

文章编号: 2095-4980(2019)01-0146-06

## 基于CPU+GPU混合架构的实时成像系统设计与实现

张彦彬, 丁晟, 高雁, 李松键, 朱金中, 孙友礼, 张隕石

(无锡市雷华科技有限公司, 江苏 无锡 214125)

**摘要:** 雷达成像处理需要更大宽带以实现更高的距离分辨力,同时还需要更多的脉冲积累获得更高的方位像分辨力,因此雷达成像处理过程计算量巨大。如何实现未来超带宽雷达的实时成像处理是一项艰巨挑战。图形处理器(GPU)以卓越的浮点性能和访存带宽,成为并行加速应用平台的有力候选者。设计了一种基于CPU+GPU平台并面向合成孔径雷达/逆合成孔径雷达(SAR/ISAR)的实时成像系统方案,并将该方案实体化。实验表明,该成像系统能够实现实时SAR/ISAR成像,同时该实时成像系统也可用于电子对抗领域,在干扰方法和效果研究中起到重要作用。

**关键词:** 图形处理器; 混合架构; 合成孔径雷达; 逆合成孔径雷达; 实时成像系统; 电子战  
**中图分类号:** TN957.52      **文献标志码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA201901.0146

## Design and implementation of a real-time imaging system based on CPU+GPU hybrid architecture

ZHANG Yanbin, DING Sheng, GAO Yan, LI Songjian, ZHU Jinzhong, SUN Youli, ZHANG Yunshi  
(Wuxi Leihua Technology Company Limited, Wuxi Jiangsu 214125, China)

**Abstract:** Radar image processing is a radar signals process with huge computation quantity, because it requires wider bandwidth and more pulse accumulation, and it becomes a big challenge to achieve real-time image process for ultra wide band in the future. Graphics Processing Unit(GPU) is the candidate for its excellent computing capability and memory access performance. A real-time Synthetic Aperture Radar/Inverse Synthetic Aperture Radar(SAR/ISAR) imaging system based on CPU+GPU hybrid architecture is designed and implemented. The results show that the real-time SAR/ISAR system can achieve wide band SAR/ISAR image process, and it can be applied in the electronic warfare field and play a key part in the jammer study and experiment.

**Keywords:** Graphics Processing Unit; hybrid architecture; Synthetic Aperture Radar; Inverse Synthetic Aperture Radar; real-time imaging system; electronic warfare

合成孔径雷达(SAR)是一种通过合成孔径实现方位向高分辨力的雷达成像技术<sup>[1]</sup>。区别于传统光学成像, SAR一般工作在微波频段,具备全天时、全天候的测绘能力,应用领域由原来航空航天领域扩展至地理测绘、民用勘探等。和SAR类似,逆合成孔径雷达(ISAR)的成像处理技术也获得飞速发展,从最初的对飞机、舰船类目标开始向战略导弹、航天飞行器、深空卫星类目标拓展,成像质量要求也越来越高。

近些年,随着雷达信号处理能力持续增强, SAR/ISAR在朝着更高分辨力、更宽测绘带不断发展。SAR/ISAR图像在距离向分辨力源于更高的成像带宽和数据采样率,方位向分辨力则取决于更长的脉冲相干积累时间,因此高分辨力设计就需要成像处理计算量的增加。另外SAR/ISAR成像算法和技术也在不断发展,对成像效果要求也越来越高。因此,高效的SAR数据处理手段成为SAR技术发展的一个关键问题<sup>[2]</sup>。

图形处理器(GPU)实现了从单一图形处理扩展到通用计算兼顾的重大转变,推出一系列的通用图形处理器(通常也用GPU表示)。得益于其海量的核心数目, GPU通常拥有十几倍到数十倍于CPU的浮点计算能力。越来越多的不同领域的应用软件被移植到GPU平台以实现并行加速。

尽管GPU拥有强大的计算能力,但由于该平台上没有独立操作系统,因此GPU并行加速的实现依赖于CPU+GPU异构并行架构或者ARM+GPU架构。在SAR成像相关领域已有一些尝试,并取得不错的成果<sup>[3-7]</sup>。另外,

也有研究尝试在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)上实现宽带的成像处理<sup>[8-10]</sup>,但在FPGA平台上实现具体算法的部署和并行优化的难度要大,且遗传代码适应性不够灵活。

本文实现了在CPU+GPU混合架构平台上聚束SAR模式常用的算法极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)和典型ISAR算法的并行优化。以此为基础,设计了一种基于CPU+GPU混合架构平台的实时成像处理系统,并实现了工程化。此外,本文还尝试将该实时成像系统用于电子对抗干扰技术的研究领域。

## 1 GPU及混合架构

早期的GPU是相对于CPU的一个概念,专门针对图像处理的处理单元。GPU的峰值源于每个GPU都拥有上千量级的统一计算架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)计算核,它是真正执行计算的物理个体单元。和普通CPU相比, GPU以增加有限的晶体管数目实现计算能力的大提升,但GPU的逻辑和控制能力大大下降,即GPU仅执行简单的计算,在逻辑控制方面,数千个CUDA核由同一批控制指令实现“共舞”。相比CPU, GPU具有较大的内存访问带宽,通常在200 GBps以上。

英伟达(NVIDIA)公司在2017年5月的GPU技术大会上推出了Tesla V100 GPU处理器,该处理器拥有5 120个CUDA计算核,具有的单精度浮点计算性能达到12 TeraFLOPS。相对于其他平台,快速发展的GPU硬件设备提高了CPU+GPU混合架构系统的应用计算潜力。

相对于FPGA等设备平台的编程实现, GPU平台上的并行编程相对容易,这是因为CUDA的出现。CUDA作为C语言的一种扩展,提供了GPU平台计算上所用到的大部分编程接口。CUDA的出现推动GPU在并行计算领域的快速发展,目前推出的GPU都支持CUDA。

GPU具有如此可观的计算能力,但事实上GPU并不能独立工作,仍需和其他处理器进行协同,从这个角度来说, GPU是一种协处理器部件。以CPU+GPU为例,描述二者协同工作流程:首先在CPU启动任务,初始化GPU数据空间,将数据从CPU端拷贝至GPU端;CPU将执行的指令序列拷贝至GPU指令执行空间进行计算和处理;最后将计算完成的数据结果从GPU端拷贝至CPU内存。因此GPU平台应用多数以CPU+GPU混合架构平台的形式出现。本文的实时成像系统设计也是基于CPU+GPU混合架构平台。

## 2 SAR/ISAR算法的GPU实现

### 2.1 SAR

聚束式合成孔径雷达(Spotlight SAR)是一种重要的SAR工作模式<sup>[11]</sup>。在该模式下,雷达天线角度不断调整,保证雷达波束在成像时间内始终对准同一成像区域,这样大大提高了成像区内目标的波束照射时间,从而提高目标区域的方位向成像精确度。因此聚束SAR能够获得比条带SAR更高的方位向分辨力。此外,聚束SAR的方位分辨力突破了传统条带SAR方位分辨力受限于真实天线孔径长度的约束,且聚束SAR的雷达波束以不同的视角照射成像目标,能获得有关目标不同侧面的信息<sup>[12-13]</sup>。聚束SAR的上述特点,使得它在目标识别、特征提取、运动目标探测(Moving Target Detection, MTD)、运动目标检测(Moving Target Indication, MTI)等领域具有独特的应用前景。

PFA作为一种有效的旋转目标成像方法提出,并逐渐发展成为一种经典的聚束SAR成像算法。该算法的实现步骤较为简单,只需要进行2次一维插值运算和2次FFT运算。但经典的PFA存在波前弯曲近似,成像结果几何保真度和有效成像场景大小都受到一定限制。对PFA算法做进一步改进和拓展,能够解决多平台、多模式、复杂运动条件下的高分辨力SAR成像问题。近年来,国外一些代表性微小SAR系统也采用改进的PFA算法,如MiniSAR系统。

本文将SAR成像中PFA算法在CPU+GPU混合架构平台上实现了并行化和部署,将待处理的原始回波接收至CPU端后,进行解包和参数提取,主要是运动补偿所需航电和惯导等数据的提取。然后将待成像处理的二维数据拷贝至GPU设备存储空间上,随后在GPU端进行脉压、运动补偿、二维插值、方位向FFT变换和相位梯度自聚焦处理,最终结果写回CPU并装填图像输出。在该过程中, GPU设备上实现的并行域覆盖了整个算法过程。图1给出了SAR的PFA算法在GPU上并行实现的示意图。需要特别说明的是,在实际工程化时一定要预估待处理成像帧的数据大小、规模,进而选择相匹配的GPU设备,以避免设备内存不够而导致处理数据在CPU端和GPU端来回传输带来的时间开销。极端情况下甚至可以搭载多CPU+多GPU的混合架构平台。

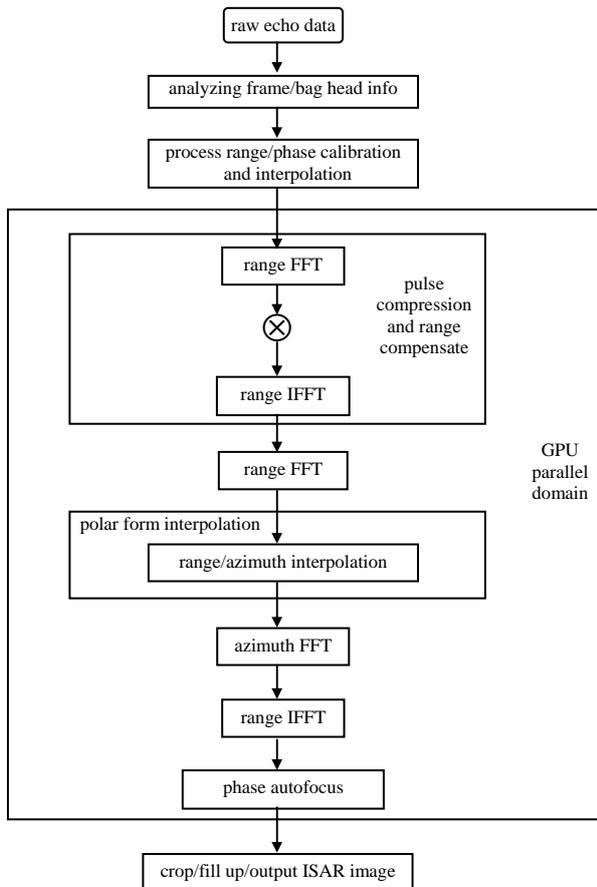


Fig.1 PFA imaging algorithm process diagram on GPU  
图 1 基于 GPU 平台 PFA 成像算法流程示意图

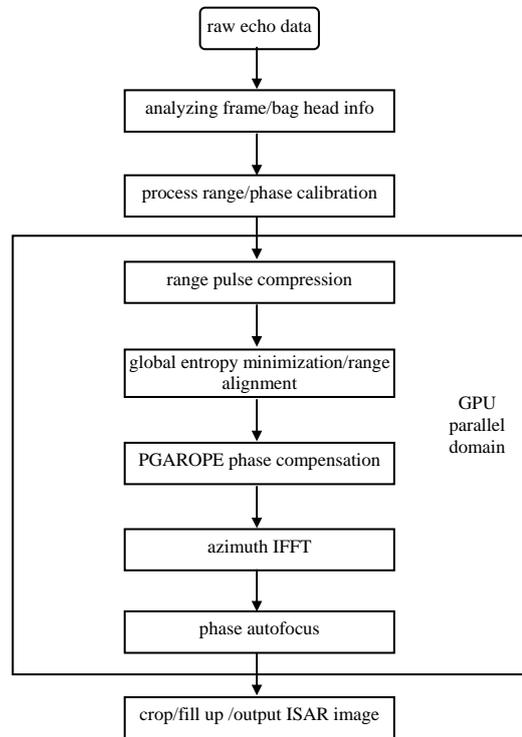


Fig.2 ISAR imaging algorithm process diagram on GPU  
图 2 基于 GPU 平台 ISAR 成像算法流程示意图

## 2.2 ISAR

逆合成孔径雷达(ISAR)一般是指相对静止的雷达对运动的目标进行照射和成像。该成像过程是根据雷达回波所反映出的目标散射特性,将目标散射体组成部分映射到一个二维平面图上,从而获得目标的轮廓信息,进而获得目标运动状态,实现对目标分类、识别和跟踪。ISAR成像过程中,目标除了相对雷达转动运动之外,目标相对雷达的径向平移运动对ISAR成像产生影响,它会使相邻一维像在距离向错开,同时会导致回波存在多普勒相移。ISAR运动补偿的主要任务就是消除平移运动在这两方面的影响,使成像转变为经典的旋转目标成像。与之相对应,补偿过程一般分为距离对准和相位补偿两步,分别将相邻的回波信号在距离向对齐和把目标距离走动造成的多普勒相位变化补偿掉。

全局最小熵距离对准算法是一种基于最小熵的对准方法,它以目标所有距离像和的熵为目标函数。本文所定义的熵和各个脉冲回波需要补偿的距离偏移量满足定量关系,通过迭代,当熵达到最小时,可以收敛到一个接近于全局最优的解,也就实现了对所有积累脉冲回波的距离对齐处理。

相位补偿处理则是通过方位向FFT得到目标的初像,然后通过相位梯度法寻找每个距离单元幅度的最大值(理论上其对应单元最强散射点,对应目标特显点),将其圆周移位到零多普勒频率处。进一步方位向通过IFFT回到数据域,采用秩一相位估计(Rank One Phase Error Estimation, ROPE)算法对平动相位误差进行估计。在此基础上,可以对此过程进行迭代,更准确地估计相位误差<sup>[14]</sup>。图2为典型的ISAR算法在CPU+GPU混合架构平台上并行示意图。

## 3 实时成像系统设计

本实时成像系统的核心功能,涵盖了从回波数据采集记录、实时成像处理、成像结果实时显示等主要功能,按照上述功能可以将本系统分成3个子系统,整个系统流程示意图如图3所示。

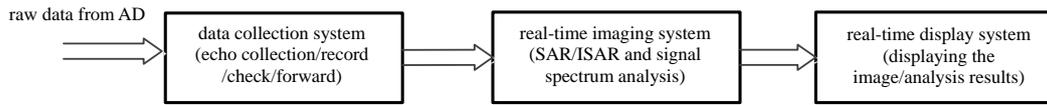


Fig.3 Real-time imaging system process diagram

图3 实时成像处理系统流程示意图

整个系统流程控制都在CPU端实现。3个子系统间通信除了回波数据、图像结果数据之外,还有若干信号标识的通信。本文实时成像系统中,上述3个子系统通过3个线程共享数据的方式实现。通信较大的数据对所有线程可见,如回波数据同时可以被数据采集过程和实时成像过程所读写操作,因此需要设置锁信标来避免读写冲突和错误。另外,数据采集过程中写过程不能中断,而实时成像进程数据也不能被写覆盖,这就需要为回波数据设置存储缓冲机制,成像结果数据也类似。

该系统的实时性,由3个子系统的实时性来共同保证。由于上述3个过程形成了自然的过程流水结构,因此该系统的实时性由3个子系统的实时性来独立保证。因此在实时成像处理过程中,部署SAR/ISAR成像算法相应GPU平台上实现的CUDA算法。通过GPU海量的加速部件实现成像过程的并行加速,最大限度地缩短该过程的有效运行时间,从而保证该过程的实时性。

该实时成像系统的软、硬件环境支持相对简单。软件环境:除了Windows操作系统、Visual Studio C++编译环境外,还需要CUDA运行环境。同时需要相应的光纤驱动及二次开发软件。硬件环境:系统采用高性能的CPU和支持CUDA的高端GPU。

#### 4 实时成像系统实现和成像结果

基于上述设计的实时成像系统,本文进行初步的工程化实验。在该系统中,配置了一台惠普工作站,并搭配Quadro M5000(8 GB)的GPU卡,以及相应的光纤接收模块。

利用该成像系统,对某机型搭载某型SAR雷达实测数据进行SAR成像处理。成像分辨力 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ,成像时间小于该SAR系统单帧积累时间,满足实时成像需求。成像处理结果如图4所示。另外,实验结果表明,本系统可以实现单通道 $64 \times 1\ 024$ 采样点,2 048个积累周期的SAR实时成像处理,在保证足够的成像精确度的前提下满足宽带成像的实时成像需求。

另一方面,现代电子对抗中一个重要的部分是对SAR/ISAR雷达的干扰<sup>[15-16]</sup>。该场景中,地面或弹载干扰机通常对成像雷达信号进行分选后,再对目标信号源进行覆盖、压制或欺骗干扰。

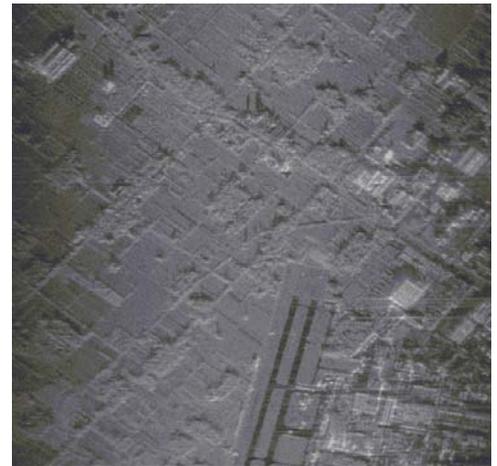


Fig.4 SAR image from measured data

图4 实测SAR数据成像处理结果



Fig.5 Real-time SAR/ISAR imaging system

图5 实时SAR/ISAR成像系统

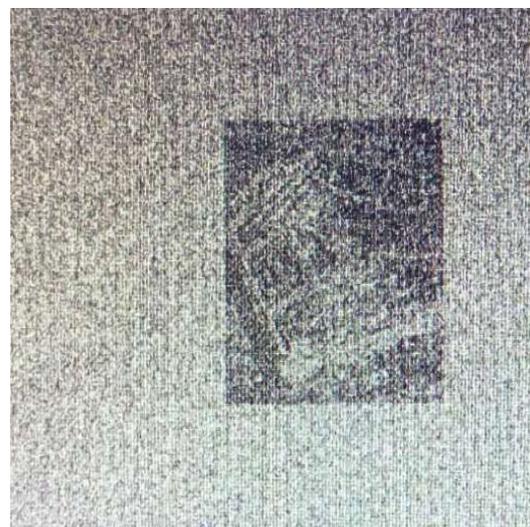


Fig.6 Real-time SAR image under electronic countermeasures

图6 干扰存在下的实时SAR成像结果

本文设计的实时成像系统也可作为面向SAR/ISAR雷达干扰机的研究和实验的强有力的辅助工具。在工程实践中,采用本文设计的实时成像系统,并结合SAR回波仿真和回放系统、射频系统,可以对电子对抗系统进行研究和测试。即通过本系统可以实时地对干扰前后的SAR回波信号进行SAR成像处理,从而简单快速地对干扰效果进行评估。图5为某款雷达仿真系统,图上右侧机柜上方部署了本文设计的实时成像系统。

本系统中,如果回放的原始信号为仿真SAR回波信号,干扰信号通过功率合成的方式进行压制干扰。从图6可以看出,干扰加入后,对原始的成像带来了明显干扰,成像区成像结果变得模糊不清。这种情形下,可以实时调节干扰信号比,实时观察干扰效果。

## 5 结论

本文基于CPU+GPU混合架构处理平台,提出一种面向SAR/ISAR实时成像处理系统的方案并实现。该系统方案适用于多种成像雷达仿真系统,展示了基于该设计方案所开发的实时SAR成像系统及实测SAR数据实时成像结果,给出该成像系统在电子战领域的应用范例,能够实时展示对SAR/ISAR成像雷达的干扰效果,对干扰手段和方法的研究有着重要意义。

此外,该实时成像系统设计思路不限于SAR/ISAR成像领域,还可以推广至超宽带信号的频谱成像和分析领域。因此,本文设计的实时成像系统具有较强普适性和较大的应用潜力。

基于CPU+GPU混合架构在信号快速处理方面有计算性能高和访存带宽大的优势,但在整体系统的功耗控制和环境适应性方面还面临着较大挑战。

### 参考文献:

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2004.)
- [2] 邢孟道,保铮,李真芳,等. 雷达成像算法进展[M]. 北京:电子工业出版社,2014. (XING Mengdao,BAO Zheng,LI Zhenfang, et al. Advances in radar imaging algorithms[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2014.)
- [3] 俞惊雷,柳彬,王开志,等. 一种基于GPU的高效合成孔径雷达信号处理器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2010,8(4):415-418. (YU Jinglei,LIU Bin,WANG Kaizhi,et al. A highly efficient GPU based signal processor of synthetic aperture radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2010,8(4):415-418.)
- [4] 孟大地,胡玉新,石涛,等. 基于NVIDIA GPU的机载SAR实时成像处理算法CUDA设计与实现[J]. 雷达学报,2013,12(4):481-491. (MENG Dadi,HU Yuxin,SHI Tao,et al. Airborne SAR real-time imaging algorithm design and implementation with CUDA on NVIDIA GPU[J]. Journal of Radars,2013,12(4):481-491.)
- [5] 孟大地,胡玉新,丁赤飏. 一种基于GPU的SAR高效成像处理算法[J]. 雷达学报,2013,6(2):210-217. (MENG Dadi,HU Yuxin,DING Chibiao. Efficient algorithm for processing SAR data based on GPU[J]. Journal of Radars,2013,6(2):210-217.)
- [6] 田宵骏,梁媚蓉,毛新华. 超高分辨率机载SAR成像算法及GPU实现[J]. 南京航空航天大学学报,2015(3):384-391. (TIAN Xiaojun,LIANG Meirong,MAO Xinhua. Imaging algorithm and its implementation on GPU for ultra-high resolution airborne SAR[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2015(3):384-391.)
- [7] 刘彬,王开志,刘兴钊,等. 利用CUDA实现的基于GPU的SAR成像算法[J]. 信息技术,2009(11):62-65. (LIU Bin,WANG Kaizhi,LIU Xingzhao,et al. Imaging algorithm of synthetic aperture radar based on GPU via CUDA[J]. Information Technology,2009(11):62-65. doi:10.13274/j.cnki.hdzt.2009.11.009.)
- [8] 周芳,唐禹,张佳佳,等. 机载高分辨聚束式SAR实时成像处理系统的FPGA实现[J]. 电子与信息学报,2011,33(5):1248-1252. (ZHOU Fang,TANG Yu,ZHANG Jiajia,et al. Real-time image formation for airborne high resolution spotlight SAR based on FPGA[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2011,33(5):1248-1252.)
- [9] 郭江哲,朱岱寅,毛新华. 一种SAR二维自聚焦算法的FPGA实现[J]. 雷达学报,2016,8(4):444-452. (GUO Jiangzhe,ZHU Daiyin,MAO Xinhua. FPGA implementation of a SAR two-dimensional autofocus approach[J]. Journal of Radars,2016,8(4):444-452. doi:10.12000/JR15092.)
- [10] 郝智泉,王贞松,刘波. FPGA实时实现PGA算法的研究[J]. 计算机研究与发展,2008,45(2):342-347. (HAO Zhiquan,WANG Zhensong,LIU Bo. Research on real-time realizing PGA algorithm in FPGA[J]. Journal of Computer and Development,2008,45(2):342-347.)
- [11] CARRARA W G,GOODMAN R S,MAJEWSKI R M. Spotlight synthetic aperture radar:signal processing algorithms[M]. Boston,London:Artech House,1995.

- [12] 李勇,朱岱寅,朱兆达. 机载合成孔径雷达大斜视高分辨率重叠子孔径成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2006,28(9):1577-1581. (LI Yong,ZHU Daiyin,ZHU Zhaoda. Study on high resolution overlapped sub aperture imaging algorithm for high squint airborne SAR processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006,28(9):1577-1581.)
- [13] 毛新华,朱岱寅,朱兆达. 一种超高分辨率机载聚束SAR二维自聚焦算法[J]. 航空学报, 2012,33(7):1289-1295. (MAO Xinhua,ZHU Daiyin,ZHU Zhaoda. 2D autofocus algorithm for ultra-high resolution airborne spotlight SAR imaging[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012,33(7):1289-1295.)
- [14] 李源. 逆合成孔径雷达理论与对抗[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (LI Yuan. Inverse synthetic aperture radar theory and confrontation[M]. Beijing:National Defence Industrial Press, 2013.)
- [15] 罗强,朱守保,童创明. 两种SAR干扰方法的效果评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(1):46-50. (LUO Qiang,ZHU Shoubao,TONG Chuangming. Effect evaluation on two jamming methods to SAR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):46-50.)
- [16] 马俊霞,蔡英武,陈惠连. SAR压制式干扰仿真及效果评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004,2(2):109-113. (MA Junxia,CAI Yingwu,CHEN Huilian. Oppressive jamming simulation and effectiveness evaluation in SAR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2004,2(2):109-113.)

#### 作者简介:



张彦彬(1980-), 男, 河北省邢台市人, 博士, 主要研究方向为高性能计算技术研究与应用、雷达成像处理.email:zhangyb56@163.com.

李松键(1983-), 男, 广西省柳州市人, 博士, 主要研究方向为雷达系统总体设计、雷达伺服控制研究与应用.

孙友礼(1989-), 男, 江苏省连云港市人, 硕士, 主要研究方向为雷达系统硬件设计、雷达信号 FPGA 处理.

丁 晟(1985-), 男, 江苏省无锡市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统总体设计、雷达信号 FPGA 处理.

高 雁(1975-), 女, 黑龙江省五常市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理算法.

朱金中(1989-), 男, 江苏省泰州市人, 硕士, 主要研究方向为雷达系统总体设计、微波射频信号处理.

张隄石(1972-), 男, 浙江省宁波市人, 本科, 主要研究方向为雷达应用软件设计.