

适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法

何 峰, 梁甸农, 董 臻

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出一种星载双基地 SAR(Synthetic Aperture Radar)等效平行轨迹距离模型, 计算表明该模型误差远远小于直接基于多普勒参数的二阶距离模型. 基于该距离模型提出一种星载双基地 SAR 波数域成像算法, 能在大斜视角、高分辨率情况下精确成像. 最后对仿真点目标双基地回波进行成像处理, 结果与基于二阶距离模型的成像算法相比较, 证明了本文等效距离模型和成像算法的优越性.

关键词: 星载双基地合成孔径雷达; 合成孔径雷达; 雷达成像; 波数域算法

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)06-1011-04

A Wavenumber Domain Algorithm for Spaceborne Bistatic SAR Imaging with Large Squint Angle

HE Feng, LIANG Diannong, DONG Zhen

(School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A parallel track range model for spaceborne bistatic SAR is proposed, which has a much higher accuracy compared with classical two order range model based on Doppler centroid frequency and Doppler FM rate. A wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging is then proposed based on that range model. The quality of images of simulated bistatic echoes focused by the algorithm is much better than algorithm based on two order range model at the case of large squint angle and high resolution.

Key words: spaceborne bistatic SAR; synthetic aperture radar; radar imaging; wavenumber domain algorithm

1 引言

星载双基地 SAR 是近年来提出的一种新的空间遥感技术^[1-3]: 一颗或数颗装载了雷达接收设备的低成本小卫星伴随一颗传统遥感 SAR 卫星飞行, 同时接收 SAR 卫星发射的电磁波回波, 和原 SAR 卫星构成一个双基地 SAR 系统. 星载双基地 SAR 能在散射方向、极化、视角等诸多方面获得更为丰富的地面遥感信息, 在干涉测高、干涉洋流测速、高分辨成像、地表覆盖特征分类等方面有广泛的应用前景.

对小卫星收集的双基地回波数据进行成像处理是星载双基地 SAR 应用的基础. 与单星 SAR 一样, 星载双基地 SAR 方位高分辨率也是通过对卫星飞过目标时形成的方位多普勒信号的匹配压缩处理实现的, 但其收发距离和的变化规律 $R(s)$ 较单星 SAR 雷达到目标双程距离更为复杂, 且距离徙动量更大, 若由多普勒中心频率和多普勒调频斜率构造二阶距离逼近模型来近似 $R(s)$ ^[4,9], 则虽可直接借用基于菲涅耳近似的单基地 SAR 成像算法, 但在分辨率较高时, 在斜视角较大的情况下, 二阶距离逼近模型误差在合成孔径边缘造成的匹配相位误差很大, 不能满足精确聚焦要求. 本文提出一种用平行直线轨迹近似实际卫星轨迹的星载双基地 SAR 等

效平行轨迹距离模型, 其误差远小于二阶距离逼近模型. 在分析实际物理意义的基础上, 基于一定程度的近似求出了以该距离模型表示的规范化点目标冲激响应的二维频谱解析表达式. 在此基础上推导出一种在二维频域处理的波数域算法, 能在大斜视角、高分辨率情况下精确成像. 最后对仿真点目标回波进行成像处理, 结果与基于二阶近似的成像算法相比较, 证明了本文等效距离模型和成像算法的优越性.

2 星载双基地 SAR 等效平行轨迹距离模型

2.1 两种距离模型比较

由多普勒中心频率和多普勒调频斜率构造的双基地收发距离和的二阶距离逼近模型为:

$$R(s) = 2 * \left[\left[\frac{r_1 + r_2}{2} \right] - \frac{\lambda}{2} \left[f_{Dc} * s + \frac{1}{2} f_R * s^2 \right] \right] \quad (1)$$

其中 r_1, r_2 分别为在合成孔径中心时发射卫星和接收卫星与目标的距离. 与单星 SAR 二阶距离逼近模型^[9] 相比发现, 二者具有相同的形式, 因此可用相同的基于菲涅耳近似的成像算法处理. 由于发射卫星和接收卫星长期伴随飞行, 卫星轨道要素差别微小, 在一个成像孔径的时间内两卫星近似平行同步飞行, 用平行直线轨迹近似收发卫星实际飞行轨

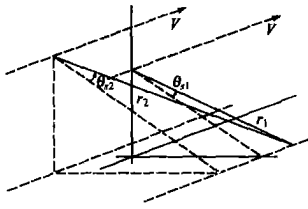


图 1 平行轨迹距离模型几何关系

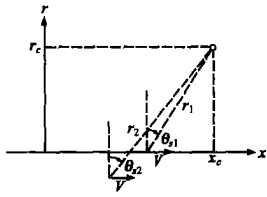


图 2 直接与成像算法对应的坐标系

迹是合理的,模型几何关系如图 1 所示,收发距离和表达式为:

$$R(s) = \sqrt{r_1^2 + V^2 \cdot s^2 - 2r_1 \cdot V \cdot s \cdot \sin\theta_{s1}} + \sqrt{r_2^2 + V^2 \cdot s^2 - 2r_2 \cdot V \cdot s \cdot \sin\theta_{s2}} \quad (2)$$

其中 r_1, r_2 定义同上, V 为等效同步飞行速度, θ_{s1}, θ_{s2} 为等效发射斜视角和等效接收斜视角,大小在 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 之间,正值表示前侧视。

表 1 为二阶逼近模型和平行轨迹距离模型在 5m 分辨率时,不同斜视角下的误差比较,表 2 列出了计算参数,该参数是根据 CNES 的 Interferometric Cartwheel 构形提出的^[3],以 Ervisat 为设想 SAR 卫星。斜视角指发射卫星距离-高度平面与轨道面法平面的二面角,误差为在合成孔径边缘的最大误差。由表 1 知,二阶逼近距离模型随着斜视角的增大,其相位误差大到足以引起严重散焦,而平行轨迹模型是一种较精确的等效距离模型,在大斜视角下误差仍能满足精确聚焦要求。

表 1 两种距离模型误差比较

斜视角 / 度	二阶模型 距离误差/m	二阶模型 相位误差/度	平行轨迹模型 距离误差/m	平行轨迹模型 相位误差/度
0	0.004	26.10	3.5×10^{-5}	0.22
10	0.010	64.59	9.2×10^{-5}	0.59
20	0.015	95.61	1.47×10^{-4}	0.94

表 2 星载双基地 SAR 系统主要参数

系统卫星参数		系统雷达参数	
卫星轨道高度/km	800	发射信号波长/cm	5.6
纬度幅角差/度	0.98	发射脉冲带宽/MHz	16
轨道倾角差/度	0	发射脉冲宽度/ μ s	25
升交点赤经差/度	0	脉冲重复频率/Hz	2000
观测区纬度/度	南纬 60	波束中心视角/度	30

2.2 距离模型与多普勒参数估计结合

平行轨迹距离模型的参数可通过结合多普勒参数估计来确定。由式(2)可得出多普勒参数与距离模型参数的关系为:

$$f_{Dc} = \frac{V}{\lambda} (\sin\theta_{s1} + \sin\theta_{s2}) \quad (3)$$

$$f_R = -\frac{V^2}{\lambda} \left[\frac{\cos^2\theta_{s1}}{r_1} + \frac{\cos^2\theta_{s2}}{r_2} \right] \quad (4)$$

若已知双基地 SAR 多普勒参数精确值,可利用式(3)、(4)来确定参数 $V, \theta_{s1}, \theta_{s2}$ 。由于两个方程确定三个未知量得不到唯一解,可用文献[10]中的方法先确定作为发射卫星的 SAR 卫星单星 SAR 等效斜视角 θ_{s0} ,以 θ_{s0} 作为 θ_{s1} 值,进而由

式(3)、式(4)确定另外两个参数 V, θ_{s2} 。2.1 节的距离模型误差计算中平行轨迹距离模型的参数就是用这种方法确定的,验证了这种参数确定方法的可行性。

实际成像处理时利用星历参数计算得到的多普勒参数精度难以满足精确计算平行轨迹距离模型参数的要求,须结合多普勒参数估计方法,实现步骤为:

(1) 利用 SAR 卫星和小卫星的星历参数计算双基地 SAR 多普勒参数初值 f_{Dc0}, f_{R0} 。

(2) 结合 SAR 卫星单星等效斜视角,由式(3)、(4)计算得到 $V, \theta_{s1}, \theta_{s2}$,以此初始参数成像,并通过多普勒参数估计方法^[5]得到估计后的多普勒参数修正值 f_{Dc}, f_R 。

(3) 用 f_{Dc}, f_R 计算 $V, \theta_{s1}, \theta_{s2}$,重复步骤(2)、(3)直到精度满足要求。

3 星载双基地 SAR 波数域算法

等效平行轨迹距离模型的精确性是精确成像的基础,基于它建立成像算法时却存在困难:求点目标冲激响应的二维频域表达式难以得到解析形式。本文在分析参数物理意义及其变化范围的基础上,基于一定程度的近似求得解析解,在此基础上推导出一种波数域算法。

3.1 回波二维频域表达式

为描述算法方便,将图 1 所示的空间三维几何关系表示为图 2 所示的二维平面几何关系:目标和收发卫星位于同一个概念上的 $x-r$ 平面内^[6,7]。接收卫星位置坐标与发射卫星坐标之差为固定值: $\delta x = r_1 \sin\theta_{s1} - r_2 \sin\theta_{s2}$, $\delta r = r_1 \cos\theta_{s1} - r_2 \cos\theta_{s2}$,测绘带中心距离 $r_c = r_1 \cos\theta_{s1}$,方位位置 x 与慢时间 s 的关系为 $x = V \cdot s$ 。

在此坐标系下,位于 $(0, r_c + r)$ 处点目标的规范化冲激响应 $h(x, t; r)$ 可表示为:

$$h(x, t; r) = \delta(t - R(x; r)/c) \cdot \exp[-j\omega_0 R(x; r)/c] \\ R(x; r) = \sqrt{(r + r_1 \cos\theta_{s1})^2 + (x - r_1 \sin\theta_{s1})^2} + \sqrt{(r + r_2 \cos\theta_{s2})^2 + (x - r_2 \sin\theta_{s2})^2} \quad (5)$$

其中 $r \in \left[-\frac{R_a}{2}, \frac{R_a}{2}\right]$,为目标对测绘带中心 r_c 的相对距离, $x \in \left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right]$,为发射雷达对合成孔径中心 x_0 的相对位移, R_a 为距离测绘带宽度, D 为合成孔径长度。现求其二维频域表达式。先在快时间 t 上求 $H(x, \omega; r)$:

$$H(x, \omega; r) = \exp[-j(\omega_0 + \omega) \cdot R(x; r)/c] = \exp\{j\Phi(x)\} \quad (6)$$

再在方位向位置 x 上求 $H(k_x, \omega; r)$ 。利用驻定相位原理,解 $\Phi'(x) - k_x = 0$ 求稳相点 \hat{x} 。若记 $k = (\omega_0 + \omega)/c$,则整理后的稳相点方程为:

$$k \cdot \frac{-(x - r_1 \sin\theta_{s1})}{\sqrt{(r + r_1 \cos\theta_{s1})^2 + (x - r_1 \sin\theta_{s1})^2}} + k \cdot \frac{-(x - r_2 \sin\theta_{s2})}{\sqrt{(r + r_2 \cos\theta_{s2})^2 + (x - r_2 \sin\theta_{s2})^2}} = k_x \quad (7)$$

直接解该方程要解一个八次方程,难以得到解析解。若令

$$\frac{-(\hat{x} - r_1 \sin\theta_{s1})}{\sqrt{(r + r_1 \cos\theta_{s1})^2 + (\hat{x} - r_1 \sin\theta_{s1})^2}} = \sin\alpha; \\ \frac{-(\hat{x} - r_2 \sin\theta_{s2})}{\sqrt{(r + r_2 \cos\theta_{s2})^2 + (\hat{x} - r_2 \sin\theta_{s2})^2}} = \sin\beta \quad (8)$$

则 α 是发射雷达在稳相位置对目标的斜视角, β 是此时接收雷达对目标的斜视角. 由于星载情况下合成孔径长度远小于雷达到目标距离, 因此 $\alpha \approx \theta_{s1}$, $\beta \approx \theta_{s2}$. 由式(7)、式(8)易得:

$$\begin{cases} \sin\alpha + \sin\beta = k_x/k \\ (r + r_1\cos\theta_{s1}) \cdot \text{tg}\alpha - (r + r_2\cos\theta_{s2}) \cdot \text{tg}\beta = r_1\sin\theta_{s1} - r_2\sin\theta_{s2} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)求得的解 α, β 是关于 r, k_x, ω 的函数, 再由式(8)易得: $\hat{x} = r_1\sin\theta_{s1} - (r + r_1\cos\theta_{s1}) \cdot \text{tg}\alpha$ 或 $\hat{x} = r_2\sin\theta_{s2} - (r + r_2\cos\theta_{s2}) \cdot \text{tg}\beta$. 稳相点 \hat{x} 是关于距离 r 的函数, 但 r 对 \hat{x} 的决定关系主要体现在比例项 $r + r_1\cos\theta_{s1}$ 或 $r + r_2\cos\theta_{s2}$ 上, α, β 是接近 θ_{s1} 和 θ_{s2} 的值, 随 r 的变化很小, 对 \hat{x} 值的影响也很小. 因此本文采用这样的近似: 在测绘带中心距离 $r_c = r_1\cos\theta_{s1}$ 上解方程组(9).

因为 $\alpha \approx \theta_{s1}$, $\beta \approx \theta_{s2}$, 且 θ_{s1}, θ_{s2} 一般均在在 45° 以内, 可近似认为 $\cos\alpha \approx \cos\theta_{s1}$, $\cos\beta \approx \cos\theta_{s2}$, 代入方程组(9)可得:

$$\begin{cases} \sin\alpha = \frac{r_1\sin\theta_{s1} + r_2(k_x/k - \sin\theta_{s2})}{r_1 + r_2} \\ \sin\beta = \frac{r_2\sin\theta_{s2} + r_1(k_x/k - \sin\theta_{s1})}{r_1 + r_2} \end{cases} \quad (10)$$

由驻定相位原理, 并利用式(9)中的关系, $H(k_x, \omega; r)$ 的相位可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi(\hat{x}) - k\hat{x} &= -k \cdot \frac{r + r_1\cos\theta_{s1}}{\cos\alpha} - k \cdot \frac{r + r_2\cos\theta_{s2}}{\cos\beta} - k(\sin\alpha + \sin\beta) \cdot \hat{x} \\ &= -k \left[\frac{r + r_1\cos\theta_{s1}}{\cos\alpha} - \sin\alpha(r_1\sin\theta_{s1} - (r + r_1\cos\theta_{s1})\text{tg}\alpha) \right] \\ &\quad - k \left[\frac{r + r_2\cos\theta_{s2}}{\cos\beta} - \sin\beta(r_2\sin\theta_{s2} - (r + r_2\cos\theta_{s2})\text{tg}\beta) \right] \\ &= -r \cdot k(\cos\alpha + \cos\beta) - k \cdot (r_1\cos(\alpha - \theta_{s1}) \\ &\quad + r_2\cos(\beta - \theta_{s2})) \end{aligned} \quad (11)$$

则忽略增益项, 规范化点目标冲击响应的二维频域表达式为:

$$H(k_x, \omega; r) = \exp\{-j\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}(\cos\alpha + \cos\beta)\} \cdot \exp\{-jk[r_1\cos(\alpha - \theta_{s1}) + r_2\cos(\beta - \theta_{s2})]\} \quad (12)$$

3.2 波数域算法

设接收的回波信号经正交解调和距离压缩后为 $d(x, t)$, 则理想的成像聚焦是 $d(x, t)$ 与空变的规范化点目标冲激响应 $h(x, t; r)$ 的二维相关运算^[6], 即

$$\begin{aligned} u(x, r) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} d(x', t) h^*(x' - x, t; r) dx' dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} d(x', R(x' - x; r)/c) \cdot \exp\{j\omega \mathbf{0}^T R(x' - x; r)/c\} dx' \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t) \odot_x h(x, t; r) dt \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $u(x, r)$ 的坐标 x, r 为对测绘带中心 (x_c, r_c) 的相对位移值, $d(x', t)$ 的横坐标 x' 为对合成孔径中心 x_0 的相对位移, $x' \in [-X/2, X/2]$, X 为处理数据在方位向宽度, 且 $X \gg D$. 对式(13)两边求关于 x 的傅立叶变换, 并利用 Parseval 定理, 易得

$$U(k_x, r) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(k_x, \omega) \cdot H^*(k_x, \omega; r) d\omega \quad (14)$$

记 $E(k_x, \omega; r) = H^*(k_x, \omega; r)$, 将式(12)的结果代入并

对 r 求傅立叶变换, 得

$$E(k_x, \omega; k_r) = \delta \left[k_r - \frac{\omega_0 + \omega}{c} (\cos\alpha + \cos\beta) \right] \cdot \exp \left\{ j \cdot \left(\frac{\omega_0 + \omega}{c} [r_1\cos(\alpha - \theta_{s1}) + r_2\cos(\beta - \theta_{s2})] \right) \right\} \quad (15)$$

将式(15)的 δ 函数中隐含的 ω 到 k_r 映射关系记为: $f(\omega)$

$$= \frac{\omega_0 + \omega}{c} (\cos\alpha + \cos\beta), \text{ 并记相位项为: } P(k_x, \omega) = \exp \left\{ j \cdot \frac{\omega_0 + \omega}{c} [r_1\cos(\alpha - \theta_{s1}) + r_2\cos(\beta - \theta_{s2})] \right\}, \text{ 则式(15)可重写为:}$$

$$\begin{aligned} E(k_x, \omega; k_r) &= \delta[k_r - f(\omega)] \cdot P(k_x, \omega) \\ &= \delta[\omega - f^{-1}(k_r)] \cdot P(k_x, f^{-1}(k_r)) \end{aligned} \quad (16)$$

对式(14)两边求 r 的傅立叶变换并利用式(16)结果, 易得:

$$U(k_x, k_r) = P(k_x, f^{-1}(k_r)) \cdot D(k_x, f^{-1}(k_r)) \quad (17)$$

可见, 将回波二维频谱乘以相位项 $P(k_x, \omega)$ 后按 $f(\omega)$ 定义的关系映射到 (k_x, k_r) 域, 即得到图像的二维频谱.

3.3 算法实现

在 3.2 节中从原理上看, 本文的双基地 SAR 波数域算法与一般单基地 SAR 波数域算法^[6] 类似, 但在具体实现中发现, 由于算法复杂性增加, 并不能沿用单基地 SAR 波数域算法的实现步骤, 尤其是插值方法. 下面分析算法实现时要考虑的两个主要问题.

(1) 移位问题 从式(5)、式(13)知, 快时间原点在发射脉冲中心, 而实际处理的数据是 $d(x' - X/2, t + t_0)$, t_0 为数据录取开始时刻. 因此在快时间域须对数据右移 t_0 , 对应 ω 域乘以移位因子矩阵在方位向本身有 $X/2$ 的偏移, 最后由图像二维频域直接变换到时域后图像中心距离向在数据矩阵原点处, 方位向在数据矩阵中心. 要使图像中心位于矩阵中心, 要在 r 方向做相应移位, 或在图像频域乘以相应移位因子.

(2) 插值问题 频域插值是波数域算法的关键步骤, 插值结果的好坏直接影响成像质量, 并且插值问题与移位问题互有影响. 插值的目的是为了得到 k_r 域均匀间隔的采样值. 在单基地波数域算法中, 可将预期得到的 k_r 域均匀间隔的位置反映射到 ω 域得到非均匀间隔的位置, 再用已知的 ω 域均匀间隔采样值, 通过理想 sinc 函数重建得到各非均匀间隔位置上的值. 这种在 ω 域的 sinc 插值在原理上是理想的, 可得到最优插值结果, 缺点是运算量大. 而本文的双基地波数域算法由于 $f^{-1}(k_r)$ 难得到显式表达式, 不能借用这种理想插值方法, 只能将 ω 域均匀间隔采样值映射到 k_r 域得到非均匀间隔采样值, 再在 k_r 域通过插值得到均匀间隔位置上的值. 本文采用三阶样条插值, 为了得到好的成像结果, 采取回波数据与相位项分别插值的方法: 回波数据的二维频谱先乘以 $\exp\{j\omega T_l/2\}$ (T_l 为处理数据在快时间域上长度, 相当与在时域将回波中心移至零位置) 后在 k_r 域插值; 相位项是 $P(k_x, \omega)$ 和移位因子 $\exp\{-j\omega(t_0 + T_l/2)\}$ 之积, 因为其幅度恒为 1, 只对其相位插值, 再由插值后得到的相位恢复为相位因子

的复数形式. 最后在 k_r 域将回波插值结果与相位因子插值结果相乘即得图像二维频谱.

4 仿真结果

本文按表 2 列出的主要系统参数仿真了不同斜视角下的双基地点目标回波: 接收卫星位于发射卫星后约 120km 处跟随飞行; 设收发天线长均为 10m, 天线方向图按 sinc 函数进行加权, 并只取半功率点内角度作为有效照射角度; 假设收发天线能保持准确的照射同步. 本文分别用基于二阶逼近距离模型的算法 1 和本文的波数域算法 2 对仿真点目标双基地回波数据进行了成像, 并统计了单视图像质量^[9, 12]. 算法 1 借用一种较精确的单基地距离-多普勒算法(SIM 算法)^[6, 8], 在二维频域针对参考距离进行了残余误差补偿, 并在时域进行了精确的插值. 为了便于比较, 两种算法均未在方位向进行任何加窗处理. 斜视角为 0 和 20 时的成像结果分别如图 3 和图 4 所示. 不同斜视角下两种算法的图像方位向质量统计结果列于表 3. 从表 3 看到, 当斜视角为零时, 算法 1 能取得与算法 2 近似的成像质量, 但随着斜视角的增大, 算法 1 各项指标迅速下降, 散焦严重. 而本文的算法 2 在各斜视角下均能取得与理想值相近的分辨率, 整体成像质量没有明显下降, 只是旁瓣略有抬高, 这是可以通过一定的加窗处理加以抑制的.

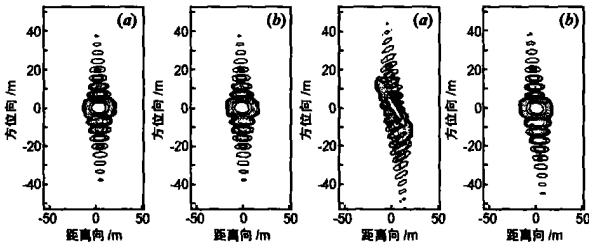


图 3 斜视角为 0 度时成像结果等值线图 (-40dB 以上)(a)为算法 1 结果, (b)为算法 2 结果

图 4 斜视角为 20 度时成像结果等值线图 (-40dB 以上)(a)为算法 1 结果, (b)为算法 2 结果

表 3 两种成像算法方位向图像质量比较

斜视角 / 度	理论分辨率 /m	成像算法	分辨率 /m	峰值旁瓣比 /dB	积分旁瓣比 /dB
0	4.37	算法 1	4.4	18.0	16.6
		算法 2	4.4	19.4	16.9
5	4.42	算法 1	5.0	17.1	15.3
		算法 2	4.5	19.3	16.8
10	4.49	算法 1	6.1	16.5	11.5
		算法 2	4.5	18.6	16.3
15	4.58	算法 1	8.0	15.6	11.9
		算法 2	4.5	17.7	15.8
20	4.69	算法 1	10.0	15.0	10.0
		算法 2	4.7	16.3	15.0

5 结论

本文基于对星载双基地 SAR 应用的实际需要, 对星载双基地 SAR 成像方法进行了研究, 提出一种用平行直线轨迹近

似实际卫星轨迹的星载双基地等效平行轨迹距离模型, 该模型误差远远小于二阶模型. 基于该距离模型推导出一种在二维频域处理的波数域算法, 能在大斜视角、高分辨率情况下精确成像. 对仿真点目标进行成像处理, 并将结果与基于二阶近似的成像算法相比较, 验证了算法的优越性.

参考文献:

[1] A Moccia, N Chiacchio, et al. Spaceborne bistatic synthetic aperture radar for remote sensing applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18): 3395- 3414.

[2] D Massonet. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506- 520.

[3] G Krieger, M Wendler. Comparison of the interferometric performance for spaceborne parasitic SAR configurations[A]. EUSAR 2002[C]. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2002. 467- 470

[4] John C Curlander, Robert N McDonough. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. New York: Wiley, 1991. Appendix B.

[5] Li F K, He H D N, Curlander J C. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radars[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE- 23(1): 47- 55.

[6] Richard Bamler. A comparison of range doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(4): 706- 713.

[7] C Cafforio, C Prati, F Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(2): 194- 207.

[8] C Y Chang, M Jin, J C Curlander. Squint mode SAR processing algorithms[A]. Proc IGARSS' 89[C]. Vancouver: IGARSS, 1989.

[9] 魏钟铨, 等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[10] 黄岩, 李春升, 等. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35- 38.

Huang Yan, Li Chunsheng, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 35- 38.

[11] 刘永坦, 等. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.

作者简介:



何峰男, 1976 年 10 月生于湖北孝感, 1998 年获国防科技大学电子技术系学士学位, 现在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位, 主要从事信息获取与实时处理、星载双/多基地 SAR 系统及信号处理方法等方面的研究工作. E-mail: riversummit@sina.com.

梁甸农男, 1936 年出生. 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会员, 主要从事超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、谱估计、空间信息获取与处理等研究工作.