

机载高分辨聚束式 SAR 实时成像处理系统的 FPGA 实现

周 芳* 唐 禹 张佳佳 邢孟道 王 玉
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文设计并实现了一个基于 FPGA 的机载高分辨聚束式 SAR 实时成像系统。该系统基于经典极坐标算法, 在 2 维波束域完成运动误差估计及补偿, 获得了良好聚焦的图像。文中详细阐述了将算法映射到 FPGA 实现的设计过程, 给出了硬件系统平台的构成, 并对系统资源、运算速度和成像结果进行了分析。在对实测机载聚束式 SAR 数据进行实时处理的实验中, FPGA 工作在 100 MHz 时, 该系统 11 s 内可完成 16384×32768 点 8 位数据的成像处理。良好的实时成像结果验证了该系统的有效性和可靠性。

关键词: 聚束式合成孔径雷达; 极坐标算法; 运动补偿; 实时成像; 可编程逻辑门阵列

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1248-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00957

Real-time Image Formation for Airborne High Resolution Spotlight SAR Based on FPGA

Zhou Fang Tang Yu Zhang Jia-jia Xing Meng-dao Wang Yu
(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper designs and realizes a real-time image processor for SAR based on Field Programmable Gate Arrays (FPGA). The system is suitable for high resolution airborne spotlight mode SAR. The scheme applies the Polar Format Algorithm (PFA) first. Then the motion error phase is estimated and compensated in azimuth wavenumber domain. In this paper, the design approaches and the hardware system architecture are given and the resource usage, processing speed and image result are analyzed in detail. The real-time experiment results show that the system can process 1024 MB SAR raw data within 11 s, when the FPGA processing units work at 100 MHz. The good experimental image also proves the validity and reliability of the proposed system.

Key words: Spotlight SAR; Polar Format Algorithm (PFA); Motion compensation; Real-time imaging; Field Programmable Gate Array (FPGA)

1 引言

SAR 能够全天候、全天时获得高分辨雷达图像, 在军事领域有着广泛应用, 对于民用领域也具有重要意义。聚束 SAR 通过控制天线波束指向, 长时间照射地面特定区域来获得高方位分辨率。聚束 SAR 实时成像处理中, 目前应用最多的是极坐标算法 (PFA)^[1]。2004 年, Sandia 实验室 MiniSAR 系统采用 FPGA 实现了基于 PFA 的聚束 SAR 实时成像。该系统基于去斜接收系统, 实时成像为 2048×2048 点, 分辨率为 0.1 m, 依靠高精度高性能的惯导系统进行运动补偿^[2]。而国内由于高精度高性能惯导技术的不成熟, 需要先对原始回波数据进行运动误差估计再进行运动补偿。这种处理方法灵活、精度高,

但增大了算法复杂度和计算量。

国内主要利用 DSP 进行成像处理, 但随着成像系统在性能、体积、功耗及可靠性上的更高需求, DSP 已逐渐被高性能、大规模、高灵活性的 FPGA 替代。FPGA 可以根据成像算法, 映射得到适合的算法结构, 提供比 DSP 更高的并行度和处理速度。近年来, 越来越多的研究集中在利用 FPGA 实现 SAR 成像系统^[3,4]。文献[3]完成了基于 FPGA 的星载 SAR 信号存储与预处理系统, 文献[4]基于 CS 算法用 7 片 FPGA 实现 16384×16384 点的星载样本成像。但机载高分辨聚束式 SAR 的 FPGA 实时成像处理系统国内仍未见公开发表。

当前, 聚束 SAR 运动补偿大多是采用传统的条带时域运动误差估计并结合相位梯度算法(PGA)的方法, 由于聚束模式直接获取极坐标格式的数据, 传统补偿方法不仅精度低, 而且运算量大、复杂度高, 难以实时实现。本系统根据 PFA 和瞬时调频率估计, 搭建一种适用于 FPGA 实时处理的新型算法

2010-09-03 收到, 2010-12-09 改回

国家自然科学基金委员会和中国民用航空局联合资助项目
(61001210)资助课题

*通信作者: 周芳 xdzhoufang@163.com

结构，实现了缺少精确惯导条件下的高分辨率聚束式 SAR 实时成像。系统采用高性能 FPGA+DSP 实现，其中 FPGA 实现成像处理，DSP 仅作参数估计和数据转置。本文详细论述新型算法结构的 FPGA 实现过程，并对系统资源、运算速度和成像效果进行了分析。系统在 PRF 为 1000 Hz，工作频率为 100 MHz 时，可以在 11 s 内完成 16384×32768 点 8 位机载聚束式 SAR 数据处理，实时成像为 4096×8192 点。

2 成像算法推导及分析

2.1 实时成像算法——极坐标算法(PFA)

聚束 SAR 的示意如图 1，天线波束宽度为 β_a ，信号载频为 f_c ，天线波束中心指向 $(0, Y_c)$ ，点目标位于 $(x_n, Y_c + y_n)$ ，载机位置为 $u = vt$ 。在理想情况下(无运动误差)，距离脉压后的回波信号为^[5]

$$S(\omega, u) = |P(\omega)|^2 \cdot \exp\left[-j \frac{2(\omega + \omega_c)}{c} \sqrt{(x_n - u)^2 + (Y_c + y_n)^2}\right] \quad (1)$$

其中 $P(\omega)$ 是发射信号的傅立叶变换， $\omega_c = 2\pi f_c$ 。

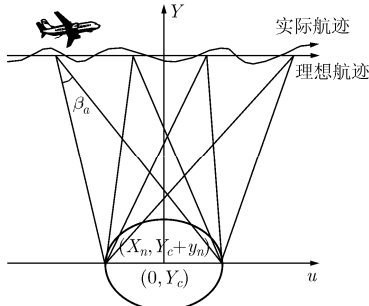


图 1 聚束 SAR 示意图

将 $\sqrt{(x_n - u)^2 + (Y_c + y_n)^2}$ 在 $(0, 0)$ 处泰勒级数展开，对式(1)乘以方位向 Dechirp 因子，

$$S_{\text{dechirp}}(k, u) = \exp\left(jk \left(\sqrt{u^2 + Y_c^2}\right)\right), \quad k = 2(\omega + \omega_c)/c \quad (2)$$

整理后可得

$$S(\omega, u) = |P(\omega)|^2 \cdot \exp\left[-jk \left(\frac{-u}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} x_n + \frac{Y_c}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} y_n\right)\right] \quad (3)$$

令方位和距离波束变量

$$k_y = k \frac{Y_c}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}}, \quad k_x = k \frac{-u}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，完成对距离和方位的重采样，得

$$S(k_x, k_y) = |P(k_x, k_y)|^2 \cdot \exp(-j(x_n k_x + y_n k_y)) \quad (5)$$

不考虑运动误差时，对式(5)做 2 维逆傅里叶变换，即可得聚焦 SAR 图像。算法流程见图 2。

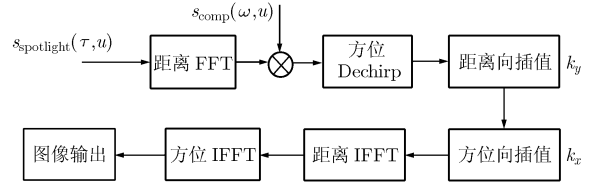


图 2 聚束 PFA 算法流程图(无运动误差)

2.2 运动误差估计与补偿算法——瞬时调频率估计

载机在飞行过程中容易受到大气湍流的影响，不可能做理想匀速直线飞行，从而回波包络和相位产生调制，导致图像的严重散焦。且聚束模式合成孔径时间通常较长，较小的运动误差逐渐积累增大，回波相位畸变更明显，图像散焦更验证。此外，高分辨成像必须考虑载机跨距离单元徙动误差^[6]，因此必须对回波包络误差进行补偿。

本成像系统进行了两次运动误差估计和补偿，第 1 次是对回波包络误差进行补偿，并对相位误差进行粗略补偿。第 2 次是在 2 维波数域下对回波相位误差进行精细补偿。与传统聚束成像方法相比，本方法未进行方位 FFT 处理，从而更好地保留了方位向数据的时域回波特性，对运动误差的估计也更精确。两次运动补偿都是基于 Map-Drift 算法^[7]对方位数据重叠分块^[5]估计瞬时多普勒调频率，用以补偿载机运动误差。

运动补偿后，通过 2 维逆傅里叶变换(IFFT)，即得到聚焦后的聚束式 SAR 图像。运动补偿算法流程见图 3。

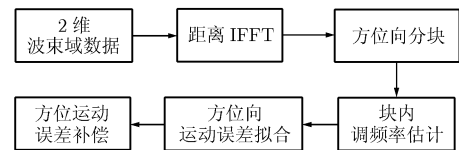


图 3 运动补偿算法流程图

3 算法到体系结构的映射

在传统 PFA 算法和瞬时调频率估计的基础上，本文设计了一种基于方位波数域的运动补偿的新型实时成像算法结构。本算法在对回波进行 2 维调频率去斜后，通过距离向傅里叶变换和 2 维 Sinc 插值操作将原始数据转换到 2 维波数域的直角坐标系下，然后应用方位分块操作，在方位波数域内完成对应子块误差相位的精确估计，同时将其拟合至整个数据域的支撑区，最后完成运动误差相位的补偿。本聚束实时算法框图如图 4。

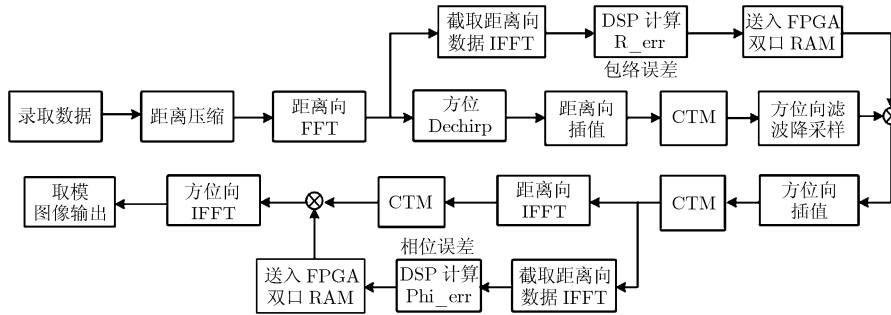


图 4 聚束 SAR 实时成像算法框图

成像系统由两个单元组成：一是成像处理单元，由 FPGA 完成距离压缩，方位 Dechirp，距离向插值，方位滤波，方位向插值，2 维逆傅里叶变换；二是运动误差估计与补偿单元，为了保证运算精度，此部分选择由 FPGA 和 DSP 协同进行计算，由 DSP 完成重叠子孔径的调频率估计。系统中，FPGA、DSP 程序均采用了模块划分的思想，保证了程序的可移植性。

3.1 FPGA 实现部分

3.1.1 距离脉冲压缩 为了实现距离高分辨成像，需要将回波与匹配函数卷积完成脉冲压缩。根据硬件处理中面积和速度的平衡和互换原则，为减小运算量并优化面积，本系统在频域实现脉冲压缩并对 FFT 模块进行时分复用，截取距离脉冲压缩后 4096 个有效点进行后续处理。

3.1.2 方位 Dechirp 在极坐标算法中，需要在距离频域对方位向数据进行 Dechirp 操作。Dechirp 参考因子不仅与方位向的位置有关，而且与距离向频率有关，因此需要在模块中进行实时计算。其中相应的三角函数值由 Cordic 算法^[8]计算得到。方位向 Dechirp 模块的处理流程如图 5。

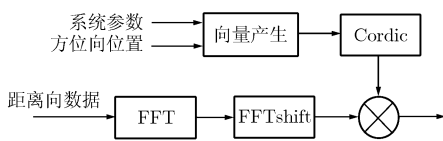


图 5 方位向 Dechirp 模块的算法流程

3.1.3 距离向/方位向插值 在方位 Dechirp 操作后要进行距离向插值，在方位向滤波降采样后要进行方位向插值。插值操作的本质是对采样起始时间和采样间隔进行调整，实现极坐标到直角坐标的转换。

距离向与方位向插值模块的原理相同，两者不同之处在于插值位置的计算(见式(4))。插值模块主要包括两个子模块，即：插值位置计算和插值处理。考虑到实时计算效率，权衡资源占用与处理精度，处理中选取 7 点 Sinc 插值。本模块算法流程见图 6。

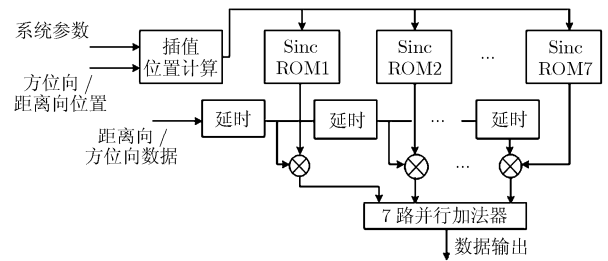


图 6 插值模块算法流程

3.1.4 方位向滤波采样 在机载聚束 SAR 中，脉冲重复频率远大于由场景所引起的多普勒带宽，方位向数据冗余。在实时处理中采用了 41 阶 4 抽 1 的线性相位 FIR 低通滤波器，将复杂的方位滤波操作转换成简单的乘加运算。不仅避免了混叠，保留了回波相位信息，保证了成像质量，还节约了系统资源和功率耗用，达到了降低数据率的目的。

3.2 DSP 实现部分

3.2.1 运动误差估计与补偿 本系统对运动误差的非空变项进行了两次估计，如图 4。为了保证运动补偿运算的精度，由 DSP 用 32 位浮点数估计调频率并进行运动误差拟合，协同 FPGA 完成运动补偿。运动误差估计与补偿实时处理流程见图 7。

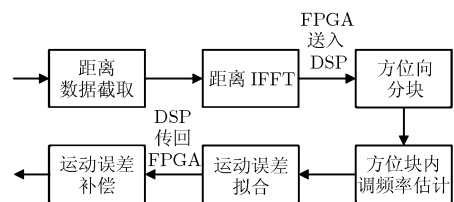


图 7 运动误差估计与补偿实时处理流程

第 1 次运动补偿将方位 Dechirp 之前的数据，分成 63 个重叠子孔径，子孔径大小为 1024。第 2 次运动补偿将方位向 IFFT 之前数据，分成 125 个重叠子孔径，子孔径大小为 256。DSP 对每个子孔径数据用 Map-Drift 算法估计子孔径调频率，插值拟合得到全孔径回波包络补偿函数后，由 FPGA 完成运动补偿。FPGA 和 DSP 并行运算和处理，提高了效率，减少了系统成像处理的总时间。

3.2.2 数据转置 本系统需要对数据进行转置操作，3次转置的数据量分别需要512 MB, 128 MB, 128 MB的存储空间，远大于FPGA内部的存储资源，故设计由DSP控制其外接存储器SDRAM的读写，实现转置操作。

4 系统实现

根据上述系统设计，选择一块数据录取存储板、一块信号处理板和显示主机搭建系统平台，板间由底板提供高速总线互连。

数据处理板卡有2片Altera公司StratixIII系列高性能的FPGA(EP3SL150F1152I3)，可完成复杂的信号处理功能；有4片AD公司的高速DSP(TS201)，每个DSP芯片都自带256 MB的存储器(SDRAM)。并且还具有标准的USB接口和CPCI接口。数据处理板卡的结构示意图见图8。

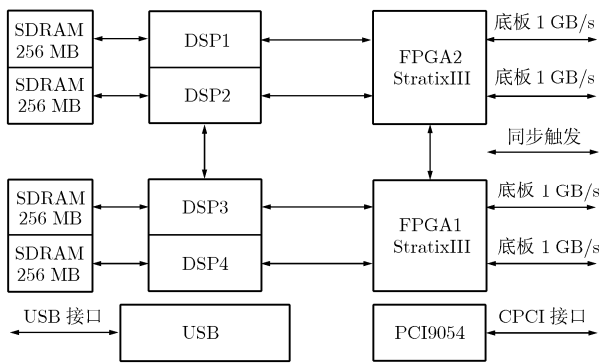


图8 数据处理板卡的结构示意图

应用本文提出的算法流程对某所的机载聚束模式X波段数据进行处理，主要参数见表1。实际处理中，由FPGA2做距离脉冲压缩、方位Dechirp、距离向插值、方位向滤波、包络补偿操作，FPGA1做方位向插值、距离向IFFT、相位补偿、方位向IFFT操作，最后通过PCI在主机屏幕上显示成像结果。表2为两块FPGA中占用资源情况。

表1 主要参数表

飞行速度	120 m/s
作用距离	40000 m
飞行高度	7000 m
波长	0.03 m
脉冲重频 PRF	1000 Hz
带宽	600 MHz
采样率	800 MHz
中心载频	9600 MHz
聚束成像角	4.5°

当传数时钟和FPGA工作时钟设定为100 M时，模拟实际重频发数时间为33 s左右，完成成像数据处理时间约为11 s。图9(a), 9(b), 9(c)与图10(a), 10(b), 10(c)分别为运动补偿和未运动补偿实时成像结果与局部放大图。对比两图可见运动补偿后图像聚焦效果明显，地物轮廓分明，对比度和信噪比较高。根据表1中参数，理论计算的距离分辨率约为0.25 m，方位分辨率约为0.20 m，在成像处理中采用了汉宁加权，降低了距离副瓣同时引起主瓣展宽分辨率下降。

最后，用图像对比度^[9]和图像信息熵^[10]对聚束SAR图像运动补偿效果进行定量分析。图像对比度可以作为图像亮度的波动程度的量度，反映图像的聚焦深度。图像聚焦越完全，图像对比度越高。而图像信息熵可以作为能量空域分布状态不确定性的量度。图像信息熵越小，表明能量分布越不均匀，像素灰度差异越大，图像信息量越充足。对图9(a)、图10(a)对应图像数据计算分析后结果见表3。从表中可见，运动补偿后的实时成像结果的图像对比度大大提高，图像信息熵有明显的减小。

5 结束语

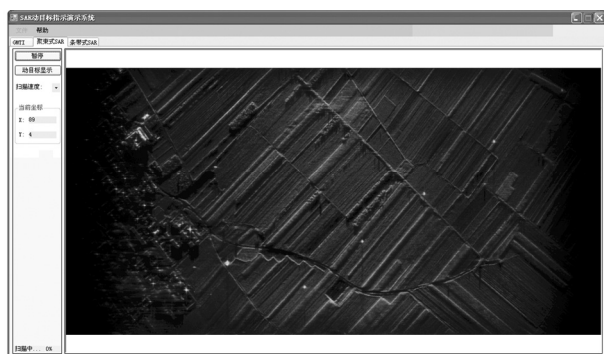
本系统从实时成像系统的性能出发，通过算法选择和分析，提出并实现了一种机载高分辨聚束式SAR实时成像系统，有效地进行了运动误差估计和补偿，获得了良好的成像效果。

表2 信号处理板FPGA资源占用情况

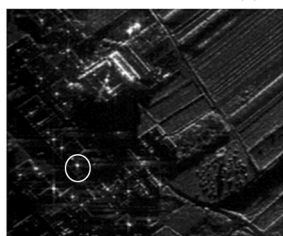
资源	总量	FPGA1	利用率(%)	FPGA2	利用率(%)
组合逻辑(Combinational ALUTs)	113600	15226	13	18353	16
逻辑寄存器(Logic register)	113600	26372	23	31596	28
存储块(Block memory bit)	5630976	2642840	47	3408266	61
DSP块(DSP block)	384	188	49	198	52
锁相环(PLL)	8	2	25	2	25
引脚(Pin)	744	208	28	204	27

表3 运动补偿效果对比

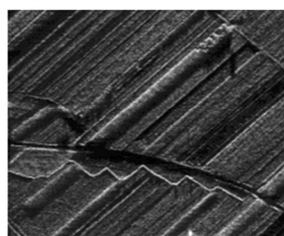
	图像对比度	图像信息熵
运动补偿	20.96	15.22
未运动补偿	10.49	16.53



(a) 运动补偿结果

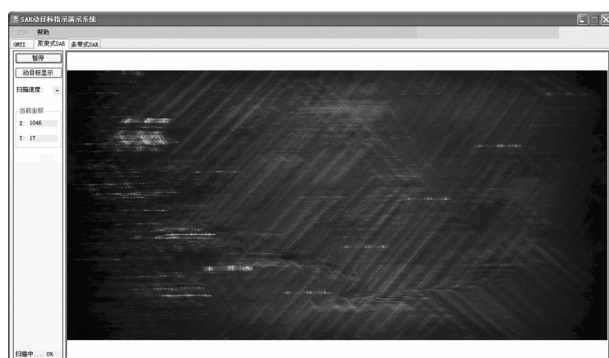


(b) 局部放大

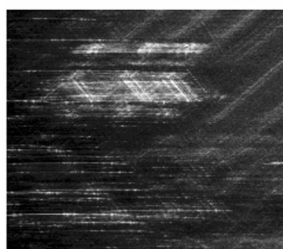


(c) 局部放大

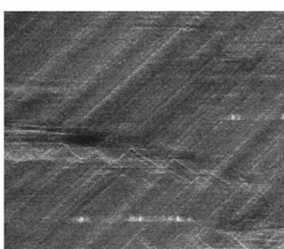
图9 运动补偿实时成像结果



(a) 未运动补偿结果



(b) 局部放大



(c) 局部放大

图10 未运动补偿实时成像结果

参考文献

[1] Nie Xin, Zhu Dai-yin, Mao Xin-hua, and Zhu Zhao-da. The

application of the principle of chirp scaling in processing stepped chirps in spotlight SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 860-864.

[2] Sandia National Laboratories. A publication featuring what's new in remote sensing technology at Sandia National Laboratories. www.sandia.gov/radar/sar.html, 2004, 7.

[3] 谢宜壮, 龙腾. 基于FPGA的SAR信号存储与预处理模块设计与实现[J]. *信号处理*, 2010, 26(2): 180-183.

Xie Yi-zhuang and Long Teng. Module design and implementation of SAR signal storage and pretreatment based on FPGA[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(2): 180-183.

[4] 熊君君, 王贞松, 姚建平. 星载SAR实时成像处理器的FPGA实现[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 1070-1072.

Xiong Jun-jun, Wang Zhen-song, and Yao Jian-ping. The FPGA design of on board SAR real time imaging processor[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1070-1072.

[5] 唐禹, 邢孟道, 保铮, 王岩飞. 基于重叠子孔径极坐标算法的波前弯曲效应的补偿[J]. *电子学报*, 2008, 36(6): 1-6.

Tang Yu, Xing Meng-dao, Bao Zheng, and Wang Yan-fei. Wavefront curvature compensation based on overlapped subaperture polar format algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1-6.

[6] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 第1版, 北京: 电子工业出版社, 2005, 第6章.

[7] Carrara G, Goodman S, and Majewski M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithm[M]. Boston & London: Artech House, 1995, Chapter 5.

[8] Rodrigues K and Swartzlander E. Adaptive cordic: using parallel angle recoding to accelerate rotations. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(4): 522-531.

[9] 刘碧丹, 韩松, 王岩飞. 图像幅度和值最小化自聚焦算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 768-771.

Liu Bi-dan, Han Song, and Wang Yan-fei. Minimizing sum of image amplitudes autofocus algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 768-771.

[10] Kragh T J. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus. http://llwebprod.ll.mit.edu/asap/asap_06/pdf/Papers/27_Kragh_Pa.pdf, 2006, 6.

周芳: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、运动补偿算法及实现.

唐禹: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为SAR成像算法、运动补偿算法以及新体制雷达等.

张佳佳: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为SAR成像算法.

邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像算法和目标识别算法等.

王玉: 女, 1985年生, 硕士生, 研究方向为算法的DSP实现.