

## 基于 Radon 变换的双站 SAR 多普勒参数估计

朱振波<sup>①</sup> 汤子跃<sup>②</sup> 张亚标<sup>①</sup> 蒋兴舟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(海军工程大学 武汉 430033)

<sup>②</sup>(空军雷达学院 武汉 430019)

**摘要:** 多普勒参数的估计方法是机载双站 SAR 的一个关键问题, 只有获取准确的多普勒参数, 才能得到高质量的 SAR 图像。该文首先建立了平飞模式的双站 SAR 模型, 然后分析了平飞模式下双站 SAR 方位向多普勒参数的特性, 基于此提出了利用 Radon 变换实现双站 SAR 多普勒参数估计的方法。该方法能够准确地估计出实时多普勒中心和多普勒调频率, 是一种可行的双站 SAR 多普勒参数估计方法。计算机仿真也验证了该算法的有效性。

**关键词:** 双站 SAR; 多普勒参数估计; Radon 变换

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1331-05

## The Estimation of Doppler Parameter of Bistatic SAR Based on Radon Translation

Zhu Zhen-bo<sup>①</sup> Tang Zi-yue<sup>②</sup> Zhang Ya-biao<sup>①</sup> Jiang Xing-zhou<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(University of Naval Engineering, Wuhan 430033, China)

<sup>②</sup>(Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** The development of Doppler parameter estimating algorithm of bistatic SAR is a pivotal issue, which is still in progress and not sufficiently solved. This paper describes firstly the special case of equal velocity vectors and parallel flight paths of transmitter and receiver, and then makes detailed and mathematical study on the character of Doppler parameter under the above bistatic SAR configuration. Based on the above analysis, this paper provides a new Doppler parameter estimating algorithm of bistatic SAR by Radon transform, which can get accurate Doppler center and Doppler rate. As a result, it is a feasible Doppler parameter estimating algorithm of bistatic SAR, of which the validity is also proved by the simulation of computer in the last.

**Key words:** Bistatic Synthetic Aperture Radar (SAR); Doppler parameter estimating; Radon transform

### 1 引言

双站 SAR 是指发射系统和接收系统安装在不同载体上的 SAR 系统。它具有灵活的配置方式和成像模式(如平飞正侧视、跟随模式等), 可以充分利用目标的散射特性成像, 获取更多的信息<sup>[1, 2]</sup>。同常规单站 SAR 一样, 多普勒参数估计是 SAR 精确成像处理的重要组成部分, 当采用的多普勒中心和多普勒调频率存在较大误差时, 将会降低参考函数或补偿因子的精确性, 只有获取准确的多普勒参数, 才能得到高质量的 SAR 图像。对于双站 SAR 系统, 收、发系统分离的特殊性使得目标回波回收方式发生改变, 收发波束在空域的叠加可能导致合成方向图不再中心对称, 这些都导致了常规 SAR 中估计多普勒中心频率的杂波锁定算法和估计多普勒调频率的自动聚焦算法不能被简单地应用在双站 SAR 领域<sup>[3, 4]</sup>。

针对平飞模式的双站 SAR 系统, 本文分析了该模式下

双站 SAR 方位向多普勒参数与该双站几何结构的关系, 基于此提出了利用 Radon 变换实现双站 SAR 多普勒参数估计的方法。通过选择适当的数据窗口大小, 该方法能够准确地估计出实时多普勒中心和多普勒调频率, 避免了其它多普勒中心估计方法中的多普勒模糊问题, 且它的应用不受双站几何结构的影响, 它是一种可行的基于回波数据的双站 SAR 多普勒参数估计方法, 最后给出了相应的计算机仿真。

### 2 双站 SAR 的信号模型

同常规 SAR 系统一样, 双站 SAR 系统的模式通常也有 3 种: 条带式、扫描式和聚束式。条带式成像的双站 SAR 可以采用正侧视(收、发波束指向与其平台运动方向垂直), 也可以采用斜侧视(收、发波束指向与其平台运动方向有一定夹角)的工作方式, 其中斜侧视工作方式更具代表性, 斜侧视工作方式时双站 SAR 的收、发平台与目标位置的几何关系如图 1, 其中收、发平台到测绘中心  $P_n$  的斜侧视距离为  $R_{R0}$ ,  $R_{T0}$ ;  $\alpha_R, \alpha_T$  分别表示收发载机天线相位中心到目标的斜视角, 收、发平台分别作等速  $V_0$  匀速直线飞行。定义

$R(t; R_{T0}, R_{R0})$  为发射机经点目标  $P$  反射到接收机的距离和, 在不考虑幅度调制的条件下, 接收信号可表示为

$$S_r(\tau, t; R_{T0}, R_{R0}) = A \exp \left\{ -j\pi K \left[ \tau - \frac{2R(t; R_{T0}, R_{R0})}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} R(t; R_{T0}, R_{R0}) \right\} \quad (1)$$

其中  $c$  表示光速,  $K$  表示发射信号调频斜率,  $\lambda$  表示波长,  $\tau$  表示快时间,  $t$  表示慢时间。

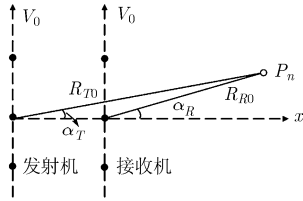


图1 平飞斜视模式双站 SAR 模型

### 3 双站 SAR 多普勒参数估计

#### 3.1 多普勒参数与双站几何结构的关系

在如图1所示的双站SAR模型中, 接收载机到测绘中心  $P_n$  的距离  $R_R(t)$  的关系式

$$R_R^2(t) = R_{R0}^2 + V_0^2 t^2 - 2R_{R0}V_0 t \sin(\alpha_{R0}) \quad (2)$$

当合成孔径长度  $L_s \ll R_{R0}$  时, 接收载机到测绘中心  $P_n$  的距离为

$$R_R(t) \approx R_{R0} + V_0^2 t^2 / (2R_{R0}) - V_0 t \sin(\alpha_{R0}) \quad (3)$$

同理, 发射载机到测绘中心  $P_n$  的距离为

$$R_T(t) \approx R_{T0} + V_0^2 t^2 / (2R_{T0}) - V_0 t \sin(\alpha_{T0}) \quad (4)$$

则, 如图1的双站 SAR 收发距离和表示为

$$R(t) \approx R_{R0} + R_{T0} + \frac{V_0^2 t^2}{2R_{R0}} + \frac{V_0^2 t^2}{2R_{T0}} - V_0 t \sin(\alpha_{R0}) - V_0 t \sin(\alpha_{T0}) \quad (5)$$

由式(5)可以求得  $t$  时刻方位向多普勒频率  $f(t)$  为

$$f(t) = -\frac{\dot{R}(t)}{\lambda} = \frac{V_0 \sin(\alpha_{R0}) + V_0 \sin(\alpha_{T0})}{\lambda} - \left( \frac{V_0^2}{\lambda R_{R0}} + \frac{V_0^2}{\lambda R_{T0}} \right) t \quad (6)$$

由式(6), 可以得到多普勒参数为

$$f_{Dc} = [V_0 \sin(\alpha_{R0}) + V_0 \sin(\alpha_{T0})] / \lambda \quad (7)$$

$$f_r = -V_0^2 / (\lambda R_{R0}) - V_0^2 / (\lambda R_{T0}) \quad (8)$$

将式(7), 式(8)代入式(5), 可以得到双站 SAR 收发距离和为

$$R(t) \approx R_{R0} + R_{T0} - \lambda f_{Dc} t - (\lambda f_r / 2) t^2 \quad (9)$$

式(9)中的线性部分为距离走动, 其距离走动的变化斜率为  $k_r = -\lambda f_{Dc}$ , 因此由式(7)和式(9)可知, 只要能够获取选定的双站 SAR 回波数据的距离走动斜率  $k_r$ , 就可以得到该

数据段的多普勒中心估计值为

$$f_{Dc\_g} = -k_r / \lambda \quad (10)$$

同时, 对成像区域中某个给定的距离单元, 在合成孔径成像时间内, 其多普勒频率是线性的, 文献[4]基于 Radon 变换实现了对常规单站 SAR 的多普勒中心估计, 由前面分析可知, 利用时频技术同样可以实现多普勒中心和调频率的估计。

#### 3.2 Radon 变换原理

Radon 变换是通过直线积分将一二维平面转换为另一个二维平面, 它可以用来检测二维平面上的直线分量<sup>[3-6]</sup>。

平面  $S$  上二维 Radon 变换的定义为

$$g_r(\theta, \rho) = \iint_S g(x, y) \cdot \delta(\rho - x \cos(\theta) - y \sin(\theta)) dx dy \quad (11)$$

其中  $S$  表示整个  $x-y$  平面,  $g(x, y)$  表示平面上点  $(x, y)$  的幅值,  $\delta(\alpha)$  是狄拉克函数。如图2, 由于  $\delta(\alpha)$  的作用, Radon 变换沿着直线  $y = ax + b$  进行 ( $a = -1/\tan\theta_0, b = -\rho_0/\sin\theta_0$ ), 其中  $\rho_0$  是二维平面  $S$  的原点到直线  $y = ax + b$  的距离,  $\theta_0$  则是横坐标到直线的法线的夹角。通过积分作用, 直线  $y = ax + b$  被映射到  $\rho-\theta$  平面内的一个点。因此, 基于 Radon 变换可以实现二维平面上直线特征的提取。

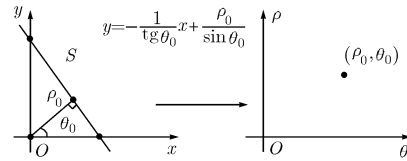


图2 Radon 变换原理示意图

#### 3.3 多普勒中心估计

由前面的分析可知, 距离走动分量是线性的, 只要能够获取选定的双站 SAR 回波数据的距离走动斜率  $k_r$ , 就可以得到该数据段的多普勒中心估计值。基于 Radon 变换可以实现二维平面上直线特征的提取, 因此对距离压缩后的数据平面进行 Radon 变换, 可以提取所选数据段的距离压缩曲线的距离走动斜率, 然后根据式(10)可以得到多普勒中心的估计值, 这种多普勒中心的估计方法, 避免了常规方法中的多普勒模糊问题<sup>[6]</sup>。

基于 Radon 变换的多普勒中心估计方法详细流程如下:

(1)进行原始回波数据的距离压缩处理;

(2)定义窗大小, 从距离压缩后的成像平面上截取待估计的数据平面  $S$ ;

(3)求所选数据平面  $S$  上每个像素点的幅度, 得到二维幅值平面  $S_1$ ;

(4)将二维幅值平面  $S_1$  的纵横坐标变换到“秒-米”, 然后进行 Radon 变换, 将  $S_1$  映射到  $\rho-\theta$  平面, 得到  $g_r(\theta, \rho) = \text{RT}\{S_1\}$ ,  $\text{RT}\{\}$  表示 Radon 变换;

(5) 计算  $g_r^n(\theta, \rho)$ , 然后对给定的  $\theta_0$  值, 沿  $\rho$  方向进行积分运算得到  $d(\theta_0) = \int_{\rho-\theta} g_r^n(\theta_0, \rho) d\rho$ , 其中  $n \geq 2$ ;

(6) 在一维平面  $d(\theta)$  上, 进行归一化处理, 并计算峰值所对应的  $\theta_e$  值。

(7) 计算实际的距离走动斜率  $k_r = \text{tg}\theta_e$

(8) 根据式(10)得到多普勒中心的估计值  $f_{Dc-g} = -k_r/\lambda$ 。

在以上的多普勒参数估计方法中, 第(3)步中的二维平面  $S_1$  其横纵坐标是方位和距离向的采样点数  $(M, N)$ , 当不将其对应地变换到“秒-米”坐标单位时, 经过 Radon 变换后估计得到的直线倾斜角  $\theta_e$  不是真正的距离走动倾斜角, 这时需要根据数据平面  $S_1$  的横纵坐标的变换比例  $K$  和  $\theta_e$  值, 来计算实际的距离走动斜率  $k_r = K \text{tg}\theta_e$ , 其中  $K = \text{PRF} \cdot \Delta r$ ,  $\text{PRF}$  表示脉冲重复频率,  $\Delta r = c/f_s$ ,  $c$  为光速,  $f_s$  为距离向采样频率。由于  $\text{PRF}$  值较大, 因此在以  $(M, N)$  为二维平面的横纵坐标进行 Radon 变换后, 对应估计得到的直线倾斜角  $\theta_e$  非常小, 例如: 给定待估的多普勒中心  $f_{Dc} = 200\text{Hz}$ , 脉冲重复频率  $\text{PRF} = 500\text{Hz}$ ,  $\Delta r = 2\text{m}$ ,  $\lambda = 0.03\text{m}$  时,  $\text{tg}\theta_e = -\lambda \cdot f_{Dc}/K = 0.006$ ,  $\theta_e \approx 0.006 \text{ rad}$ , 当要求估计的多普勒中心稳定度  $\Delta f_{Dc-g}/f_{Dc} \leq 0.05$  时, 则要求  $\theta_e$  的估计值稳定度  $\leq 0.05$ , 这显然是难度很大的, 因此需要在第(3)步中将二维平面  $S_1$  的横纵坐标变换到“秒-米”坐标单位, 然后再进行 Radon 变换。图 3 给出了基于 Radon 变换的多普勒中心估计过程的主要流程示意图, 其中①是对选取的回波数据进行距离压缩处理, ②对距离压缩后的数据进行 Radon 变换, ③对 Radon 变换结果进行积分  $d(\theta_0) = \int_{\rho-\theta} g_r^2(\theta_0, \rho) d\rho$ , 然后可以估计走动斜率。

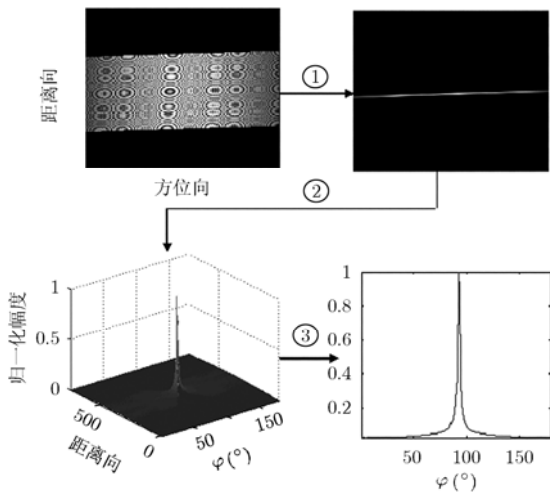


图 3 基于 Radon 变换的多普勒中心估计示意图

### 3.4 多普勒调频率估计

对成像区域中某个给定的距离单元, 在合成孔径成像时

间内, 其多普勒频率是线性的, 且在一定聚焦深度内的子测绘带, 可以选用相同的多普勒调频率。因此, 对选取的某一距离单元的回波信号, 可以利用 Wigner-Radon 变换估计该距离单元处的多普勒调频率。

基于 Wigner-Radon 变换的多普勒调频率的估计方法详细流程如下:

(1) 进行原始回波数据的距离压缩处理;

(2) 根据估计的多普勒中心值完成距离走动校正;

(3) 选取某距离单元的回波数据, 进行 Wigner-Ville 变换, 得到二维“时间-频率”平面  $S$ ;

(4) 对二维幅值平面  $S$  进行 Radon 变换, 将  $S$  平面映射到  $\rho-\theta$  平面, 得到  $g_r(\theta, \rho) = \text{RT}\{S\}$ ;

(5) 计算  $g_r^n(\theta, \rho)$ , 然后对给定的  $\theta_0$  值, 沿  $\rho$  方向进行积分运算得到  $d(\theta_0) = \int_{\rho-\theta} g_r^n(\theta_0, \rho) d\rho$ , 其中  $n \geq 2$ ;

(6) 在一维平面  $d(\theta)$  上, 进行归一化处理, 并计算峰值所对应的  $\theta_e$  值, 得到多普勒调频率的估计值  $f_r = \text{tg}\theta_e$ ;

(7) 在该子测绘带中心两侧附近, 对称选择  $n$  个距离单元, 分别按照步骤(1)-步骤(6)分别得到相应距离单元的多普勒调频率估计值  $f_{rn} = \text{tg}\theta_{en}$ ;

(8) 计算多普勒调频率估计值  $f_{rn}$  的方差值  $\sigma_{fn}$ , 去除方差较大的  $f_{rn}$ , 将剩下的多普勒调频率估计值求平均, 将其平均值  $\bar{f}_r$  作为最终的多普勒调频率的估计值。

图 4 给出了基于 Wigner-Radon 变换的多普勒调频率估计的主要流程示意图。其中, ①是对选取的某距离单元回波数据进行 Wigner-Ville 变换, ②对 Wigner-Ville 变换后的二维“时间-频率”平面进行 Radon 变换, ③对 Radon 变换结果进行积分  $d(\theta_0) = \int_{\rho-\theta} g_r^2(\theta_0, \rho) d\rho$ , 然后可以估计多普勒调频率。图 5 为多普勒参数估计的流程框图。

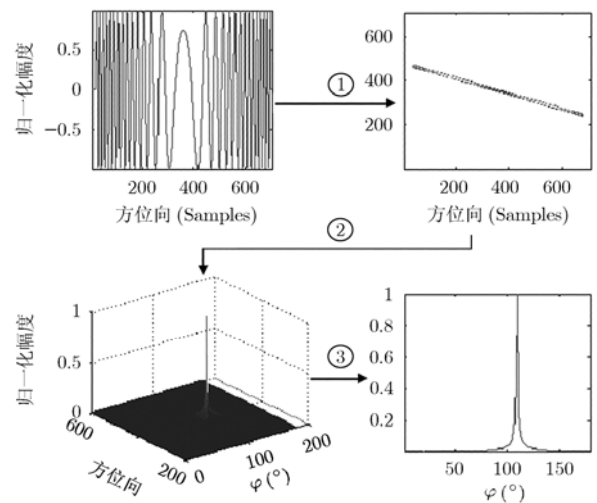


图 4 基于 Wigner-Radon 变换的多普勒调频率估计示意图

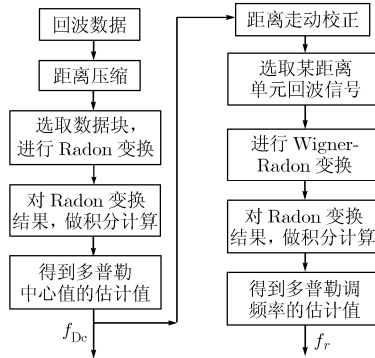


图 5 多普勒参数估计流程

### 4 仿真

仿真中系统参数：信号带宽 100MHz，脉冲重复频率 200Hz，脉冲宽度 10 μs，载机速度 70m/s；发射载机高度 6km；接收载机高度 3km，发射载机正侧视距离  $R_{Tg} = 30\text{km}$ ，接收载机正侧视距离  $R_{Rg} = 12\text{km}$ ，发射斜视角  $\alpha_R = 0.8^\circ$ ，接收斜视角  $\alpha_R = 2^\circ$ 。仿真中地面点目标相对位置关系如图 6 所示，每组目标的距离向间隔为 5m；每组目标的方位间隔为 1.75m。

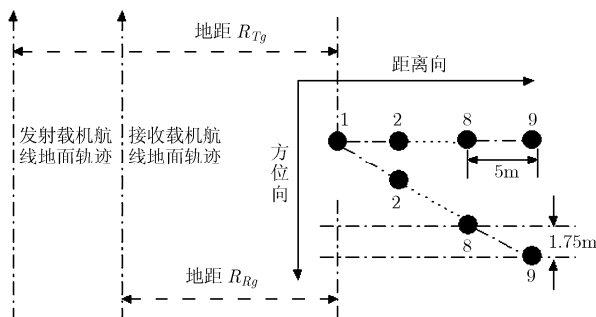


图 6 仿真点目标位置关系

图 7 给出了基于 Radon 变换的多普勒中心估计结果，其中(a)表示回波数据距离压缩后的结果，(b)表示对距离压缩后的二维平面进行 Radon 变换的结果，(c)表示对 Radon 变换结果沿距离向积分的结果，其中  $n$  表示积分运算  $d(\theta_0) = \int_{\rho-\theta} g_r^n(\theta_0, \rho) d\rho$  中的指数变量。图 8 给出了基于 Radon 变换的多普勒调频率估计结果和最终成像结果，其中(a)对某距离单元回波进行 Wigner-Radon 变换后，沿时间维积分的结果。对本文的仿真模型，基于 Radon 变换的多普勒参数估计方法，得到的估计值为：多普勒中心  $f_{Dc} = 108.54\text{Hz}$ ，多普勒调频率  $f_r = -18.12\text{Hz/s}$ ，基于以上估计得到的多普勒参数，得到了如图 8(b)的最终成像结果。

该方法中，主要计算量集中在 Radon 变换上，在实际应用中，为了兼顾多普勒参数估计准确度和时间效率，在进行多普勒中心估计时，可以根据距离压缩后的图像数据选取  $m \times n$  大小的数据块进行 Radon 变换，这样在实际数据的处

理中，可以沿方位向实时选取成像数据块，得到实时的多普勒中心估计结果；在进行多普勒调频率估计时，沿方位向实时选取某距离单元的回波数据块，获得实时多普勒调频率的估计，图 8(a)就是选取某距离单元方位向 500 个采样点的仿真结果。

### 5 结束语

多普勒参数估计是双站 SAR 系统的一个重要研究内容，目前的公开文献针对该问题的研究很少。针对平飞模式的双站 SAR 系统，本文提出了一种基于回波数据利用 Radon 变换实现双站 SAR 多普勒参数估计的方法。通过计算机仿真可以验证，该方法能够解决双站 SAR 在平飞模式下的多普勒参数估计问题，对双站 SAR 的工程实现有一定的意义。应该说，针对双站 SAR 多普勒参数估计方法的研究仍在进行中，下一步的研究方向将是：在本文研究内容的基础上进一步完善基于 Radon 变换的双站 SAR 多普勒参数估计方法，继续探索其它可行的基于回波数据的多普勒参数估计方法。

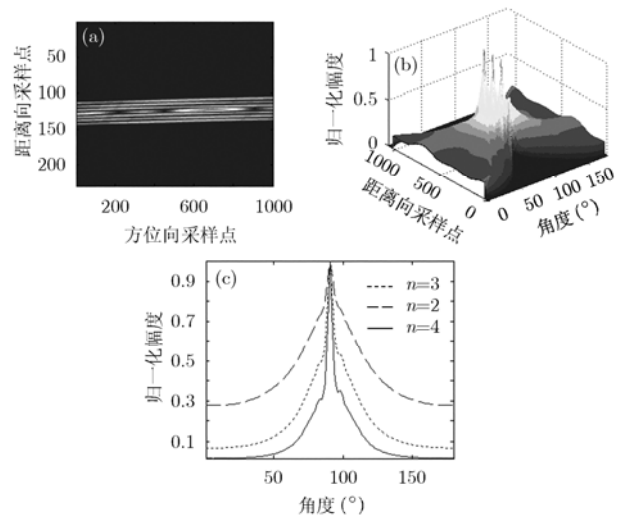


图 7 基于 Radon 变换的多普勒中心估计

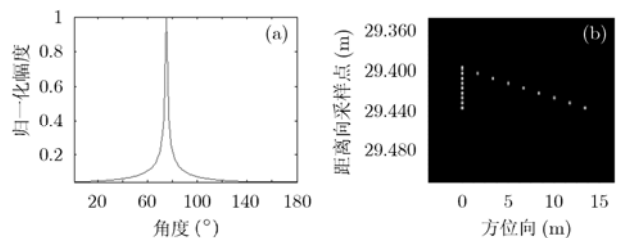


图 8 基于 Radon 变换的多普勒调频率估计结果和最终成像结果

### 参考文献

[1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 10-20.  
Tang Zi-yue and Zhang Shou-rong. Bistatic SAR System Theory. Beijing: Science Publishing House, 2003: 10-20.

- [2] Ender J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR. *IEEE International Geosci. and Remote Sensing Symp.*, Toulouse, July 2003, 3: 1438-1441.
- [3] Soumekh M. Wide-bandwidth continuous-wave monostatic/bistatic synthetic aperture radar imaging. In *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago, 1998, 3: 361-365.
- [4] Kong Young-Kyun, Cho Byung-Lae, and Kim Young-Soo. Ambiguity-free Doppler centroid estimation technique for airborne SAR using the Radon transform. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2005, 43(4): 716-721.
- [5] Ortiz A M, Loffeld O, and Knedlik S. Comparison of Doppler centroid estimators in bistatic airborne SAR. In *Proceedings of IGASS*, Seoul, Korea, 2005, 3: 1963-1966.
- [6] 汤子跃, 朱敏慧. 一种SAR图像舰船航迹的CFAR检测方法. *电子学报*, 2002, 30(9): 1336-1339.
- Tang Zi-yue and Zhu Min-hui. A CFAR detection method of ship wakes in SAR images. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9): 1336-1339.
- 朱振波: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像技术.
- 汤子跃: 男, 1966年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统、信号处理以及SAR成像等领域的研究.
- 蒋兴舟: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达及水声信号理论的研究.