

一种弹载 SAR 子孔径成像算法

江 淮^① 陈 思^{*①} 赵惠昌^① 汉 敏^② 张淑宁^①
^①(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)
^②(东南大学微波与毫米波重点实验室 南京 210094)

摘 要: 弹载合成孔径雷达在子孔径信号处理时, 由于运动的复杂性和距离方位的强耦合, 增加了成像处理的难度。针对这一问题, 该文分析了该成像体制下的距离徙动特性并引入二次调频函数进行统一距离徙动校正; 在方位向处理上则通过频域投影补偿调频率空变。与传统算法相比, 新算法可对子孔径回波进行更有效的成像与聚焦, 仿真结果证明了算法的正确性和有效性。

关键词: 弹载 SAR; 子孔径成像; 2 维加速度; 方位频域投影

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)10-2526-05

DOI: 10.11999/JEIT161337

Subaperture Imaging Algorithm for Missile-borne SAR

JIANG Huai^① CHEN Si^① ZHAO Huichang^① HAN Min^② ZHANG Shuning^①

^①(School of Electronic & Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

^②(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the missile borne subaperture SAR mode, the complicate motion of the platform and the strong coupling between range and azimuth present substantial difficulty for echo data processing. To solve this problem, the range migration characteristics of the echo are analyzed and a secondary frequency function is introduced for uniform migration correction. During the azimuth processing, the azimuth frequency domain projection is applied to compensating the Doppler frequency modulation variation. Compared with the traditional algorithm, this proposed algorithm can focus the echo more effectively. Simulation results show the correctness and validity of the proposed algorithm.

Key words: Missile-borne SAR; Subaperture imaging; 2-D acceleration; Azimuth frequency domain projection

1 引言

弹载 SAR(Synthetic Aperture Radar)由于具有大斜视、速度快、宽孔径和运动复杂的特点, 不适合采用复杂度高的全孔径成像算法, 更适合子孔径信号处理, 以达到降低运动补偿难度和简化处理流程的目的。在弹载 SAR 信号处理的算法上, 文献[1]利用级数反演推导了二维加速模型下的信号频谱; 文献[2,3]则在文献[1]的基础上考虑方位向空变, 改善了方位聚焦深度, 但算法只适合于全孔径成像模式; 文献[4]提出了恒加速模型下的波数域算法, 提高了图像聚焦的质量, 但算法未考虑频谱空变性的问题, 影响方位向的聚焦效果; 文献[5]利用频域非线性变标实现了弹载 SAR 子孔径数据聚焦, 但在

距离徙动校正中未考虑距离走动的空变性, 限制了成像场景大小; 文献[6]提出了方位向频域分块的方法, 解决了距离徙动随方位向空变的问题, 但算法实现过程中存在复杂的方位向分块和拼接操作, 使算法的实际应用受到限制。

针对弹载 SAR 子孔径信号的特点, 本文分析了距离徙动特性并引入二次调频函数进行统一距离徙动校正处理; 在方位向处理中则利用方位向粗匹配后频域支撑域的有限性进行投影聚焦。与传统算法^[3,5,6]相比, 本文算法可对弹载 SAR 子孔径回波进行更有效的处理。仿真结果证明了算法的正确性和有效性。

2 弹载 SAR 子孔径回波信号模型

弹载 SAR 成像几何如图 1 所示: X 轴表示方位向, Y 轴表示跨航向, Z 轴表示高度; 弹体在 XOZ 平面做 2 维匀加速运动, 且其初始坐标位置为 $[0, 0, H]$; 设弹体的水平速度、垂直速度分别为 V_x, V_z , 水平加速度、垂直加速度分别为 a_x, a_z ; 以 t_a, t_r 分别表示慢、快时间, f_a, f_r 分别表示慢、快时间频率;

收稿日期: 2016-12-08; 改回日期: 2017-05-09; 网络出版: 2017-06-23

*通信作者: 陈思 zhaohch353@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61301216), 江苏省自然科学基金(BK20160848)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61301216), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20160848)

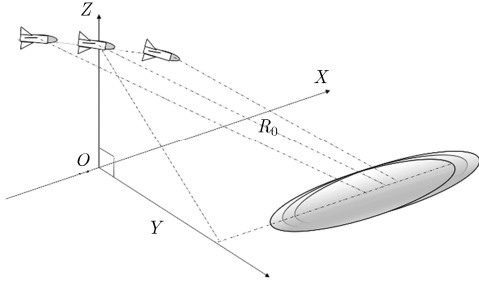


图 1 弹载 SAR 子孔径成像几何

以 R 表示 t_a 时刻的弹目距离, X_n 表示目标方位向位置, Y_n 为目标跨航向位置, R_0 为成像中心时刻的初始斜距; f_c 表示发射信号载波, λ 为波长, c 为电磁波传输速度; 则经过距离向匹配后的回波信号可表示为式(1a), 斜距可泰勒展开为式(1b)。

$$S_1(f_r, t_a) = \exp(-4j\pi(f_r + f_c)R/c) \quad (1a)$$

$$R = \left((X_n - V_x t_a - 0.5a_x t_a^2) + R_0^2 - H^2 - X_n^2 + (H + V_z t_a + 0.5a_z t_a^2) \right)^{1/2} \approx R_0 + b_1 t_a + b_2 t_a^2 + b_3 t_a^3 + \dots \quad (1b)$$

3 回波信号处理

弹载 SAR 子孔径成像算法流程如图 2 所示, 下面对算法进行介绍。

3.1 距离徙动校正

考虑到 3 次及高次项对距离徙动的影响较小, 为方便分析仅考虑式(1b)的前 3 项, 则经过线性走动校正后, 由瞬时速度与多普勒频率的关系, 在距离多普勒域进行统一校正时, 以下标 ref 表示参考点对应斜距展开系数, 则场景内任意点目标的距离徙动校正误差 R_Δ 可写为

$$(b_1 - b_{1\text{ref}})t_a + 2b_2 t_a = 2b_{2\text{ref}} t_*^2 \quad (2)$$

$$R_\Delta = b_2 \left(t_a + \frac{(b_1 - b_{1\text{ref}})}{2b_2} \right)^2 - b_{2\text{ref}} t_*^2 \quad (3)$$

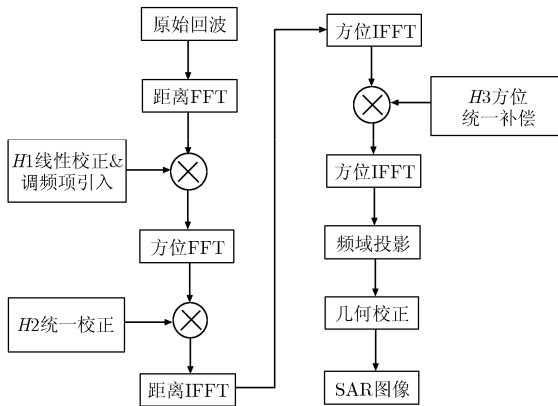


图 2 算法流程图

式(3)的意义为参考点目标在 t_* 时刻与任意点目标在 t_a 时刻的瞬时速度相同。为补偿 $(b_1 - b_{1\text{ref}})$ 的影响, 可在分母中引入常数 γ 。用 $b_2 + \gamma$ 替换 b_2 重新代入式(3), 则有

$$R_\Delta = \frac{b_2 + \gamma}{b_{2\text{ref}} + \gamma} (b_{2\text{ref}} - b_2) \left(t_a + \frac{(b_1 - b_{1\text{ref}})}{2(b_2 + \gamma)} \right)^2 \quad (4)$$

由式(4)知, 若 γ 足够大, 将有 $(b_1 - b_{1\text{ref}})/(2b_2 + 2\gamma) \approx 0$, 从而补偿残余线性项的影响。综合以上分析, 可构造参考函数式(5)对回波式(1a)进行补偿。

$$H_1 = \exp(4j\pi(f_r + f_c)(b_{1\text{ref}} t_a - \gamma t_a^2)/c) \quad (5)$$

补偿 H_1 后, 进一步由文献[3,5,7]中的距离徙动校正方法, 可知处理完距离向的回波为

$$S_2(t_r, t_a) = \text{sinc} \left(t_r - 2 \frac{R_0}{c} \right) \cdot \exp \left(-4j\pi \frac{f_c}{c} (R - b_{1\text{ref}} t_a + \gamma t_a^2) \right) \quad (6)$$

3.2 基于频域投影的方位向聚焦

首先构造统一聚焦函数对各个距离门的方位目标进行粗聚焦和高次项补偿:

$$H_3 = \exp(4j\pi f_c (\gamma t_a^2 + b_{2\text{ref}} t_a^2 + b_{3\text{ref}} t_a^3 + \dots)/c) \quad (7)$$

式(7)中, $b_{2\text{ref}}, b_{3\text{ref}}$ 表示距离向位置为 R_n 的方位中心目标斜距展开式中对应系数; 令 $S_n(1), S_n(2), \dots, S_n(N_a)$ 表示回波第 n 个距离门对应的方位离散信号, $t_a(1), t_a(2), \dots, t_a(N_a)$ 为慢时间 t_a 的离散采样, $f_a(1), f_a(2), \dots, f_a(N_a)$ 为方位频率 f_a 的离散采样; 由后向投影^[8]成像法可知在方位时域可通过式(8a)的矩阵乘法聚焦数据:

$$\begin{bmatrix} g(1,1) & g(1,2) & \dots & g(1,N_a) \\ g(2,1) & g(2,2) & \dots & g(2,N_a) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(N_a,1) & g(N_a,2) & \dots & g(N_a,N_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_n(1) \\ S_n(2) \\ \vdots \\ S_n(N_a) \end{bmatrix} = \mathbf{G} \mathbf{S}_n \quad (8a)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta(k) &= 4(b_{2n}(k) - b_{2\text{ref}})/\lambda \\ g(k, m) &= \exp(j\pi(2f(k)t_a(m) + \beta(k)t_a^2(m))) \end{aligned} \right\} \quad (8b)$$

令 \mathbf{D} 为 DFT 变换矩阵, 则 \mathbf{D}^* 为 IDFT 变换矩阵, 于是式(8a)可改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{G} \mathbf{S}_n &= \mathbf{G} \mathbf{D} \mathbf{D}^* \mathbf{S}_n = (\mathbf{G} \mathbf{D}) (\mathbf{D}^* \mathbf{S}_n) \\ &= \text{ftx}(\mathbf{G}) \text{ifty}(\mathbf{S}_n) = \mathbf{G}_f \mathbf{S}_{nf} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中, ftx 表示对矩阵作行 FFT 变换, ifty 表示矩阵列 IFFT 变换; 由文献[9]及菲涅尔积分定义可知 \mathbf{G} 矩阵第 k 行信号的 FFT 变换结果为

$$h_f(k) = [\text{FresnelC}(u_1) + \text{FresnelC}(u_2) + j\text{FresnelS}(u_1) + j\text{FresnelS}(u_2)] \cdot \frac{\exp(-j\pi(f_a - f_a(k))^2/\beta(k))}{\sqrt{2\beta(k)T_{\text{sar}}}} \quad (10a)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \sqrt{2\beta(k)} \left(\frac{T_{\text{sar}}}{2} - \frac{f_a - f_a(k)}{\beta(k)} \right) \\ u_2 &= \sqrt{2\beta(k)} \left(\frac{T_{\text{sar}}}{2} + \frac{f_a - f_a(k)}{\beta(k)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10b)$$

式(10)中, T_{sar} 表示子孔径成像时间; FresnelC 与 FresnelS 表示菲涅尔积分。由于式(10a)是个窄带信号, 能量集中在其带宽内, 故投影成像时只需计算它在频域支撑域内离散频率点的频谱并与方位信号作内积即可。综上所述, 方位频域投影聚焦处理的步骤如下:

(1)对距离徙动后的回波补偿 H_3 并作方位向 IFFT 变换。

(2)取回波第 n 个距离门的方位向信号 S_{nf} 。

(3)对第 k 个方位离散频率 $f_a(k)$, 由式(8b)计算 $\beta(k)$ 。选取窗长 L 并由式(10a)计算频率区间 $[f_a(k) - LPRF/N_w, f_a(k) + LPRF/N_w]$ 内的离散频谱, 将所得结果与方位向回波信号 S_{nf} 做向量内积, 即得第 k 个离散频点的聚焦结果; 重复步骤(3)直到所有的离散频点得到聚焦, 从而完成第 n 个距离门的方位向

信号处理。

(4)重复步骤(2)和步骤(3)处理完所有距离门。最后通过几何校正^[5,6]使图像满足应用要求。

4 仿真验证与比较

下面用一组常见雷达参数(表 1)进行仿真验证。仿真场景的成像几何如图 1 所示。

表 1 仿真雷达参数

参数名称	数值	参数名称	数值
载波频率	10 GHz	成像斜视角	70°
弹体垂直初速度	-400 m/s	子孔径时间	0.3 s
弹体垂直加速度	-9.8 m/s ²	脉冲重复频率	7 kHz
弹体水平初速度	1000 m/s	发射脉冲时宽	2.5 μs
弹体水平加速度	100 m/s ²	发射脉冲带宽	250 MHz
弹体初始高度	10 km	场景成像大小	1.5 km × 1.5 km

为比较算法的性能, 我们同时用文献[5]中的传统算法进行成像作为对比。传统算法仅在线性走动校正的基础上近似进行 2 维频谱去耦, 距离徙动的效果较差(图 3)。而经过本文算法的距离徙动校正效果见图 4, 表明了算法在距离向上处理的优势。

由于传统算法的徙动校正方法使方位向散焦, 为表明本文算法在方位向处理的性能优势, 我们在

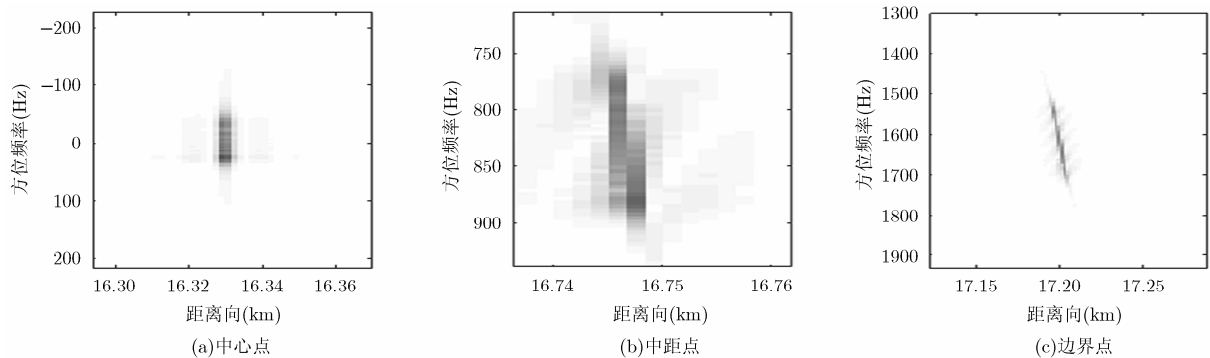


图 3 传统算法距离徙动校正效果

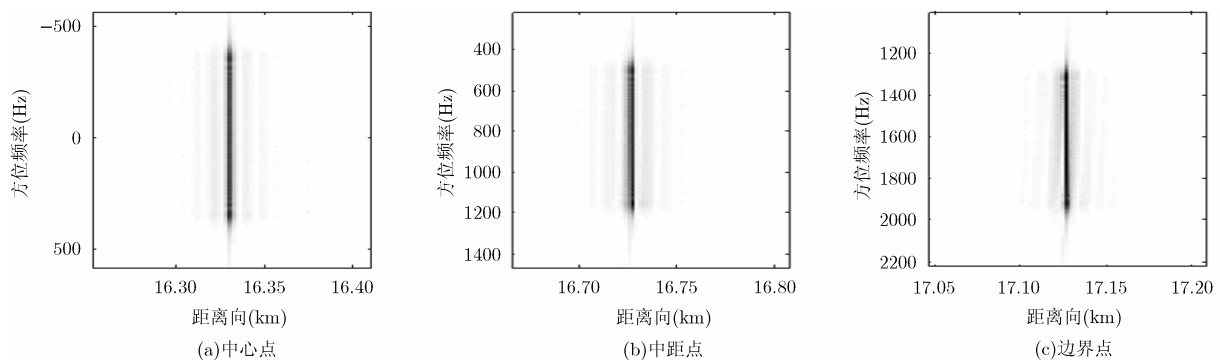


图 4 本文算法距离徙动校正效果

采用本文距离徙动校正的前提下使用传统算法^[3,5]进行方位聚焦。由图5可知传统算法由于调频项近似精度不足,中距点、边界点均存在失配;而本文算法没有对调频率作任何近似,方位向压缩效果更为理想(图6)。

5 结束语

针对弹载 SAR 子孔径成像问题,本文首先分析了回波信号的徙动特性,并引入调频项补偿了残余线性项的影响;在方位向处理时则从时域投影的原理出发,插入 DFT 变换矩阵并利用信号频域支撑域

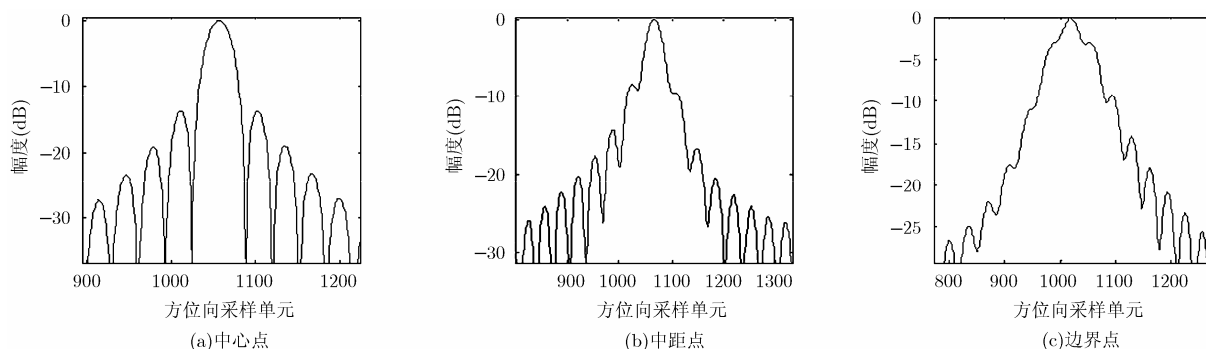


图 5 传统 NLCS 算法方位向剖面

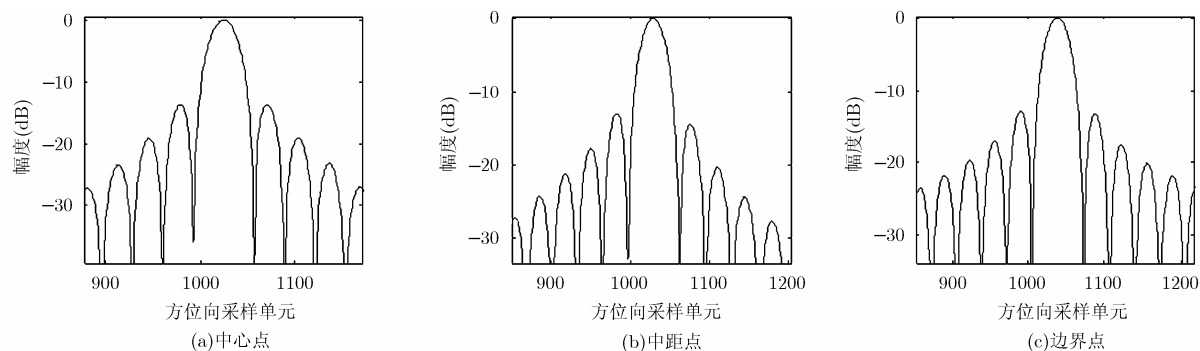


图 6 本文算法方位向剖面

的有限性进行频域投影;最后通过仿真验证说明本文算法相对于传统处理方法的优越性,对弹载 SAR 的进一步工程实现和理论研究具一定的意义。

参考文献

- [1] 易予生, 张林让, 刘楠等. 基于级数反演的俯冲加速运动状态弹载 SAR 成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2563-2568.
YI Yusheng, ZHANG Linrang, LIU Nan, *et al.* Imaging algorithm for missile-borne SAR with diving acceleration based on series reversion[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2009, 31(12): 2563-2568.
- [2] 周鹏, 周松, 熊涛, 等. 基于级数反演的弹载 SAR 下降段 CZT 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 1806-1808. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00452.
ZHOU Peng, ZHOU Song, XIONG Tao, *et al.* A chirp-Z transform imaging algorithm for missile borne SAR with diving maneuver based on the method of series reversion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 1806-1808. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00452.
- [3] 周松, 包敏, 周鹏, 等. 基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1420-1426. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.01124.
ZHOU Song, BAO Min, ZHOU Peng, *et al.* An imaging algorithm for missile-borne SAR with downward movement based on azimuth nonlinear chirp scaling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1420-1426. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.01124.
- [4] TANG Shiyang, ZHANG Linrang, GUO Ping, *et al.* An Omega-K algorithm for highly squinted missile-borne SAR with constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 9(11): 1569-1602. doi: 10.1109/LGRS.1014.2301718.
- [5] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达大斜视子孔径频域相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 954-959. doi: 10.11999/JEIT140618.
LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squint missile-

- borne synthetic aperture radar with subaperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 954-959. doi: 10.11999/JEIT140618.
- [6] ZENG Tao, LI Yinghe, DING Zegang, *et al.* Subaperture approach based on azimuth-dependent range cell migration correction and azimuth focusing parameter equalization for maneuvering high-squint-mode SAR omega-K algorithm for highly squinted missile-borne SAR with constant acceleration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6719-6733. doi: 10.1109/TGRS.015.2447393.
- [7] LIU Gaogao, LI Peng, TANG Shiyang, *et al.* Focusing highly squinted data with motion errors based on modified non-linear chirp scaling[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2013, 12(20): 568-612. doi: 10.1049/iet-rsn.2012.0134.
- [8] 董祺, 孙光才, 杨泽民, 等. 直角坐标多级后投影聚束SAR成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(6): 1482-1488. doi: 10.11999/JEIT150990.
- DONG Qi, SUN Guangcai, YANG Zemin, *et al.* Cartesian coordinates factorized back-projection algorithm for spotlight SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1482-1488. doi: 10.11999/JEIT150990.
- [9] 吕幼新, 张明友, 向敬成. 降低线性调频脉冲压缩信号旁瓣的方法[J]. *电子科技大学学报*, 1993, 22(4): 344-349.
- LV Youxin, ZHANG Mingyou, and XIANG Jingchen. A method for reducing sidelobe of linear frequency modulated pulse compression signal[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1993, 22(4): 344-349.
- 江 淮: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为SAR成像处理.
- 陈 思: 男, 1988年生, 讲师, 博士, 研究方向为SAR成像处理.
- 赵惠昌: 男, 1988年生, 教授, 博士, 研究方向为引信信号处理、电子对抗等.
- 汉 敏: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为SAR成像处理、DOA估计等.
- 张淑宁: 女, 1977年生, 副教授, 博士, 研究方向为引信信号处理.