

基于多核 DSP 的 SAR/ISAR 混合成像技术

陈程, 谷宝民, 朱岱寅

南京航空航天大学, 南京 211106

Email: chencheng0120@nuaa.edu.cn

摘要: 未来战争节奏加快、战场环境复杂多变, 对海面运动目标(如巡洋舰、护卫舰、驱逐舰和航母等)动态信息的获取具有至关重要的意义。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能够全天时、全天候、远距离地对目标进行高分辨率成像, 对目标具有成像和识别的能力。而合成孔径雷达对运动目标的高精度成像算法通常复杂且运算量大, 无法满足实时性要求。本文提出基于 Keystone 变换的 SAR/ISAR 混合成像算法, 并采用单片多核 DSP TMS320C6678 实现实时成像处理架构。处理步骤包括基于 Keystone 变换的 SAR 成像、运动目标检测、基于距离对准和相位梯度自聚焦的 ISAR 成像。最后, 对海实测数据的成像结果验证了单片多核 DSP 并行处理的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标检测; 逆合成孔径雷达; 多核数字信号处理器

SAR / ISAR hybrid imaging technology based on multi-core DSP

CHEN Cheng, GU Baomin, ZHU Daiyin

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China

Abstract: In the future, the rhythm of war will be accelerated and the battlefield environment will be complex and changeable. It is of great significance to obtain dynamic information of sea surface moving targets (such as cruisers, frigates, destroyers and aircraft carriers). Synthetic Aperture Radar (SAR) can image the target with high resolution all day, all weather and long distance, and has the ability to image and recognize the target. The high-precision imaging algorithm of Synthetic Aperture Radar for moving targets is usually complex and computationally intensive, which cannot meet the real-time requirements. In this paper, a SAR / ISAR hybrid imaging algorithm based on Keystone transform is proposed, and a single-chip multi-core DSP TMS320C6678 is used to realize real-time imaging processing architecture. The processing steps include SAR imaging based on Keystone transform, moving target detection, ISAR imaging based on range alignment and phase gradient autofocus. Finally, the imaging results of sea measured data verify the effectiveness of parallel processing of single-chip multi-core DSP.

Key words: Synthetic Aperture Radar; Moving Target Detection; Inverse Synthetic Aperture Radar; Multi-core Digital Signal Processor

文献标识码: A 中图分类号: TN95

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[1-3]由二战中的军事需求发展起来, 经过不断发展, 已成为现代遥感领域的一项重要技术。与传统雷达相比, SAR 打破了实孔径方位向分辨率的限制且能够对目标区域全天时、全天候、远距离地进行高分辨率成像^[4]。逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)^[5]是在 SAR 的基础上发展起来的另外一种雷达成像技术,

旨在解决运动目标的成像问题。ISAR 成像算法根据目标在方位向上不同位置散射点的多普勒频率的不同进行处理, 从而实现方位向分辨。随着国际形势发展变化, 未来海战必将呈现出新特点和新变化, 对海面运动目标(如巡洋舰、护卫舰、驱逐舰和航母等)动态信息的获取具有至关重要的意义。同时, 如何实现稳定高效的 SAR 实时成像处理也是当前主要挑战之一。

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)作

基金项目: 国家自然科学基金(62271252)

作者简介: 陈程(1999—),男,硕士,研究方向为基于多核 DSP 的雷达信号处理; 谷宝民(1997—),男,硕士,研究方向为基于多核 DSP 的雷达信号处理; 朱岱寅(1974—),男,博士,教授。研究方向为合成孔径雷达/逆合成孔径雷达(SAR/ISAR)成像以及自聚焦算法, 干涉 SAR 成像, SAR 地面动目标指示, 以及机载雷达动目标指示技术。

为高度集成的专用化微处理器,具有很高的浮点处理性能,在应对 SAR 实时信号处理时表现出优异性能。其中, TI 公司的 TMS320C6678^[6]处理器具有 8 个 TMS320C66x 内核^[7],能够 8 核并行处理数据,极大提升了数据处理效率^[8]。

综上所述,本文采用多核 DSP 芯片 TMS320C6678 来实现基于 Keystone 变换的 SAR/ISAR 混合成像算法,通过多核并行处理来完成 SAR 成像、运动目标检测、ISAR 成像等步骤。

2 基于 Keystone 变换的 SAR/ISAR 成像算法

2.1 基于 Keystone 变换的 SAR 算法

Keystone 变换,本质上是一种尺度变换,在数学上等效于对方位时间变量做一个变量替换,即令 $t = f_c / (f_c + f_r) \cdot t'$,其中 t' 是方位向慢时间。变换前后示意图如图 1 所示,其中变换前数据点如实心点所示,变换后数据点如空心圆所示。相比于传统距离徙动校正方法需要知道目标和雷达的相对运动然后逐目标空变校正,Keystone 变换无需知道目标与雷达的相对运动,能够实现对不同目标不同线性走动的统一盲校正。因此在 SAR/ISAR 成像处理中,Keystone 变换被广泛采用,被用来进行动目标线性距离徙动的校正。

在处理回波数据过程,首先在距离向对数据进行匹配滤波和运动补偿,使场景中心点回波相位为零。此时在方位向通过采用高精度 Sinc 插值实现 Keystone 变换,回波剩余的线性徙动即可得到校正。对插值后的信号做二维傅里叶变换即可实现成像。

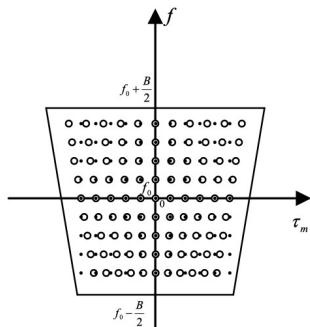


图 1 Keystone 变换示意图

2.2 运动目标检测方案

在对海面目标场景回波进行处理时,可以通过运动目标检测来找到目标在整幅图像的位置。

具体处理流程如下:

步骤 1. 利用依拉准则进行粗处理

依拉准则计算公式为 $T = \mu + 3\sigma$, 其中 T 为依拉准则计算出的门限值, μ 为图像标准差, σ 为图像均

值。经过粗处理后可以剔除图像中的异常值。

步骤 2. Fast CFAR 检测

设置保护单元和参考单元总数,以及检测信噪比(dB),并将 CFAR 检测后的结果与依拉准则处理的结果通过“与”操作进行合并,得到逻辑矩阵。

图 2 为单元平均恒虚警率检测器的实现结构,其中

D 为被测单元的回波功率, $X_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 和

$X_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{n+i}$ 为参考单元左右两侧单元的平均干扰

功率,参考单元的总数是 $N = 2n$ 。保护单元防止参考单元中的目标提高检测阈值。 α 是标称化因子, β^2 是参考滑窗单元中干扰功率的估计值,可以使用已知数据的样本求平均值获得,计算公式为:

$$\beta^2 = \frac{1}{2}(X_L + X_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

给定虚警率 P_{fa} 和参考单元的数量 N ,标称因子 α

可以被计算为:

$$\alpha = N(P_{fa}^{-1/N} - 1)$$

得到最终的检测阈值如下:

$$T = (P_{fa}^{-1/N} - 1) \sum_{i=1}^N X_i$$

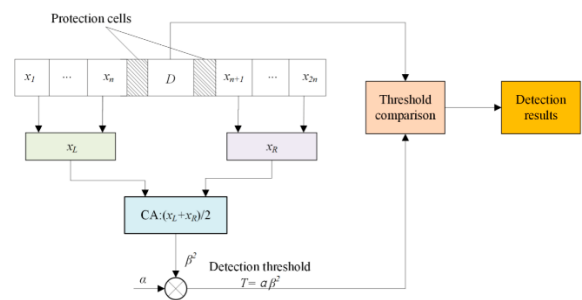


图 2 单元平均恒虚警率(CA-CFAR)检测器

步骤 3. 连通域检测和图像膨胀。

对步骤 2 的结果进行 8 连通域图像标注,并设置区域数门限值筛选出目标,并记录目标所在区域的连通域序号;然后再对该 8 连通域图像标注的结果选择合适的膨胀系数,以矩形结构元素进行膨胀操作。最后再进行一次 8 连通标记,去除孤立目标点的影响,根据目标所在区域的连通域序号搜索出目标的最终区域,并获得

最终的位置。

2.3 ISAR 成像方案

ISAR 成像通过目标相对于雷达的转动, 包括目标自身的转动和目标与雷达之间的切向平动产生的等效转动, 来实现方位向分辨。ISAR 信号处理流程如图 3 所示, 主要包括运动补偿和成像两部分, 其中运动补偿包括距离对准和 PGA 相位补偿。

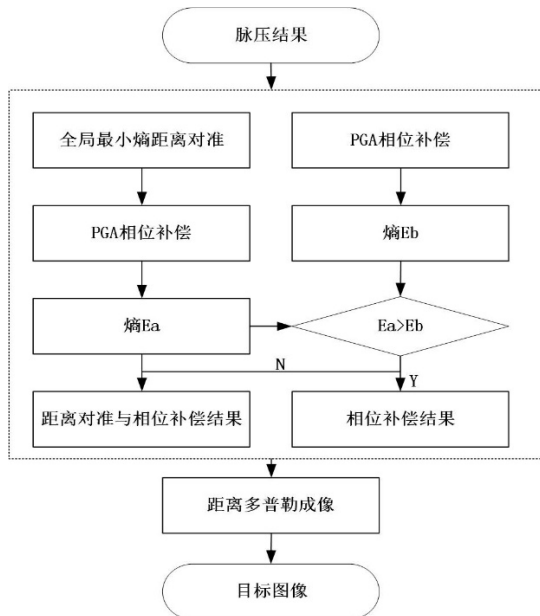


图 3 ISAR 成像流程

2.3.1 距离对准

距离对准是消除目标相对于雷达平动造成的相邻回波在距离向上的错位对准后, 目标上同一散射点的信号在不同的回波脉冲中都位于同一距离单元中。图 4 给出了距离对准过程的示意图。显然, 距离对准是相位补偿的基础, 只有把目标回波在距离向上对准, 才能有效地在方位向进行相位补偿和去除其它散焦因素。

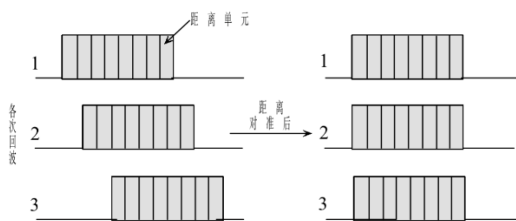


图 4 距离对准过程示意图

2.3.2 PGA(相位梯度自聚焦算法)相位补偿

把目标回波在距离向上对准之后, 需要在方位向进行相位补偿, 消除平动分量对回波相位的影响, 将回波数据调整为相当于对转台目标成像。

PGA 算法主要包括以下 4 个步骤, 流程图如图 5 所示。

步骤 1: 在一维像域用多普勒中心跟踪法进行相位

补偿, 然后通过方位向做 FFT 求得目标初像;

步骤 2: 对初像进行循环移位和隔离并变换回一维像域;

步骤 3: 对第二步得到的数据再用多普勒中心对平动相位分量进行估计, 并对初像在一维像域进行相位补偿, 得到新的像。

步骤 4: 满足条件则迭代终止, 否则以步骤三的结果作为下一次迭代的初像, 重复步骤 2、3。

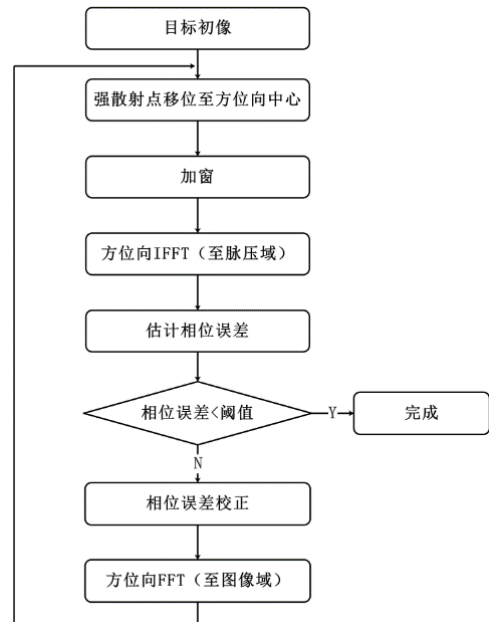


图 5 PGA 处理流程

采用 PGA 算法相位补偿后进行方位向 FFT 得到成像结果。经过距离对准与相位补偿后, 可以得到聚焦的距离-多普勒图像。

3 基于多核 DSP 的实时成像处理架构

3.1 DSP 8 核并行处理设计

在处理实际 SAR 回波信号时, 其数据量庞大且复杂, 使用 DSP 进行处理时, 必须采用多核并行处理的方式才能满足实时性要求。由于 SAR 成像算法各模块之间耦合度高且存在数据依赖的问题, 需要上一模块数据处理完成才能开始进行下一模块, 故本文采用 Fork-Join 模型与硬件信号量相结合的方式来实现整个回波处理流程。

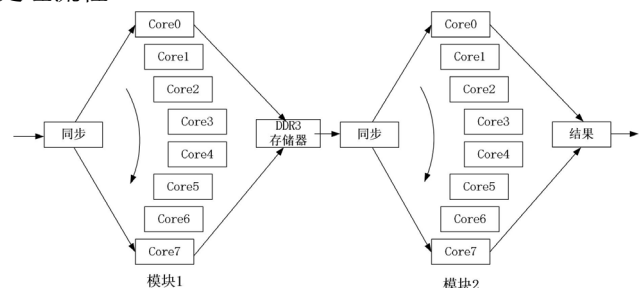


图 6 fork-join 示意图

3.2 算法多核处理过程

3.2.1 SAR 成像模块

本模块根据输入数据和相关参数，在多核 DSP 中对回波进行处理，校正目标距离徙动线，输出符合幅宽要求的图像。

首先核 0 作为最先加载完成的核进行初始化操作，并与各核保持同步通信。其他核负责生成后续处理所需要的系数表，并存储到共享内存 MSM 中。如图 7 所示，距离向脉冲压缩以脉冲数为基准将回波数据均匀分成 8 份分配给 8 个核，各个内核通过增强型直接数据交互技术 (EDMA) 从片外 DDR3 的对应存储区逐脉冲搬移数据到 LL2 的动态变量 temp 中，再利用共享内存中的参数进行复数相乘和 FFT/IFFT 等操作。对数据脉冲压缩和运动补偿完成后，再将数据从临时变量存回 DDR3 中。各个核数据处理完成后等待同步信号执行下一步指令。

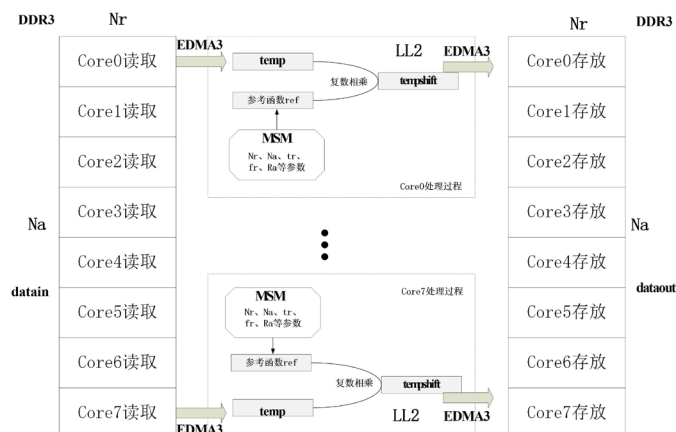


图 7 距离向匹配滤波模块多核任务示意图

距离向处理完成后，将输出结果传输至矩阵转置模块，将数据逐距离门存放至片外 DDR3 中便于后续处理。如图 8 所示，方位向 Keystone 变换模块以距离单元数为基准将数据均匀分为 8 份分配给 8 个内核并行处理。首先，每个内核通过 EDMA 将数据从各自分配内存区域搬移至 LL2 的动态变量 temp 中；随后根据共享内存 MSM 中的参数计算方位向插值的输入输出坐标；然后根据查表法获得 sinc 系数并于输入数据进行相关处理得到方位向 Keystone 变换后的结果；最后各个内核通过 EDMA 将处理结果输出至 DDR3 对应区域。

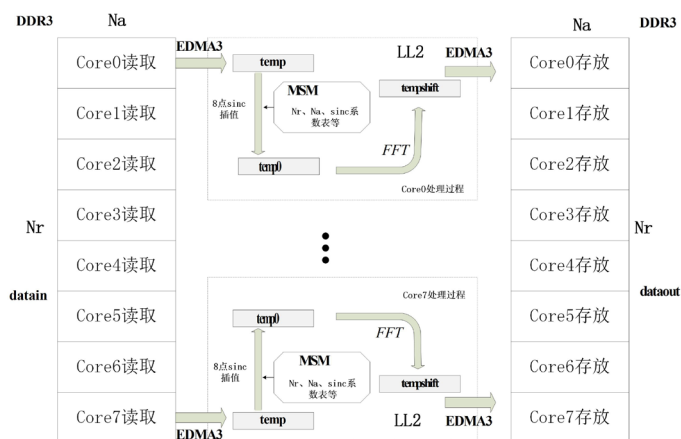


图 8 方位向 Keystone 变换模块多核任务示意图

将方位向输出数据再次转置并进行距离向 IFFT 操作即可得到目标的 SAR 图像。

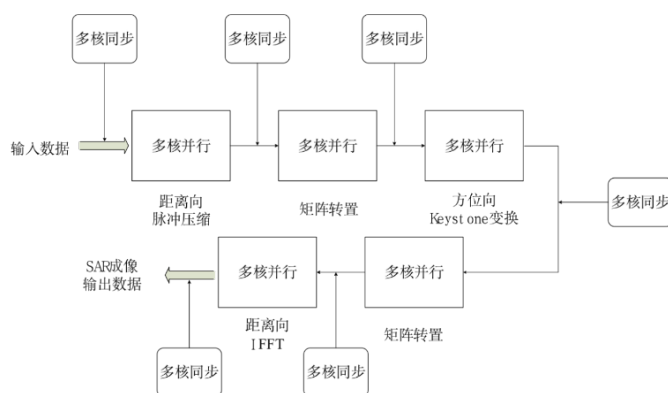


图 9 SAR 成像模块处理多核并行设计示意图

3.2.2 运动目标检测模块

本模块根据 SAR 成像模块的输出，对整幅 SAR 图像进行运动目标检测，最终确定目标在整幅 SAR 图像中的位置信息，DSP 多核处理过程如图 10，具体过程如下：

步骤 1. 利用依拉准则进行粗处理

首先通过 EDMA 将 SAR 成像模块输出数据均匀分成 8 份由各个内核分别求模并累加得到幅度和，各核输出累加然后计算数据的均值和方差，再根据公式计算出检测门限值 threshold0 存入共享内存 MSM 中。

步骤 2. Fast CFAR 检测

对上一步骤得到的数据模值，设置保护单元和参考单元总数，以及检测信噪比(dB)，8 核并行对其进行 Fast CFAR 检测得到门限 threshold1，将数据模值进行转置再次进行 Fast CFAR 检测得到门限 threshold2。并将 CFAR 检测后的结果与依拉准则处理的结果通过“与”操作进行合并，得到逻辑矩阵。

步骤 3. 连通域检测和图像膨胀。

对步骤 2 的结果进行 8 连通域图像标注，并设置区域数门限值筛选出目标，并记录目标所在区域的连

域序号;然后再对该 8 连通域图像标注的结果选择合适的膨胀系数,以矩形结构元素进行膨胀操作。由于连通域检测与图像膨胀都需要同时对整个数据区域进行处理,故这部分操作由核 0 单核进行处理,其余核等待核 0 完成,同步后进行下一阶段处理。

步骤 4.连通域检测

再进行一次 8 连通标记,去除孤立目标点的影响,根据步骤 3 中目标所在区域的连通域序号搜索出目标的最终区域,并获得目标最终的位置区域 $[x1,x2,y1,y2]$ ($x1,x2,y1,y2$ 分别为目标区域在整幅图像中距离向起始点数、距离向终止点数、方位向起始点数、方位向终止点数)。

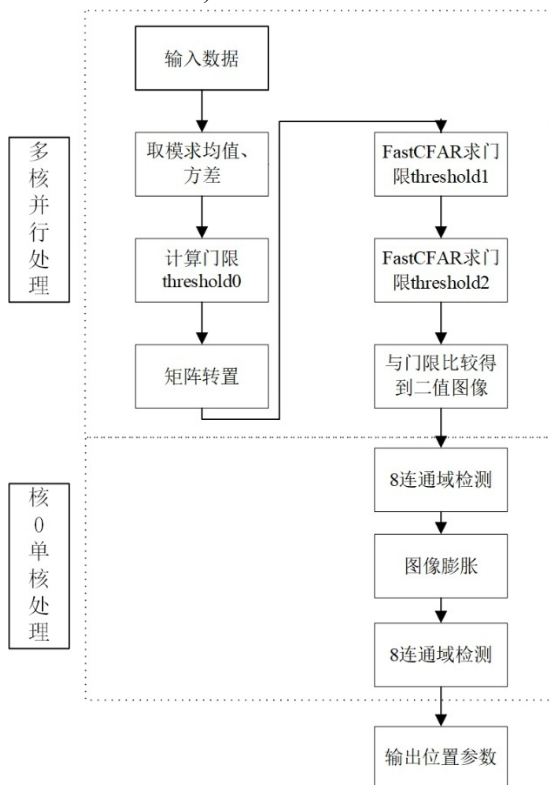


图 10 对海运动目标检测模块示意图

3.2.3 ISAR 成像模块

本模块根据目标检测模块的输出坐标,对 SAR 图像进行截取,得到目标图像。由于在 DSP 处理过程中,FFT/IFFT 的点数为 2 的整数次方时能够提高算法效率,减少运行时间,所以在截取目标图像时,输出图像标准化即将其距离向和方位向点数均扩大至 2 的整数次方。为降低算法复杂度,在 DSP 实际处理过程中运动补偿采用距离对准与相位补偿的结果,实际处理过程如图 11 所示。

步骤 1: 根据目标检测模块输出的坐标,将对应的子图数据均匀分成 8 份,各内核通过 EDMA 逐距离门从片外 DDR3 中搬移对应的数据至各自 LL2 的动态变量 temp 中,对数据进行方位向 IFFT 使图像返回数据

域并输出至 DDR3 中。

步骤 2: 多核并行通过 EDMA 搬移步骤 1 的输出进行距离对准,然后根据多普勒中心跟踪法进行相位补偿,方位向 FFT 后得到目标初像并输出至 DDR3 中。

步骤 3: 8 核并行遍历对应数据区域挑选出能量最大的 5% 的距离单元并存储至 DDR3 中;将挑选出的数据根据方位向最大值索引完成中心移位,然后经过加窗、方位向 IFFT、共轭相乘等操作后输出每个距离门的相位误差梯度;根据相位误差梯度计算出整幅子图像的相位误差值并对数据进行补偿;补偿后的子图像重新送入 PGA 模块进行迭代,迭代 6 次后得到的方位相位误差与原始散焦图像共轭相乘进而得到聚焦后图像。

其中 PGA 处理模块由于强散射点数量的不同,设计了不同的处理方式。实际处理过程中,强散射点个数选取为距离向截取点数的 5%,在目标检测输出的区域过小时,强散射点个数可能会小于 8,此时数据无法均匀分配到 8 个内核并行处理,故在强散射点数小于 8 时,由核 0 单核处理。其中 PGA 处理模块如图 12 所示。

步骤 4: 通过 EDMA 将聚焦后的子图像重新放回原始图像中被截取的区域,最终得到完整的运动目标聚焦的图像。

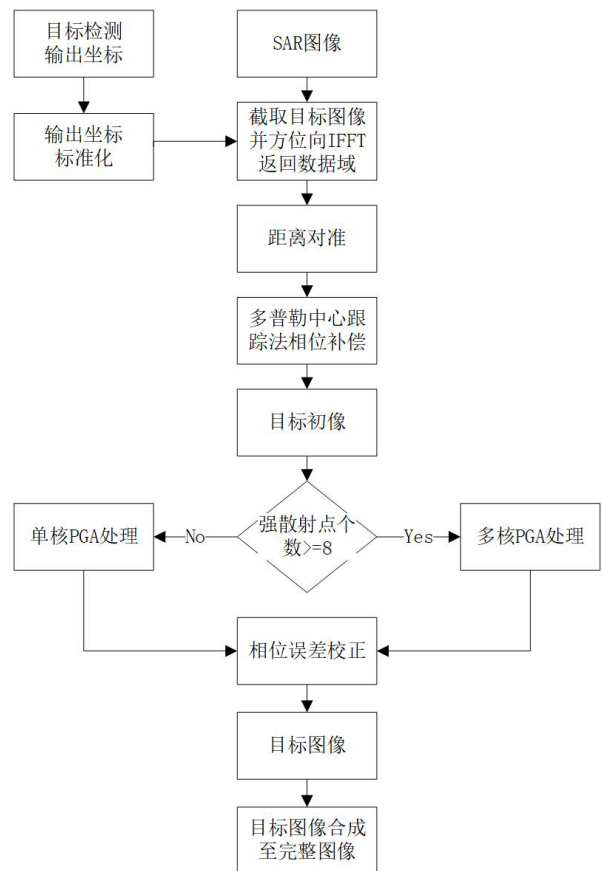


图 11 ISAR 成像模块示意图

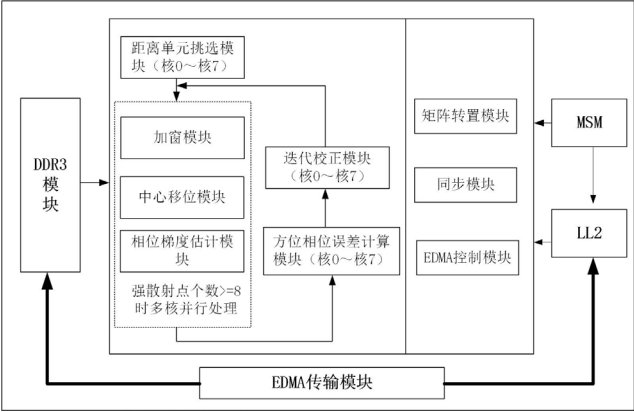


图 12 PGA 处理模块示意图

4 成像验证与结果分析

为验证本文处理架构的正确性，使用上述实时成像处理模块对实测海面 SAR 回波进行了处理。同时，处理时间分析证明了基于单片 DSP TMS320C6678 的 SAR 成像技术的效率。

4.1 实测数据处理结果

表 1 给出了某机载雷达对海实测数据的主要参数。数据大小为 2048*2048。经过 SAR 成像模块、运动目标检测模块、ISAR 成像模块，最终输出图像如图 13~15 所示。

表 1 主要成像参数

| 参数名 | 数值 |
|-------------|-------|
| 带宽 (MHz) | 100 |
| 采样率 (MHz) | 120 |
| 斜视角 (deg) | 23.3 |
| 作用距离 (m) | 24744 |
| 脉冲重复频率 (Hz) | 4000 |
| 距离向点数 | 2048 |
| 方位向点数 | 2048 |

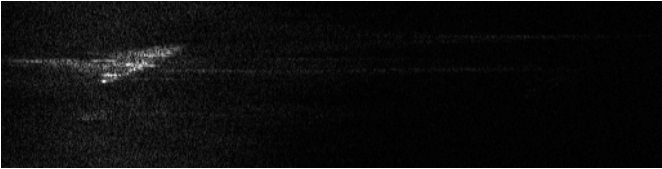


图 13 目标检测输出区域图像

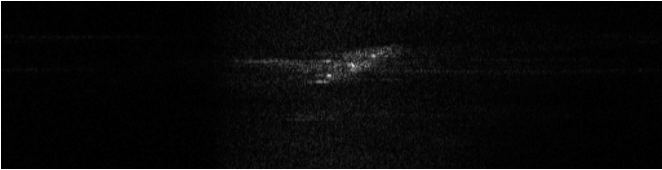


图 14 ISAR 成像结果

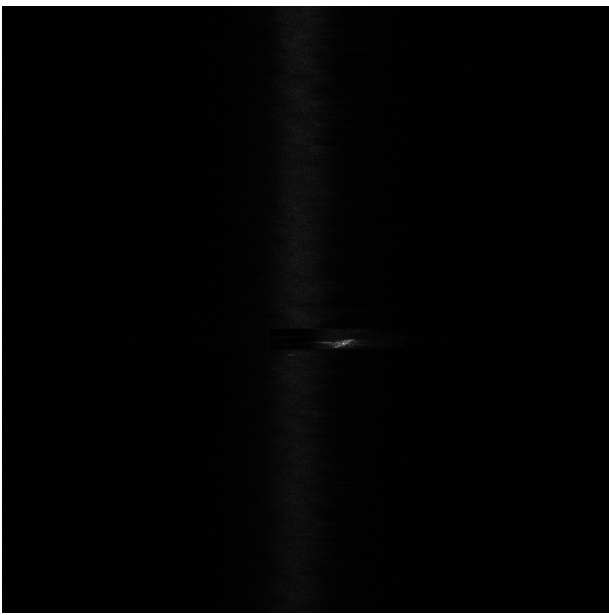


图 15 ISAR 成像结果放入原图像结果

根据上图实测数据的成像结果，运动目标检测模块可以准确找出目标在图像中的位置，经过 ISAR 成像模块处理，图像聚焦效果良好，进而验证了基于多核 DSP 的实时成像处理架构的有效性。

4.2 处理时间分析

基于多核 DSP 的实时成像处理架构的处理时间如表 2 所示，详细列出了芯片上每个模块的处理时间。从表上可以看出单片 DSP 完成 SAR 成像和 ISAR 成像部分的处理总耗时为 0.531s。其中距离向匹配滤波处理需要 0.041s，方位向 Sinc 插值需要 0.339s，2048*2048 矩阵的转置一次需花费 0.032s；根据目标检测输出结果的不同，ISAR 成像模块处理的数据大小也会有所变化，本文 ISAR 成像处理数据大小为 128*512 点，耗时 0.026s。由于运动目标检测部分的连通域检测和图像膨胀均需要同时对整幅图像进行处理，不宜将数据分块并行处理，只能采用单核处理的方案，故耗时较长，需要 3.191s。

表 2 处理时间对比

| 成像模块 | 单片 DSP 耗时(s) | Matlab 耗时(s) | 硬件加速比 |
|--------|--------------|--------------|--------|
| 匹配滤波 | 0.041 | 0.172 | 4.195 |
| 矩阵转置 | 0.032 | / | / |
| 方位向插值 | 0.339 | 1.128 | 3.327 |
| ISAR | 0.026 | 0.318 | 12.231 |
| 成像耗时总计 | 0.531 | 1.628 | 3.066 |

5 总结

本文基于 SAR 成像算法、运动目标检测、ISAR 成像算法等一系列信号处理，利用多核 DSP 芯片

TMS320C6678 完成了算法的多核并行处理方案及各模块的硬件实现。最后通过对海实测数据成像验证了所提出处理架构的正确性和有效性。同时,提出的 DSP 处理架构可拓展至多片 TMS320C6678 芯片协同处理,实现乒乓嵌套流水并行处理来进一步提高成像效率。

参考文献:

- [1] D. A. Ausherman, A. Kozma, et al., "Developments in Radar Imaging", IEEE Trans. on Aerosp.
- [2] W. G. Carrara, R. S. Goodman, et al., "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤, "雷达成像技术", 电子工业出版社, 北京, 2005。
- [4] MOREIRA A, PRATS-IRAOLAP, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6—43.
- [5] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生, 等.合成孔径雷达成像原理[M].电子科技大学出版社, 2007.
- [6] 吴沁文. 多核 DSP 芯片 C6678 引导过程的研究与实现 [J]. 现代雷达, 2016, 38(11): 35—39. WU Qinwen. Study and realization of boot procedure of multi-core DSP C6678 [J]. Modern Radar, 2016, 38(11): 35—39.
- [7] J. T., W. H. and L. H., "Design of a flexible high-performance real-time SAR signal processing system," in 2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP), 2016, pp. 513-517.
- [8] 孟星伟, 董兰, 朱岱寅. 大斜视机载 SAR 多核 DSP 实时成像处理架构 [J]. 现代雷达, 2021, 43(12): 7—14. MENG Xingwei, DONG Lan, ZHU Daiyin. Highly squinted airborne SAR real-time imaging processing architecture based on multi-core DSP [J]. Modern Radar, 2021, 43(12): 7—14.