灾害监测小卫星任务的第一阶段按照计划已于 2008 年发射了 HJ-1A、B 卫星, HJ-1C 预期在 2012 年发射. 为保证地面系统能够及时处理出高质量的 HJ-1C 数据产品, 地面处理系统需要开展预先研究工作, 包括数据仿真以及成像处理算法的验证等.

国际上已有多颗合成孔径雷达卫星投入应用, 其成像算法的研究已经做了大量工作, 理论相对较为成熟, 多篇经典文献如参考文献 4 等都有非常详尽的叙述, 但公开发表的文章相对较早且从地面处理系统工程项目角度来看不是很系统, 为此, 在借鉴国内外成熟算法理论的基础上, 作者在工程项目预研工作中不仅对核心算法进行了实现和验证, 还从基带数据仿真入手, 对数据录入以及 0-2 级产品生产的整个处理流程进行了原型系统开发和测试工作, 为工程项目开展奠定了良好的技术基础.

本文将着重介绍预研工作中比较核心的成像处理算法实现以及数据仿真工作. 其中成像处理算法主要涉及 ECS 成像处理算法, 即考虑处理条带模式全孔径数据成像处理, 也兼顾扫描模式 Burst 子孔径数据成像处理的需要, 并对扫描图像拼接方法进行了改进. 而数据仿真则涉及轨道模拟算法、偏航控制算法、回波模拟算法等.

2 HJ-1C 卫星 SAR 数据成像处理

2.1 星载 SAR 成像星地斜距模型和点目标回波表达

星载 SAR 中, 目标与雷达载体之间的距离 $R(t_a; r)$ 变化规律十分复杂, 没有显式解. 即使星上天线安装时波束指向与平台运动方向垂直, 但是由于地球自转等因素的影响, 雷达平台与目标的相对运动方向与雷达波束指向也不垂直. 斜视等效距离模型误差最小, 是一种比较精确的 SAR 距离模型. 斜视等效距离模型的表达式为^[1,2]

$$R(t_a; r) = \sqrt{r^2 + V^2 t_a^2 - 2rVt_a \cos \phi}. \quad (1)$$

斜视等效距离的几何模型如图 1 所示. 其中, r 为 $t_a=0$ 时的斜距, V 为雷达平台运动的等效速度, ϕ 为等效斜视角, R_s 和 R_t 分别为惯性坐标系中的 SAR 和点目标距离矢量. V 和 ϕ 的计算公式分别为^[1,2]

$$V = \sqrt{\lambda r f_r / 2 + (\lambda f_d / 2)^2}, \quad \phi = \arccos(-\lambda f_d / 2V), \quad (2)$$

其中, f_d 为 Doppler 中心频率, f_r 为 Doppler 调频率, 可以通过星历数据精确计算得到.

建立了雷达和点目标的斜距模型之后, 考虑点目标的表达形式如下.

SAR 发射的一维线性调频信号可以用下式表示:

$$s(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\{j\pi K \tau^2\}. \quad (3)$$

不论是条带还是扫描成像模式, 点目标的 SAR 二维时域回波信号可以表示为

$$ss(t_a, \tau; r) = \sigma W(t_a) \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R(t_a, r)/c}{T_p}\right] \\ \cdot \exp\left\{j\pi K \left[\tau - \frac{2}{c}R(t_a, r)\right]^2\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_a, r)\right\}, \quad (4)$$

其中, c 为光速, λ 为载波波长, K 为线性调频率, σ 为目标后散系数, T_p 为脉宽, T_s 在条带模式下为全孔径波束驻留时间, 在扫描模式时为 ScanSAR 子孔径波束驻留时间, $W(t_a)$ 为方位向天线方向性函数. τ, t_a 分别为距离向和方位向时间. $\text{rect}(t_a)$ 为矩形窗函数, 当且仅当 $|t_a| \leq T_s/2$ 时不为零.

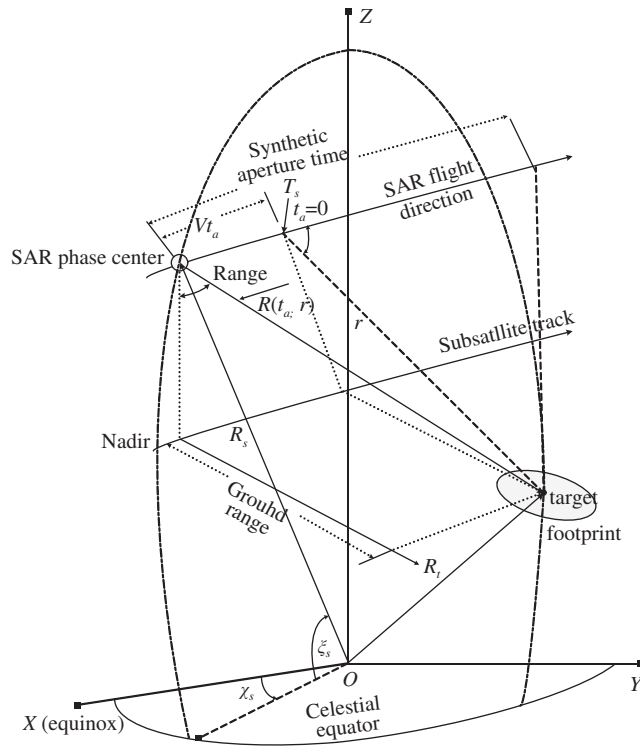


图 1 雷达相位中心与目标距离几何关系

Figure 1 Model of range between SAR phase center and target

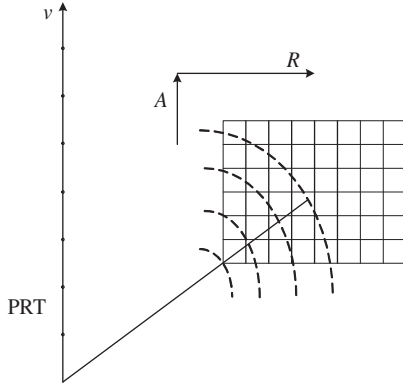


图 2 弧线示意图

Figure 2 Model of range cell with equivalent arc radius

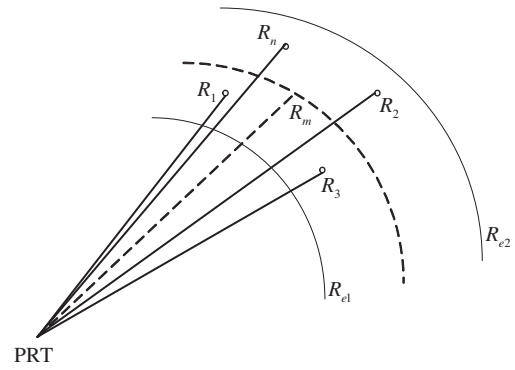


图 3 相邻等弧带状区域的目标分布

Figure 3 Targets in the same range arcs

2.2 HJ-1C 回波数据仿真和成像算法

2.2.1 回波模拟算法

在某脉冲时刻, 目标到雷达相位中心和目标场景斜平面关系图如图 2 所示, 按场景中某点到雷达天线相位中心斜距相等的关系等间距划分等弧线, 如图中虚线所示. 当等弧线间距小于距离向分辨率的情况下, 我们可以将同一个等弧带里的所有目标的斜距用该等弧带中心的斜距来代替, 因此同一等弧带状区域里, 可以叠加等弧带内所有目标的复散射系数, 如图 3 所示.

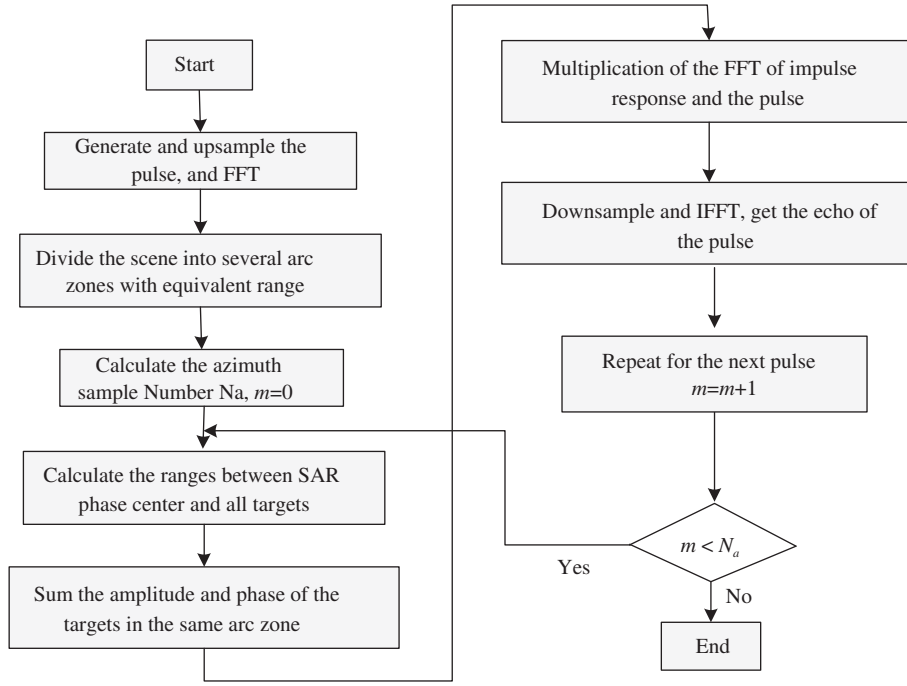


图 4 一维频域回波模拟算法的实现流程

Figure 4 Flowchart of echoes generation in 1-D frequency domain

设整个场景可以划分成 D 个等弧带, 那么在某脉冲时刻, 整个目标场景的回波信号可表示为

$$s(t) = \sum_{d=1}^D \text{rect} \left[\frac{t - 2\tau_d}{T_p} \right] \exp \left(j\pi b \left(t - \frac{T_p}{2} - 2\tau_d \right)^2 \right) \sigma_d \exp(-j4\pi f_c \tau_d), \quad (5)$$

式中 f_c 为载频, τ_d 为第 d 个等弧带中心的目标回波延迟, R_{dm} 表示第 d 个等弧带中心的斜距; $\tau_d = \frac{R_{dm}}{c}$; σ_d 表示第 d 个等弧带内所有目标的回波幅度信息和 Doppler 相位补偿的叠加.

注意到上式只有前两项与快时间变量 t 有关, 所以, (5) 式又可以写成下列卷积的形式:

$$s(t) = p(t) * h(t) = \left[\text{rect} \left(\frac{t}{T_p} \right) \exp \left(j\pi K \left(t - \frac{T_p}{2} \right)^2 \right) \right] * \left[\sum_{d=1}^D \sigma_d \exp(-j4\pi f_c \tau_d) \delta(t - \tau_d) \right]. \quad (6)$$

因此, 可以将 $p(t)$ 和 $h(t)$ 分别进行 Fourier 变换, 在频域相乘后进行 Fourier 逆变换得到 $s(t)$, 这样可利用 FFT 的方法来实现快速卷积, 产生面目标原始数据.

在快速面目标回波模拟过程中, 为了提高回波数据的精度, 我们对发射信号 $p(t)$ 进行升采样处理, 对回波信号 $s(t)$ 进行降采样处理.

根据快速面目标回波模拟算法的基本原理, 其算法的实现流程如图 4 所示.

2.2.2 成像算法

(I) 基于等效斜视模型的 ECS 成像算法

HJ-1C 条带模式分辨率达到 5 m 而距离徙动在有偏航控制的时候仿真计算 (垂直斜距 557.176 km, 波束足印等效速度 7413.5 m/s, 合成孔径时间 1.04 s) 达到 53.3 m, 即超过 10 个距离向分辨单元. 本

文针对 HJ-1C 具有两种成像模式的情况, 既要求能够处理较高的 5 m 空间分辨率条带成像模式数据, 又可以处理扫描模式数据, 因此这里考虑使用 ECS 成像处理算法, 即可以避免高空间分辨率大距离徙动校正中的插值操作, 也在扫描模式下具有良好的相位保持能力, 而经典 CS 算法对于星载的非正侧视下的斜距模型不如 ECS 的等效斜视距离模型精确, 这里不予考虑. 下面给出了 ECS 成像算法的处理流程:

1) 方位向 Fourier 变换.

忽略天线方向图的影响, 对回波进行方位向 Fourier 变换, 得到距离 — Doppler 域表达式为

$$S_1(f_a, \tau; R_0) = \sigma A \exp \left(-j \frac{4\pi R_0 \sin \phi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \right) \cdot \exp \left\{ -j\pi K_s(f_a, R_0) \left[\tau - \frac{2R_{f_a}(f_a, R_0)}{c} \right]^2 \right\} \exp \left(j \frac{2\pi R_0 f_a}{V} \cos \phi \right), \quad (7)$$

其中,

$$K_s(f_a, R_0) = \frac{K}{1 + K R_0 \sin \phi \frac{2\lambda}{c^2} \frac{(\lambda f_a/2V)^2}{[1 - (\lambda f_a/2V)^2]^{3/2}}}, \quad R_{f_a}(f_a, R_0) = R_0 [1 + C_s(f_a)],$$

$$C_s(f_a) = \frac{\sin \phi}{\sqrt{1 - (\lambda f_a/2V)^2}} - 1,$$

R_0 为某一距离门的斜距.

2) Chirp scaling 操作.

构造 chirp scaling 因子如下 [3]:

$$\Phi_1(\tau, f_a; R_{\text{ref}}) = \exp \left\{ -j\pi K_s(f_a, R_{\text{ref}}) C_s(f_a) \left[\tau - 2R_{f_a}(f_a, R_{\text{ref}})/c \right]^2 \right\}, \quad (8)$$

将此因子与 $S_1(f_a, \tau)$ 相乘完成 chirp scaling 操作.

3) 距离向 Fourier 变换.

对 $S'_1(f_a, \tau)$ 进行距离向 Fourier 变换, 结果为

$$S_2(f_a, f_r) = \sigma A \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi f_r^2}{K_s(f_a, R_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_a)]} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f_r [R_0 + R_{\text{ref}} C_s(f_a)] \right\} \exp \{ -j [\Theta_1(f_a) + \Theta_2(f_a, R_0)] \}, \quad (9)$$

其中, $\Theta_1(f_a) = \frac{4\pi}{c^2} K_s(f_a, R_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_a)] C_s(f_a) (R_0 - R_{\text{ref}})^2$, $\Theta_2(f_a; R_0) = \frac{2\pi R_0 f_a}{V} \cos \phi$.

4) 距离压缩.

构造距离压缩相位因子如下

$$\Phi_2(f_r, f_a; R_{\text{ref}}) = \exp \left\{ -j \frac{\pi f_r^2}{K_s(f_a, R_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_a)]} \right\} \exp \left[j \frac{4\pi f_r}{c} R_{\text{ref}} C_s(f_a) \right], \quad (10)$$

将此因子与 $S_2(f_a, f_r)$ 相乘完成距离压缩.

5) 距离向逆 Fourier 变换.

对 $S'_2(f_a, f_r)$ 进行距离向逆 Fourier 变换, 结果为

$$S_3(f_a, \tau) = \sigma A \exp \left(-j \frac{4\pi R_0 \sin \phi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \right) \exp [-j\theta_1(f_a) + \theta_2(f_a, R_0)], \quad (11)$$

要注意的是该式只表示包络内部的信号, 简洁起见没有写出包络项.

6) 相位校正.

构造相位校正因子如下:

$$\begin{aligned} \Phi_3(f_a, \tau) = & \exp \left(j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \left(1 - \sin \phi \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \right) \right) \\ & \cdot \exp [j\theta_1(f_a) + \theta_2(f_a, R_0)] \exp \left(-j \frac{\pi}{K_{\text{ref}}} f_a^2 \right), \end{aligned} \quad (12)$$

K_{ref} 是方位向参考调频率; 通过对成像模式判断, 由此确定是否引入 $\exp \left(-j \frac{\pi}{K_{\text{ref}}} f_a^2 \right)$ 项. 将此因子与 $S_3(f_a, \tau)$ 相乘完成相位校正, 处理后的信号为

$$S'_3(f_a, \tau) = \sigma A \exp \left(-j \frac{\pi}{K_{\text{ref}}} f_a^2 \right) \exp \left(j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \right). \quad (13)$$

7) 方位向逆 Fourier 变换.

对 $S'_3(f_a, \tau)$ 进行方位向逆 Fourier 变换, 结果为

$$S_4(t_a, \tau) = \exp (j\pi K_{\text{ref}} t_a^2) \exp \left(j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \right). \quad (14)$$

8) 去斜处理.

构造参考信号如下:

$$\Phi_4(t_a) = \exp (-j\pi K_{\text{ref}} t_a^2), \quad (15)$$

将此参考信号与 $S_4(t_a, \tau)$ 相乘完成去斜处理, 去斜处理后方位向变为单一点频信号.

9) 方位向 Fourier 变换.

对去斜后的信号作方位向 Fourier 变换, 得到成像结果.

最后给出 ECS 成像算法处理流程示意图如图 5^[4,5]. 其中, 流程中的三次相位校正因子具体如 (16), (17) 式所示:

$$\begin{aligned} \varphi_3(f_a; R_0) = & \left\{ -j \left[\frac{-2\pi\lambda^2 R_0 \sin \phi}{c^3} [1 + C_s(f_a)]^5 \left(\frac{f_a \lambda}{2V} \right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + 2\pi \frac{c E_0(f)}{12} \frac{2C_s(f_a) + 1}{K_s^3(f_a, R_{\text{ref}}) C_s(f_a) [C_s(f_a) + 1]} \right] f_r^3 \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$E_0(f) = \frac{K^2 k_1 \sin \phi_{\text{ref}}}{(1 + R_{\text{ref}} K k_1 \sin \phi_{\text{ref}})^2}, \quad k_1 = \frac{2\lambda \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2}{c^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2 \right]^{3/2}}. \quad (17)$$

该流程当中对条带和扫描模式的处理在前面到距离压缩环节是相似的, 在后续的相位补偿因子部分进行了针对性的选择, 使得算法能够适应这两种成像模式. 同时, 在 CS 因子操作之前, 在二维频域

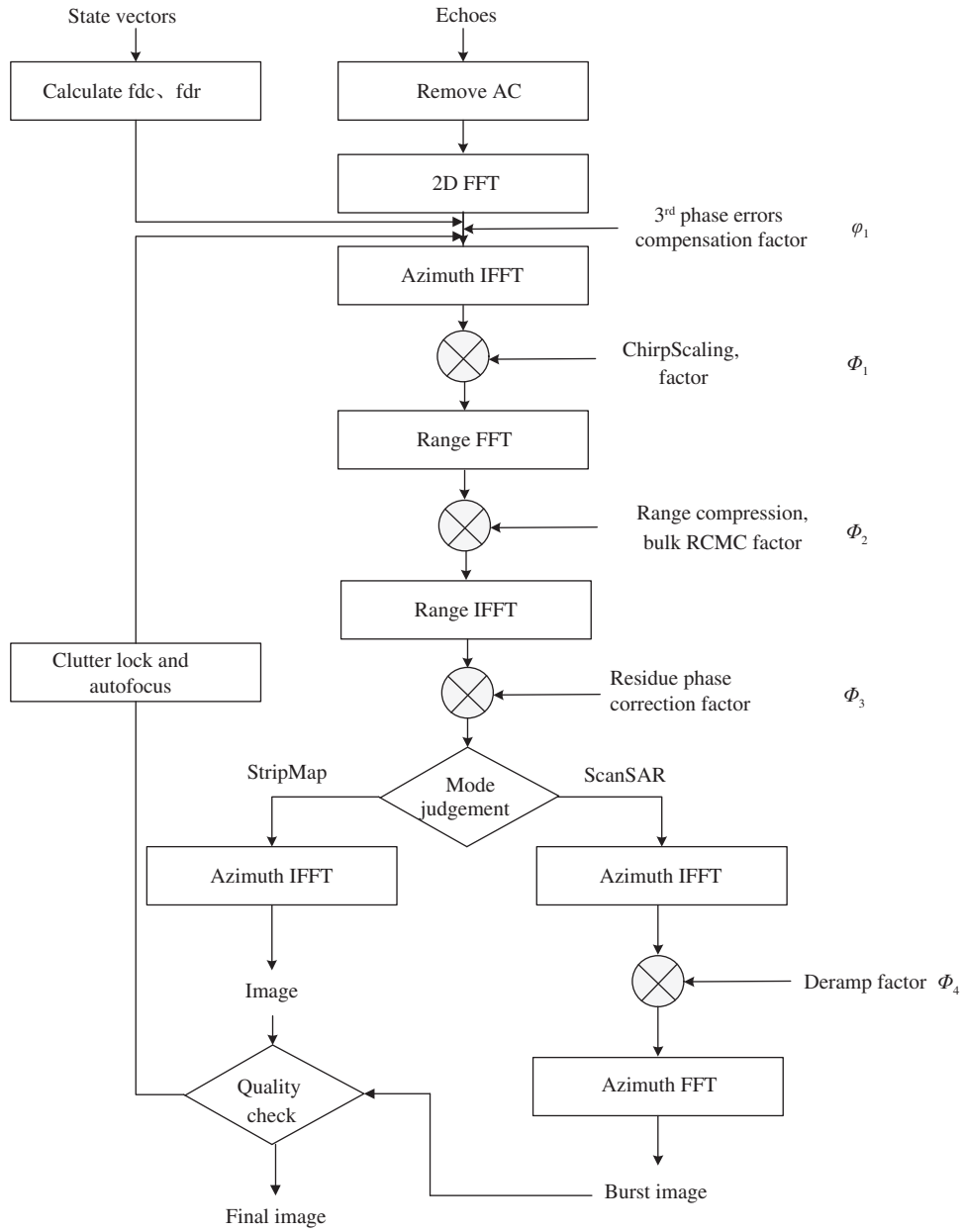


图 5 ECS 成像算法处理流程

Figure 5 Flowchart of ECS algorithm

中校正了算法推导过程中近似引入 3 次相位误差, 使得该算法精度进一步提高. 扫描模式的 Burst 图像最后需要进行拼接后得到最终图像.

(II) Doppler 参数计算和估计算法

成像所必需的 Doppler 质心 f_d 和 Doppler 调频率 f_r 是成像处理是重要的两个参量, 它们的表达式是

$$f_d = -\frac{2\dot{R}}{\lambda}, \quad f_r = -\frac{2\ddot{R}}{\lambda}, \quad (18)$$

其中, $\dot{R}$ 和 $\ddot{R}$ 是雷达与目标斜距 $R(t; r)$ 的一阶和二阶导数, 其计算使用下列公式 [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{R} = \frac{aa - \dot{R}^2}{R}, \\ aa = \ddot{R}_s R \cos \theta + \dot{R}_s^2 - (R_s \dot{\omega}_s + 2 \dot{R}_s \omega_s) R \sin \theta \cos \phi \\ \quad + 2 \omega_e \dot{R}_s R \sin \theta (\sin \phi \cos \alpha \sin i + \cos \phi \cos i) + R_s \omega_s^2 (R_s - R \cos \theta) \\ \quad - 2 R_s \omega_s \omega_e [(R_s - R \cos \theta) \cos i + R \sin \theta \sin \phi \sin \alpha \sin i] \\ \quad + \omega_e^2 R_s [(1 - \sin^2 \alpha) \sin^2 i (R_s - R \cos \theta) \\ \quad - R \sin \theta \sin \alpha \sin i (\cos \phi \sin i \cos \alpha - \sin \phi \cos i)], \\ \dot{R} = \dot{R}_s \cos \theta - R_s \omega_s \sin \theta \cos \phi + \omega_e R_s \sin \theta (\sin \phi \cos \alpha \sin i + \cos \phi \cos i), \\ R = \frac{2 R_s \cos \theta - \sqrt{(2 R_s \cos \theta)^2 - 4 (R_s^2 - R_t^2)}}{2}, \\ R_t^2 = \frac{R_e^2 R_p^2}{(R_p \cos \zeta_s)^2 + (R_e \sin \zeta_s)^2}, \quad \sin \zeta_s = \sin \alpha \sin i, \cos \zeta_s = \sqrt{1 - \sin^2 \zeta_s}, \\ \dot{\omega}_s = \frac{-2 \mu e}{R_s^3} \sin(\alpha - \omega), \quad \dot{R}_s = \frac{R_s^2 e \sin(\alpha - \omega)}{a(1 - e^2)} \omega_s, \quad \ddot{R}_s = \frac{\mu e}{R_s^2} \cos(\alpha - \omega), \\ \omega_s = \frac{\sqrt{\mu a(1 - e^2)}}{R_s^2}, \quad R_s = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos(\alpha - \omega)}. \end{array} \right. \quad (19)$$

其中, 各个符号的含义如下:

$\dot{R}_s$, $\ddot{R}_s$ 是 SAR 在惯性系中距离的一阶、二阶导数; R 是 SAR 和点目标的距离, 即 $R(t; r)$; θ 是距离向波束与天底点方向间的夹角 (也是和卫星波束中心与卫星位置矢量的夹角); ω_s , $\dot{\omega}_s$ 是卫星角速度和一阶导数; ϕ 是考虑卫星偏航引导角以后的等效斜视角; $\omega_e = 7.292115 \times 10^{-5}$ 是地球自转角速度 (rad/s); α 是卫星轨道面上, 卫星相对天赤道平面的幅角; i 是卫星轨道倾角;

$R_e = 6.37816 \times 10^6$ 是地球椭球模型赤道半径 (m); $R_p = 6.35678 \times 10^6$ 是地球椭球模型极半径 (m); ζ_s 是卫星赤纬; $\mu = 3.986 \times 10^{14}$ 是地球引力常数与地球质量乘积 (m^3/s^2); a 是卫星椭圆轨道半长轴; e 是卫星椭圆轨道偏心率; ω 是卫星椭圆轨道近地点幅角;

基于仿真星历数据, 使用上述公式计算得到的 f_d 、 f_r 、 R 、 V 和 θ 如图 6 所示, 横坐标表示距离向采样点 (距离门). 从图 6 可以看出, 在有偏航控制的时候, Doppler 质心几乎为 0, Doppler 参数在整个幅宽内的变化规律可以用二次多项式拟合表示. 同时可以看出 θ 和 V 随斜距 R 的变化规律.

当用星上的姿轨数据直接计算 Doppler 参数的精度满足成像指标, 比如 ASLR、PSLR、模糊度、脉压展宽系数等的检测精度要求时, 不必使用原始回波数据进行运动补偿处理. 否则, 必须在地面进行杂波锁定和自聚焦处理, 通过设置满足精度要求的阈值, 对多个选取距离门的 f_d 使用时域相关法 [7-9] (correlation Doppler estimator) 进行估计, 使用子孔径图像相关法 [7] (map drift) 进行 f_r 估计. 然后根据选取距离门的估计值拟合出所有距离门的 Doppler 参数进行成像处理. 进行 Doppler 参数估计时, 由于受到场景杂波中目标特性影响, 需要在整个图像中进行分块处理, 对每块数据的估计结果进行判断, 剔除受到比如水陆交界、强点目标等带来的影响.

由于本文中的回波模拟没有进行基于典型场景目标散射模型的回波模拟, 而只是使用 Radarsat 数据进行了回波模拟, 所以对于 Doppler 参数估计算法的精度没有进行深入仿真验证, 只是进行了初步的实现, 并使用某真实星载 SAR 数据进行了初步验证, 初步自聚焦结果如图 7 所示. 今后随着 HJ-1C

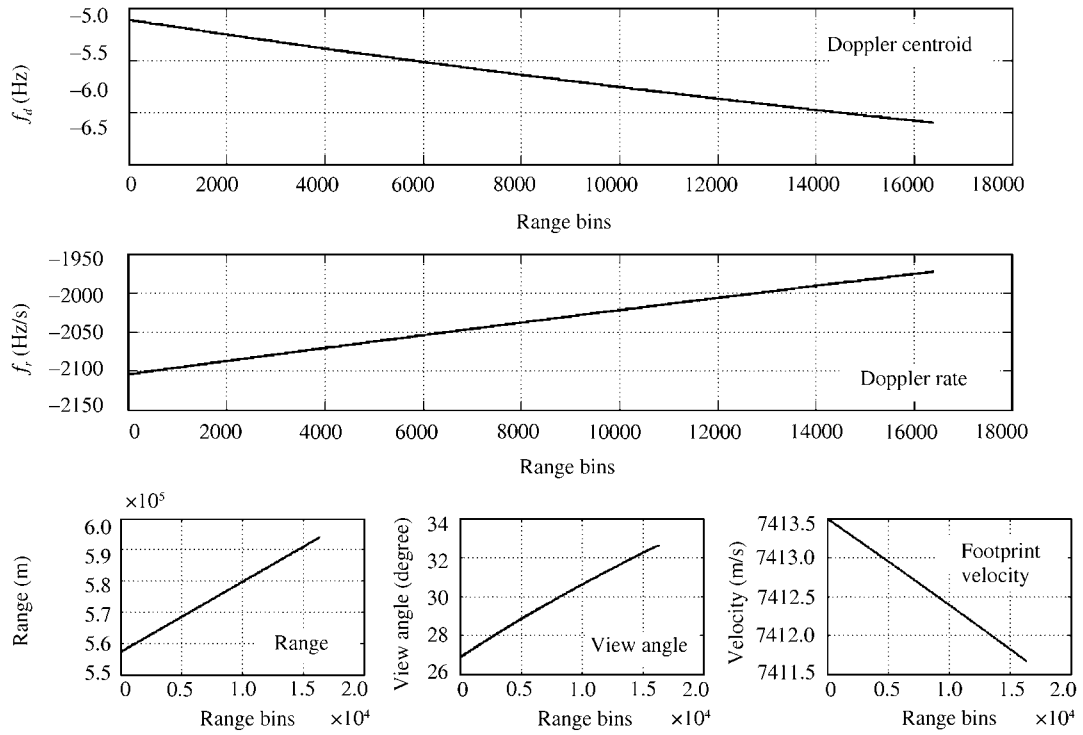


图 6 Doppler 质心、调频率随距离门的变化情况

Figure 6 Trend of f_d and f_r in different range bins

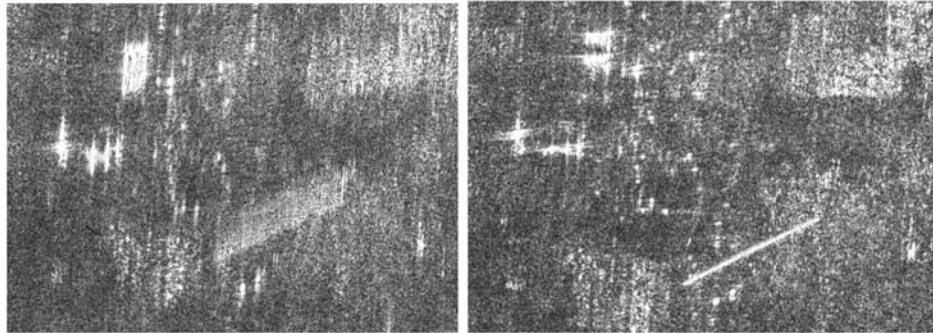


图 7 自聚焦前后成像结果对比

Figure 7 Results before and after Map Drift algorithm

真实数据的获取, 将进行深入研究进行算法优化.

3 仿真实验

3.1 轨道和星历数据模拟

由于地球自转的影响, 即使当星载 SAR 的运动方向与天线波束中心垂直时, 回波的 Doppler 中心频率也会偏离零频. 其数值可能远大于成像处理器的带宽, 引起 Doppler 中心频率关于脉冲重复频率

表 1 HJ-1C 轨道仿真参数

Table 1 HJ-1C orbit elements for simulation

Semi major axis	6870.230000 km	Inclination	97.367100 deg
Eccentricity	0.001	Perigee angle	0.000000 deg
Ascension of ascending node	0.000000 deg	Time of perigee	2008.08.08 08:08:08
Simulation start time	2008.08.08 08:08:08	Simulation end time	2008.08.08 08:08:18

表 2 模拟轨道输出的惯性坐标系下的位置和速度坐标

Table 2 Simulated state vectors in ECI

Position(km)			Velocity(km/s)		
x	y	z	x	y	z
6870.124	-4.88346	37.77035	-0.04222	-0.97668	7.553993
6870.078	-5.86014	45.32432	-0.05067	-0.97668	7.553942
6870.023	-6.83681	52.87823	-0.05911	-0.97667	7.553882
6869.960	-7.81347	60.43208	-0.06756	-0.97666	7.553812
6869.888	-8.79013	67.98585	-0.07600	-0.97665	7.553733
6869.808	-9.76677	75.53954	-0.08445	-0.97664	7.553645

的模糊问题, 波长越短模糊越严重. 由于 Doppler 中心频率偏离零频, 使得距离徙动量增加, 给成像处理带来困难. 对于较低频段的星载 SAR, 距离徙动量较小, 一般可以通过成像算法来解决; 而对于较高频段的星载 SAR, 仅仅通过成像算法是很难解决的, 需要采用偏航控制.

偏航控制就是通过姿态控制预先将卫星机动一偏航角, 用来补偿由于地球自转引起的 Doppler 中心的偏移, 使场景中心目标的 Doppler 中心频率为零, 即采用偏航控制使上式等于零. 设此时的偏航角为 θ_{yaw} , 则有

$$\theta_{yaw} = \varepsilon a \tan \left(\frac{\cos u \sin i}{\omega_s / \omega_e - \cos i} \right). \tag{20}$$

要使 Doppler 频移为零, 则此时的偏航控制角取决于卫星的轨道倾角 i 、纬度幅角 u 、卫星与地球的相对转动速率 ω_s / ω_e , 天线是左照射还是右照射, 右照射时 $\varepsilon = -1$.

计算出偏航控制角之后, 利用平台坐标系到速度坐标系的转换矩阵, 将偏航角加入到星载 SAR 回波数据仿真中即可.

HJ-1C 采用的是太阳同步椭圆轨道. 卫星沿轨道的运动用轨道 6 根数表示, 见表 1.

根据 HJ-1C 的轨道六根数建立椭圆轨道模型模拟产生卫星轨道, 获得卫星的在轨位置坐标和速度坐标如表 2.

3.2 回波模拟参数和成像处理结果

本文使用 HJ-1CSAR 的设计参数, 仿真了 ScanSAR 回波数据, 其相关 4 波束波位设计参数如表 3.

表 3 4 波束 ScanSAR 回波仿真参数

Table 3 Simulation parameters for 4 beams ScanSAR

BeamsNo.	PRF(Hz)	Pulses in Burst	Time of the first sample(μ s)	Samples	Central view angle (degree)
Beam1	3295.3	676	73.44	14K	25.86
Beam2	3220.1	672	74.88	14K	28.07
Beam3	2880.4	616	54	15K	30.23
Beam4	3590.2	772	46.8	13K	31.74

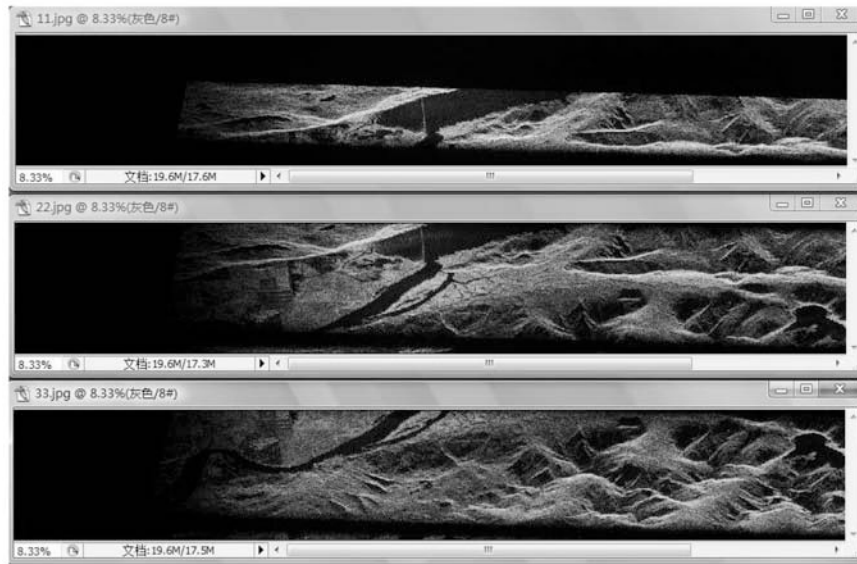


图 8 Burst 数据成像结果

Figure 8 Images of burst1-3 from beam1

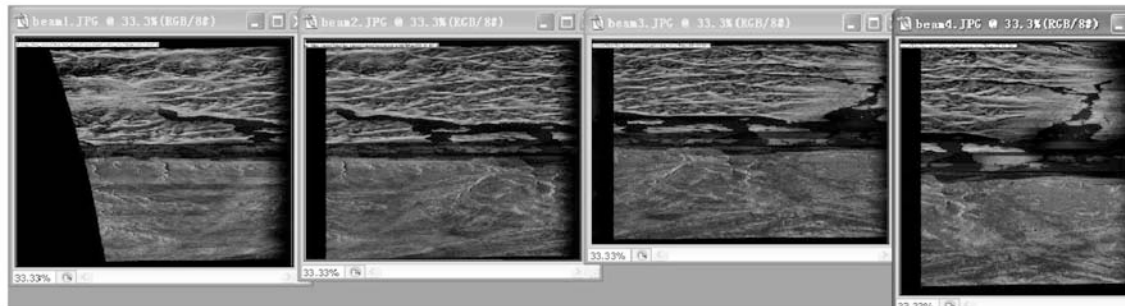


图 9 各波位数据方位向拼接后图像

Figure 9 Images of bursts azimuth mosaic

采用 2.2.2 小节的成像算法, 对回波进行 Burst 数据成像处理, 得到的结果如图 8 所示, 该图从上至下表示波位 1 下 Burst1、Burst2 和 Burst3 成像结果。

对全部的 Burst 成像结果进行方位向拼接, 这里采用了与全孔径处理一样的策略, 即去除全孔径两端各半个合成孔径长度的不完全孔径数据, 得到了方位向拼接之后的 sub-swath 图像结果, 模拟数据使用了多幅其他雷达卫星图像, 所以有拼接痕迹, 波位 1-4 的 Burst 图像拼接结果如图 9 所示。

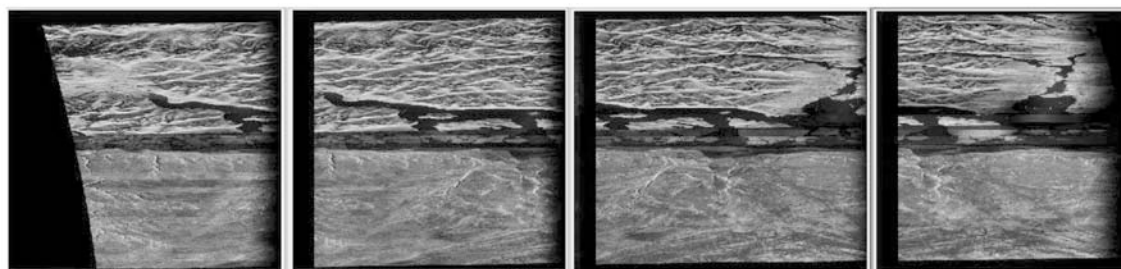


图 10 使用 CZT 变化统一各个波位采样间距

Figure 10 Images with same azimuth pixel spacing after using CZT processing

如图 9 所示, 因为各个波位下的成像参数不同, 一般 SPECAN 算法使得拼接之后的图像在方位向采样间隔不同, 各个波位的拼接结果比例不同, 需要对其加以处理, 否则后续的距离向拼接无法进行. 根据公式

$$\delta_{ap} = \frac{V_g \cdot \text{PRF}}{N_{\text{FFT}} \cdot |f_{dr}|} = \frac{\lambda \cdot r \cdot \text{PRF}}{2 \cdot V_g \cdot N_{\text{FFT}}}, \quad (21)$$

各个波位的采样间距分别为 17.61, 17.72, 17.62, 17.86 m. 通过 Chirp-Z 变换可以同时在成像过程当中, 调整输出各个波位的 Burst 图像点数以及采样间距, 用 Chirp-Z 代替 FFT 之后, 我们得到了方位向采样间隔以及输出点数一致的各个波位的拼接图像, 见图 10.

经过上述步骤, 最后需要进行距离向拼接得到最终的 ScanSAR 图像, 距离向拼接比较简单, 可以根据波位设计参数中采样起始时间计算出各个波位在距离向的重叠点数, 然后进行拼接.

4 结论

本文针对 HJ-1C 卫星型号任务, 围绕着星地几何建模、轨道和回波数据仿真, 以及成像算法实现 3 个主要内容展开了研究工作, 从理论上分析了 SAR 数据处理当中斜距表达的等效模型, 并据此给出了基于该斜距模型的 CS 成像算法的详细流程, 也在实践上通过采用一维频域回波仿真方法, 生成扫描模式回波数据对成像方法进行了有效的验证, 得到了较好的成像结果.

本文研究表明, 等效斜视斜距几何模型具有良好的近似精度, 基于该模型的 ECS 算法是在经典的基于正侧视几何模型基础上进行了修正后推导出来, 同时流程中加入了 3 次相位误差的表达和补偿, 进一步提高了成像精度. 同时, 给出了一种利用精确的星历数据精确计算 Doppler 参数的公式, 满足成像处理的精度要求, 并给出了 Doppler 参数、斜距和等效速度随距离门的变化趋势, 也分析了偏航控制的作用和意义. 在仿真数据部分, 提出了一种一维频域快速回波仿真算法, 能够在保证仿真数据精度的前提下, 提高数据仿真的速度.

最后, 本文对该算法中影响各个波位采样间隔不同的因素进行了分析, 在最后的环节使用了基于 CZT 的方法来替代传统的 FFT 变换, 得到了统一的采样间隔, 避免了重采样带来的计算和误差.

参考文献

- 1 Huang Y, Li C S, Chen J, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging. Acta Electron Sin(in Chinese), 2000, 28: 35–38

- 2 Wei Z Q. Synthetic Aperture Radar Satellite(in Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 162–172
- 3 Alberto M, Josef M, Rolf S. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes. IEEE Trans Geosci Remote, 1996, 34: 1123–1131
- 4 Mittermayer J, Moreira A, Davidson G, et al. High precision processing of SIR-C scanSAR data. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1996, 1217–1220
- 5 Wei J, Zhou Y Q, Li C S. Equivalent squint extended chirp scaling algorithm for spaceborne scanSAR. Acta Electron Sin(in Chinese), 2005, 33: 1545–1548
- 6 Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture RADAR Systems and Signal Processing. New York: John Wiley & Sons inc., 1991. 565–586
- 7 Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture RADAR Data Algorithm and Implementation. Boston/London: Artech House, 2005. 115
- 8 Madsen N S. Estimating the Doppler centroid of SAR data. IEEE Trans Aero Elec Sys, 1989, AES-25: 134–140
- 9 Li F K, Curlander J C, Wu C. Doppler parameters estimation of spaceborne synthetic aperture radars. IEEE Trans Geosci Remote, 1985, 23: 47–55

SAR imaging method based on simulated HJ-1C echoes

HOU MingHui

China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China
E-mail: hmh@cresda.com

Abstract Synthetic-aperture radar (SAR) is an important method for earth remote sensing. HJ-1C will be launched in the near future as the first civil space-borne SAR satellite. This paper examines the key methods that form the basis of SAR imaging. These include a more accurate range model and related ECS (extended chirp scaling) factors, a fast echoes simulation method in the frequency domain, an accurate Doppler parameters calculation method and an improvement in the ScanSAR mosaic of sub-swath images. Simulations show that ECS and related methods are well suited for space-borne SAR imaging in Stripmap and ScanSAR mode with a larger squint angle.

Keywords SAR, ECS, equivalent squint, echoes simulation, Doppler parameters