

聚束模式双基地 SAR 极坐标格式成像算法研究

孙进平, 白 霞, 毛士艺

(北京航空航天大学电子信息工程学院 203 教研室, 北京 100083)

摘 要: 对于任意几何配置下的聚束模式双基地合成孔径雷达, 本文在信号模型分析的基础上提出了一种可实现有效聚焦的极坐标格式成像算法. 根据对聚束模式双基地 SAR 原始数据域空间频率采样特点的分析, 算法在实现由极坐标到直角坐标的插值转换时, 采用非线性插值采样方法, 保持了 PFA 算法中将二维插值分解为两个一维插值的特点, 因此计算流程、效率及性能和常规单基地聚束 SAR 的 PFA 成像算法相同. 最后通过点目标仿真验证了算法的有效性.

关键词: 双基地; 合成孔径雷达; 成像算法

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2008) 12 2324 04

The PFA Imaging Algorithm for Spotlight Mode Bistatic SAR

SUN Jirr ping, BAI Xia, MAO Shi yi

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new effective PFA (Polar Format Algorithm) imaging algorithm for spotlight bistatic SAR of general geometry configuration is presented based on signal model analysis for bistatic SAR. Non linear interpolation and sampling are adopted during converting polar coordinate to cartesian coordinate according to the characteristics of space frequency samples in raw data domain. The algorithm preserve the character of conventional PFA of separating 2D interpolation to two 1D interpolations, and processing flow, efficiency and performance of the new algorithm are as same as conventional PFA for mono static spotlight SAR. Lastly, the algorithm is validated through point target simulations.

Key words: bistatic; synthetic aperture radar; imaging algorithm

1 引言

双基地 SAR 系统由于收发分置的特点, 其成像算法不同于常规的单基地 SAR 系统. 同已经发展比较成熟的普通单基地 SAR 成像算法相比, 双基地 SAR 成像算法尚处于发展阶段^[1]. 尽管空变二维匹配滤波(MF)算法在原理上可以实现任意几何配置下的聚焦处理, 但很低的计算效率使其无法实际应用. 时域反投影(BP)算法是目前应用最多的算法^[1], 虽然 BP 算法也适用于任意几何配置, 而且针对一些特殊配置可以得到相应的快速算法, 但仍存在计算效率低的缺点. Loffeld 等人在文[2]中给出了一般几何配置下双基地 SAR 回波的近似二维频域表示式, 并在做出不同近似的情况下给出了 ω - k 算法和二维 ISFFT 算法, 其他的成像算法还有引入数据域变换的等效单基成像算法^[3]、非线性 Chirp Scaling 算法^[4]以及直接数值计算方法^[5], 以上几种算法的应用条件都要求对几何配置作出不同程度的限制. 极坐

标格式算法(PFA)是最早实用于聚束 SAR 的成像算法之一, 为当前多种先进系统所采用. 文[6]中首次将 PFA 应用于双基地 SAR 成像, 主要工作是引入旋转变换和方位补偿因子, 因近似条件过于理想, 算法性能有限, 在前视和顶视等特殊成像几何配置下的有效聚焦范围受到很大限制. 文[7]首次给出了 PFA 算法处理双基地 SAR 实际数据的结果, 证明了其对聚束式双基地 SAR 成像的有效性, 但没有公布具体的算法实现过程.

本文在对任意几何配置下聚束模式双基地 SAR 信号模型进行分析的基础上, 提出了一种可实现有效聚焦的极坐标格式成像算法. 算法与文[6]中方法的不同之处在于, 根据对原始数据域空间频率采样特点的分析, 在实现由极坐标到直角坐标的插值转换时, 采用了非线性插值采样方法, 避免了旋转变换和方位补偿因子的计算及其近似所产生的误差, 保持了 PFA 算法中将二维插值分解为两个一维插值的计算特点, 计算流程、效率及性能和常规单基地聚束 SAR 的 PFA 成像算法近似相同.

收稿日期: 2007-05-11; 修改日期: 2008-07-23

基金项目: 武器装备预研基金(No. 9140A07020106HK0130); 中国博士后科学基金(No. 20070420292)

2 聚束模式双基地 SAR 信号模型

聚束模式双基地 SAR 成像几何如图 1 所示, 飞行平台 S_T (发射) 和 S_R (接收) 的飞行速度分别为 v_T 和 v_R , 飞行高度分别为 h_T 和 h_R , 合成孔径时间 T_a 内雷达视线方向(LOS)始终指向成像区域中心 O , 飞行路径与区域中心最近距离处下视线与 LOS 所成角度为 ϕ_T 和 ϕ_R . 设 t 为方位向时间, 定义平台 S_T 和 S_R 的飞行方向与其 LOS 之间所成瞬时斜视角分别为 $\varphi_T(t)$ 和 $\varphi_R(t)$, 到区域中心的瞬时斜距为 $R_{OT}(t)$ 和 $R_{OR}(t)$. 以区域中心 O 为原点定义空间直角坐标系 xyz 和 $x'y'z'$, 其中平行于 S_R 飞行方向, x' 平行于 S_T 飞行方向. 对于非平行飞行几何, xyz 与 $x'y'z'$ 不再相同, 此时将地平面上的 $x'y'$ 坐标系视为 xy 以 α 角度(逆时针为正)旋转的结果. 地面点目标 P 在 xyz 上的空间矢量为 $r = (x, y, 0)$, 与 S_T 和 S_R 之间的瞬时距离为 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$.

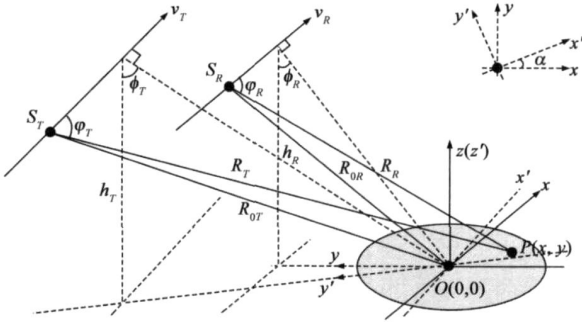


图1 聚束模式双基地SAR成像几何

假设发射雷达信号为 Chirp 脉冲, 宽度为 T_p , 调频率为 γ . 则 S_R 所接收点目标 P 的回波为

$$s_r(t, \tau) = \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left[\frac{\tau - (R_T(t) + R_R(t))/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi f_c \left[\tau - \frac{R_T(t) + R_R(t)}{c}\right] + j\pi \gamma \left[\tau - \frac{R_T(t) + R_R(t)}{c}\right]^2\right\} \quad (1)$$

其中 τ 为快时间, 以区域中心 O 处的回波作为 Dechirp 解调参考信号, 即

$$s_{rf}(t, \tau) = \exp\{j2\pi f_c [\tau - (R_{OT} + R_{OR})/c] + j\pi \gamma (\tau - (R_{OR} + R_{OT})/c)^2\} \quad (2)$$

则 Dechirp 接收后的回波信号为

$$s_{IF}(t, \tau) = s_r(t, \tau) s_{rf}^*(t, \tau) = \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left[\frac{\tau - (R_T(t) + R_R(t))/c}{T_p}\right] \exp\{j\Phi\} \quad (3)$$

其中

$$\Phi = -\frac{2\pi\gamma}{c} \left[\frac{f_c}{\gamma} + \tau - \frac{R_{OT} + R_{OR}}{c} \right] (R_T - R_{OT} + R_R - R_{OR})$$

$$+ \frac{\pi\gamma}{c} (R_T + R_R - R_{OT} - R_{OR})^2 \quad (4)$$

上式二次项部分一般可以忽略(或通过 RVP 校正消除). 由于

$$R_T - R_{OT} = |R_T - r_t| - R_{OT} = -\frac{(R_{OT} \cdot r_t)}{R_{OT}} + \frac{r_t^2}{2R_{OT}} + \frac{r_t^2 (R_{OT} \cdot r_t)}{2R_{OT}^3} - \frac{(R_{OT} \cdot r_t)^2}{2R_{OT}^3} + \dots \quad (5)$$

在平面波前假设下高次项可忽略, 因此有近似式

$$R_T - R_{OT} \approx \frac{(R_{OT} \cdot r_t)}{R_{OT}}, R_R - R_{OR} \approx \frac{(R_{OR} \cdot r_t)}{R_{OR}}$$

定义 $K(\tau) = \frac{\gamma}{c} \left(\frac{f_c}{\gamma} + \tau - \frac{R_{OT} + R_{OR}}{c} \right)$, 则式(4)可近似为:

$$\Phi \approx 2\pi K(\tau) (\hat{R}_{OT} + \hat{R}_{OR}) \cdot r_t = 2\pi (f_c \cdot x + f_y \cdot y + f_z \cdot 0), \quad \hat{R}_{OT} = \frac{R_{OT}}{R_{OT}}, \hat{R}_{OR} = \frac{R_{OR}}{R_{OR}} \quad (6)$$

上式中 \hat{R}_{OT} 与 \hat{R}_{OR} 为瞬时方向矢量, 根据图 1 所示几何关系可计算出

$$\begin{cases} \hat{R}_{OT} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi_T \cos\alpha - \sin\varphi_T \sin\phi_T \sin\alpha \\ -\cos\varphi_T \sin\alpha + \sin\varphi_T \sin\phi_T \cos\alpha \\ \sin\varphi_T \cos\phi_T \end{bmatrix} \\ \hat{R}_{OR} = (-\cos\varphi_R, \sin\varphi_R \sin\phi_R, \sin\varphi_R \cos\phi_R) \end{cases} \quad (7)$$

其中 φ_T 与 φ_R 随慢时间 t 变化. 可以将离散形式的三维空间频率采样表示为

$$f_x(k, n) = K(k) \Theta_x(n), f_y(k, n) = K(k) \Theta_y(n), \quad (8)$$

$$f_z(k, n) = K(k) \Theta_z(n)$$

$k = 1, 2, \dots, N_f, n = 1, 2, \dots, N_a$ 分别表示快时间和慢时间的离散采样, 其中

$$\begin{cases} \Theta_x(n) = -\cos\varphi_T(n) \cos\alpha - \sin\varphi_T(n) \sin\phi_T \sin\alpha - \cos\varphi_R(n) \\ \Theta_y(n) = -\cos\varphi_T(n) \sin\alpha + \sin\varphi_T(n) \sin\phi_T \cos\alpha + \sin\varphi_R(n) \sin\phi_R \\ \Theta_z(n) = \sin\varphi_T(n) \cos\phi_T + \sin\varphi_R(n) \cos\phi_R \end{cases} \quad (9)$$

下面分析空间频率采样在 $f_x f_y$ 坐标上的分布特点, 令

$$\begin{cases} \theta(n) = \tan^{-1}(-\Theta_x(n)/\Theta_y(n)) \\ \Lambda(n) = \sqrt{\Theta_x^2(n) + \Theta_y^2(n)} \end{cases} \quad (10)$$

同时令 $\tilde{K}(k, n) = K(k) \Lambda(n)$, 则有

$$f_x(k, n) = -\tilde{K}(k, n) \sin\theta(n), \quad (11)$$

$$f_y(k, n) = \tilde{K}(k, n) \cos\theta(n)$$

由上式可以得到聚束模式双基地 SAR 的空间频率采样的分布, 典型如图 2(a) 所示.

由于系统的采样频率 f_s 和脉冲重复频率 PRF 一般是不变的, 因此 k, n 只是快时间和慢时间的均匀采样, 由式(11)可知, 对于极坐标形式表示的聚束模式双基地 SAR 空间频率采样, 极径 $\tilde{K}(k, n)$ 和极角 $\theta(n)$ 的分布

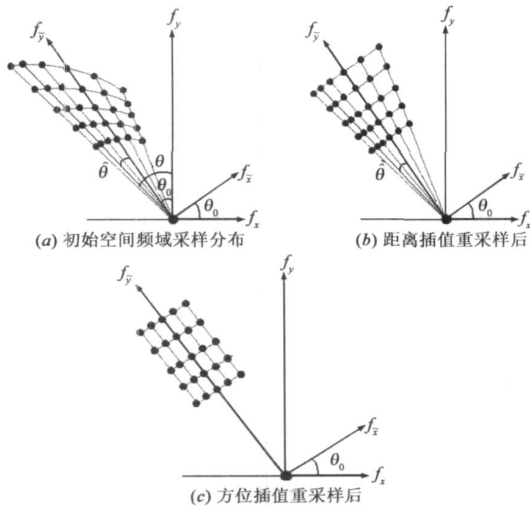


图2 双基地SAR极坐标格式化前后的二维空间频域采样

由发射平台与接收平台的双基地成像几何共同决定, 一般是非均匀变化的. 其中极径 $\tilde{K}(k, n)$ 的采样间隔虽是均匀的, 但起始位置 $\tilde{K}(1, n)$ 及采样间隔大小 $|\tilde{K}(k+1, n) - \tilde{K}(k, n)|$ 随方位采样 n 变化. 因此对聚束模式双基地 SAR, 空间频率采样的分布与单基地 SAR 有明显的区别, 由极坐标格式到直角坐标格式的插值重采样需要运用不同的计算方法.

3 聚束模式双基地 SAR 的 PFA 成像算法

根据式(10), 在合成孔径时间内极角 $\theta(n)$ 有一个分布范围, 其中间值 θ_0 一般并非为零, 当 θ_0 的值较大时, 有两种极坐标插值方法: 一种是固定区域的极坐标插值(SSPI), 另一种是雷达视线方向的极坐标插值(LOSPI). 其中 LOSPI 基于傅立叶变换的旋转不变性, 由于可以最大可能地利用空间频域数据, 有利于保持分辨率, 因此更为实用, 只是经二维 IFFT 所得成像结果要做一坐标旋转变换才能得到 xy 坐标系下的图像. 这需要额外的计算量. 典型的 LOSPI 采样结果如图 2(c) 所示. 本文采用 LOSPI 插值采样方法.

令 $\Delta\theta(n) = \theta(n) - (\theta(0) + \theta(N_a))/2$, 则选取 $\theta(n)$ 的中间值 θ_0 如下

$$\Delta\theta(n_0) = \min_{1 \leq n < N_a} (|\Delta\theta(n)|), \theta_0 = \theta(n_0) \quad (12)$$

将直角坐标系 f_x, f_y 逆时针旋转 θ_0 角度后的直角坐标系记为 $f_{\tilde{x}}, f_{\tilde{y}}$, 且令 $\theta(n) = \theta_0 - \theta(n)$, 则空间频率采样在 $f_{\tilde{x}}, f_{\tilde{y}}$ 上的分布为

$$\begin{aligned} f_{\tilde{x}} &= \tilde{K}(k, n) \sin\theta(n), \\ f_{\tilde{y}}(k, n) &= \tilde{K}(k, n) \cos\theta(n) \end{aligned} \quad (13)$$

如图 2(a) 所示.

与单基地聚束 SAR 的 PFA 算法相同, 仍将二维插值分解为两个一维插值. 一维的插值运算可以通过多相

插值滤波器实现. 首先进行距离向的插值重采样, 设距离向插值的升采样因子为 L_k , 且插值重采样前后的采样数保持不变, 则由式(13)及图 3(a), 可计算出给定方位采样 n 时, 对应距离采样 k 的重采样位置为

$$s_k(k, n) = \text{int} \left[\frac{\tilde{K}(k, n_0) / \cos\theta(n) - \tilde{K}(1, n)}{K(1/f_s) \Lambda(n)} L_k \right] \quad (14)$$

其中 $\text{int}()$ 为取整数, 经距离插值重采样后的频率分布为

$$f_{\tilde{x}}(k, n) = \tilde{K}(k, n_0) \tan\theta(n), f_{\tilde{y}}(k, n) = \tilde{K}(k, n_0) \quad (15)$$

如图 2(b) 所示, 式(14)表明距离向是线性插值重采样过程.

在进行方位向的插值重采样之前, 首先确定重采样后的方位带宽, 为充分利用采样数据, 本文取

$$B_{\tilde{x}} = |K(1, n_0)(\tan\theta(N_a) - \tan\theta(1))| \quad (16)$$

同样设方位向插值的升采样因子为 L_n , 且插值重采样前后的采样数保持不变, 则重采样后的方位空间频率采样间隔应为 $\Delta f_{\tilde{x}} = B_{\tilde{x}}/N_a$, 记

$$G(k, n) = \tan(\theta_0 - \tan^{-1}((n - n_0) \Delta f_{\tilde{x}} / \tilde{K}(k, n_0))) \quad (17)$$

根据式(10), 对给定距离采样 k , 对应方位采样 n 的重采样位置 $s_n(k, n)$ 应满足方程

$$G(k, n) = -\Theta_x(s_n/L_n) / \Theta_y(s_n/L_n) \quad (18)$$

由图 1 所示成像几何, 平台 S_T 和 S_R 的瞬时斜视角满足

$$\begin{cases} \cos\varphi_R(n) = (R_{OR}(n_0) \cos\varphi_R(n_0) - v_R(n - n_0)/\text{PRF}) / R_{OR}(n) \\ \cos\varphi_T(n) = (R_{OT}(n_0) \cos\varphi_T(n_0) - v_T(n - n_0)/\text{PRF}) / R_{OT}(n) \end{cases} \quad (19)$$

将式(9) (17) (19) 代入方程(18)可以得到一个关于 s_n 的一元四次方程, 尽管其理论上存在解析解, 但对其求解是非常复杂的, 实际计算时可采用数值解法.

如果取近似 $R_{OR}(s_n/L_n) R_{OT}(n) \approx R_{OT}(s_n/L_n) R_{OR}(n)$, 则方程(18)的近似解析解为

$$s_n(k, n) \approx \text{int} \left[L_n \left[\frac{R_{OR}(n_0) \cos\varphi_R(n_0) - \Pi(k, n) - \text{PRF}}{v_R + v_T \Gamma(k, n)} + \frac{R_{OT}(n_0) \cos\varphi_T(n_0) \Gamma(k, n) - \text{PRF} + n_0}{v_R + v_T \Gamma(k, n)} \right] \right] \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} \Gamma(k, n) = \frac{R_{OR}(n)}{R_{OT}(n)} (\cos\alpha + G(k, n) \sin\alpha) \\ \Pi(k, n) = R_{OR}(n_0) \left[G(k, n) (\sin\varphi_T(n) \sin\varphi_R \cos\alpha + \sin\varphi_R(n) \sin\varphi_R) - \sin\varphi_T(n) \sin\varphi_T \sin\alpha \right] \end{cases}$$

以上式(18)与(20)均表明方位向一般是非线性插值重采样过程. 经上述方位插值重采样后的二维空间频率分布为

$$f_{\tilde{x}}(k, n) = (n - n_0) \Delta f_{\tilde{x}}, f_{\tilde{y}}(k, n) = \tilde{K}(k, n_0) \quad (21)$$

如图 2(c) 所示, 为 $f_x \tilde{f}_y$ 坐标系上的等间隔直角坐标分布, 因此可直接进行二维 IFFT 得到 \tilde{x}_y 坐标系上的成像结果. 整个聚束模式双基地 SAR 极坐标格式化前后的二维空间频率采样分布如图 2 所示. 根据傅立叶变换的旋转不变性, 可将 \tilde{x}_y 坐标系上的成像结果直接通过角度为 θ_0 的旋转变换, 映射到地面的 xy 坐标系.

上述聚束模式双基地 SAR 极坐标格式成像算法的处理流程如图 3 所示. 由于算法推导中忽略了距离弯曲项所产生的相位误差, 因此有效聚焦的成像场景范围会受到限制, 在实际应用中, 如果成像范围要求较大, 需采用图像分块的处理方法. 此外, 运动传感器需要提供一定精度的运动测量数据, 以保证插值计算的有效性.

表 1 仿真所用系统参数

波长 λ	0.1m
脉冲重复频率 PRF	150Hz
距离向调频带宽	150MHz
脉冲宽度	5.0 μ s
距离向采样频率	90MHz
飞行路径夹角 α	90 $^\circ$
S_T 平台高度 h_T	4000m
S_T 高度下视角 ϕ_T	60 $^\circ$
S_T 平台速度	76m/s
S_R 高度 h_R	4000m
S_R 高度下视角 ϕ_R	60 $^\circ$
S_R 平台速度	96m/s

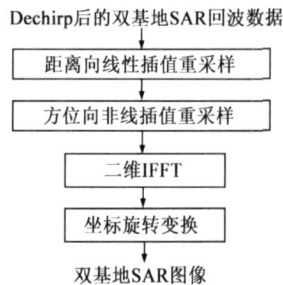
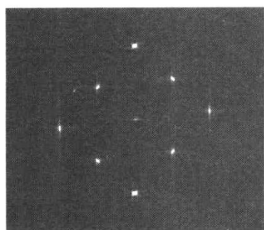


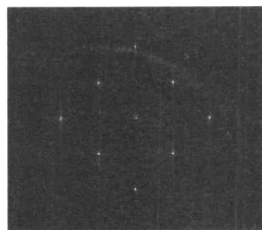
图3 聚束模式双基地SAR极坐标格式成像算法处理流程

4 仿真结果

为验证本文算法的有效性, 利用表 1 所示的系统参数进行仿真, 发射平台和接收平台均工作在正侧视模式, 飞行路径所成地面投影角度 $\alpha = 90^\circ$, 即发射平台与接收平台的飞行方向互相垂直, 且两个平台的飞行速度不相同. 在图 1 所定义的成像几何下, 地面坐标系 xy 中用于仿真的九个点目标的坐标分别为



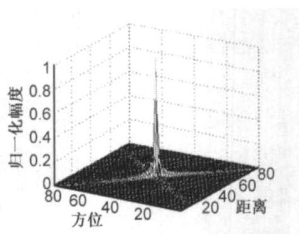
(a) 直接二维IFFT结果



(b) 本文PFA算法结果



(c) 坐标旋转后输出



(d) 边界点A(150m,150m)响应

图4 点目标仿真结果

(150m, -150m), (150m, 0), (150m, 150m)
 (0, -150m), (0, 0), (0, 150m)
 (-150m, -150m), (-150m, 0), (-150m, 150m)

图 4 为点目标仿真的部分输出结果, 根据表 1 仿真参数, 可计算得到坐标旋转角度 $\theta_0 \approx 45^\circ$, 图 4(c) 为完成坐标旋转变换后 xy 坐标系下的输出, 图 4(d) 为所选边界点目标 A(150m, 150m) 的输出响应.

5 结论

本文在对任意几何配置下聚束模式双基地 SAR 信号模型进行分析的基础上, 提出了一种可实现有效聚焦的极坐标格式成像算法. 算法根据对原始数据域空间频率采样特点的分析, 在实现由极坐标到直角坐标的插值转换时, 采用了方位非线性插值采样方法, 保持了 PFA 算法中将二维插值分解为两个一维插值的计算特点, 算法的计算流程、效率及性能和常规单基地聚束 SAR 的 PFA 成像算法相同.

参考文献:

- [1] Ender J H G. A step to bistatic SAR processing[A]. Processing of EUSAR 2004[C]. Ulm, Germany: VDE, 2004. 1362-1376.
- [2] Loffeld, Nies H, Peters V, Knedlik S. Models and useful relations for bistatic SAR[J]. IEEE Transactions on GRS, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [3] D' Aria D, Guamieri A M, Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. IEEE Transactions on GRS, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [4] Wong F H, Yeo T S. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing[J]. IEEE Transactions on GRS, 2001, 39(5): 946-953.
- [5] Bamler R, Meyer F, Liebharr W. No math: bistatic SAR processing using numerically computed transfer functions[A]. Processing of EUSAR 2006[C]. Dresden, Germany: ITG/VDE, 2006.
- [6] Rigling B D, Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR[J]. IEEE Transactions on AES, 2004, 40(4): 1147-1159.
- [7] Yates G, Horne A M, Blake A P, Middleton R, Andre D B. Bistatic SAR image formation[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 208-213.

作者简介:

孙进平 男, 1975 年出生于甘肃省. 北京航空航天大学副教授, 博士, 主要研究领域为雷达信号处理.

E-mail: sunjp2000@263.net

白 霞 女, 1978 年出生于辽宁省. 北京航空航天大学博士后, 目前的主要研究方向为高分辨率 SAR 成像、双基地 SAR 成像.

E-mail: xx_bai@sohu.com.