

基于多核 DSP 的正侧视 SAR 实时成像技术

谷宝民, 陈程, 朱岱寅, 李芳凝

南京航空航天大学, 南京 211106

Email: gu_baomin@163.com

摘要: 针对合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)运算量大、耗时长的问题, 本文采用多核 DSP TMS320C6678 进行正侧视 SAR 数据处理成像。处理步骤包括改进的极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)成像、相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)、几何失真校正(Geometric Distortion Correction, GDC)、图像量化。最后通过实测数据成像结果证明了多核 DSP 处理的正确性和有效性, 可以在 1.12 秒内处理 4096*2048 点的数据, 满足实时成像要求。

关键词: 合成孔径雷达; 极坐标格式算法; 多核信号处理器;

Side Looking SAR Real-time Imaging Technology Based on Multi-core DSP

GU Baomin, Chen Cheng, Zhu Daiyin, Li Fangning

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

Abstract: In order to reduce the amount of calculation and the time consuming in imaging processing of SAR, Multi-core Digital Signal Processor TMS320C6678 is used for side looking SAR data processing in this paper. The entire processing chain includes improved polar format algorithm (PFA), phase gradient autofocus (PGA), geometric distortion correction (GDC) and image quantization. Finally, measured data imaging result demonstrates correctness and validity of the Multi-core DSP processing chain and it can process the image of 4096*2048 pixels within 1.12 seconds to meet the requirements of real-time imaging.

Key words: Coupled array; Aperture Radar (SAR); Polar Format Algorithm (PFA); Multi-core Digital Signal Processor (DSP)

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) 具有全天候、全天时、多极化、高分辨率等特点, 在军事和民用领域有着突出的贡献, 它克服了传统雷达在方位向分辨率受限的弱点, 可以获取远作用距离的大区域高分辨的图像[1]。

成像算法是 SAR 信号处理的核心, 极坐标格式算法 (Polar Format Algorithm, PFA) 在成像效率、补偿雷达平台非共面飞行和校正运动目标线性距离走动等方面有显著优势。文献[2-4]中介绍了二维插值的经典 PFA 算法, 并基于尺度变换原理, 分析指出极坐标格式转换可以分解为距离和方位两个尺度变换, 从而避免了耗时的插值操作, 让算法更加简洁高效。

SAR 成像回波数据量大、算法复杂, 在高速、高动态、高实时性的条件下, 对雷达信息处理机的处理运算能力提出了很高的要求。如何实现高性能、灵活的实时 SAR 信号处理也是当前的主要挑战之一[5]。作为专门为信号处理而设计的高速电子器件, DSP 非常适用于 SAR 成像的实时处理。TI 公司的 TMS320C6678 芯片集成了 8 个主频达 1GHz 的内核[6], 拥有并行处理数据的能力, 且效率更令人满意。综上所述, 本文采用改进的基于二维 PCS 的 PFA 算法, 并结合工程实现的需要进行了一些改进。

2 改进版极坐标格式 SAR 成像算法

为了获得高分辨率的图像, 需要大的孔径转角,

基金项目: 国家自然科学基金 (62271252)

作者简介: 谷宝民(1997—), 男, 硕士, 研究方向为基于多核 DSP 的雷达信号处理; 陈程(1999—), 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。李芳凝(2000—), 研究方向为机载雷达前视成像;

一般采用聚束式合成孔径雷达,在常见的聚束式 SAR 算法中,极坐标格式算法(PFA)因为高效易实现,在工程实践中应用非常广泛。采用二维插值的经典 PFA 算法,可以在空频域将回波数据从笛卡尔直角坐标格式转换为极坐标格式。当作用距离和成像场景较小时,该算法可以有效补偿远离成像场景中心的散射点的越分辨率单元迁移(Migration Through Resolution Cell, MRTC)[3]。但是在工程实际应用中,插值计算比较耗时,并不适合在实时成像中实现。在[3]中,可以将距离向插值转化为更加高效的 PCS 处理,并且在正侧视条件下,方位向插值也可以简化为高效的 PCS 处理。

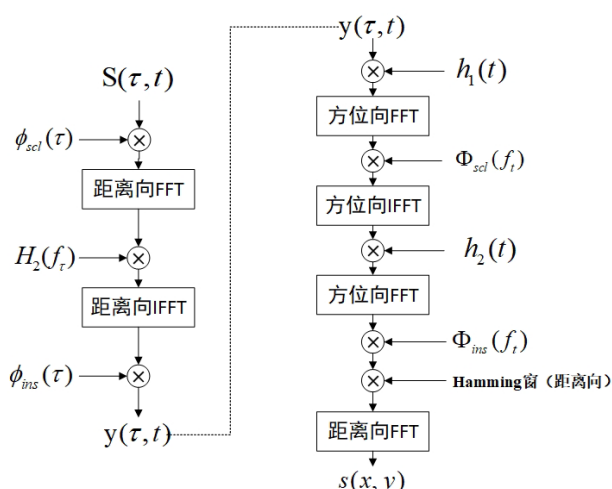


图 1 改进后的 PFA 流程

一般 SAR 的发射信号采用线性调频信号。采用dechirp接收方式去除 RVP 误差后的回波可以表示为:

$$S(\tau, t) = \text{rect}\left[\frac{\tau - 2r(t)/c}{T_r}\right] \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi k}{c}[r(t) - r_a(t)]\left[\tau - \frac{2r_a(t)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi k[r(t) - r_a(t)]}{\lambda}\right\}$$

其中 τ 为快时间, t 为慢时间, T_r 为脉冲宽度, c 为光速, k 为调频斜率, λ 为波长, $r(t)$ 为天线相位中心到目标的距离, $r_a(t)$ 为天线相位中心到场景中心的距离。改进后的 PFA 的处理步骤如图 1 所示。

3 基于多核 DSP 成像设计

3.1 多核并行处理

为了更加充分地利用 DSP 硬件资源,尽可能缩短数据处理时间,在整个处理流程中,整个数据的处理任务被平均分为八份,并分配到每个核中。当下一个任务会涉及其他核的处理结果时,8 个核需要在开启

下一个任务之前进行同步确认,确保每个核的上一个任务都已经完成[7]。图 2 展示了处理过程中同步的时刻和方式,图中省略了进行距离向和方位向处理前对于数据的转置操作及在那之前的同步。后面将介绍各个任务模块在 TMS320C6678 上的具体实现架构。

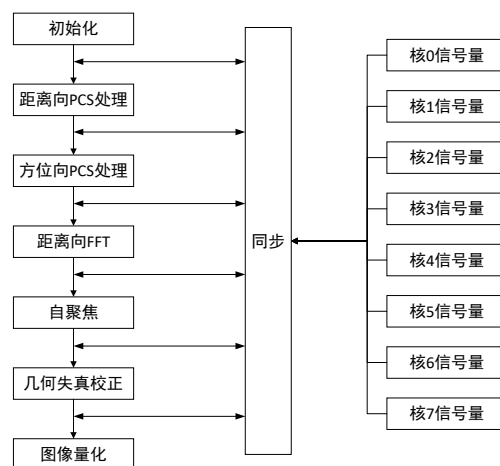


图 2 各个任务模块间的核同步

3.2 基于 8 核的 PFA 处理

对于距离向 PCS 和方位向 PCS 模块,处理流程类似。各个核将所需要处理的数据按照脉冲或者方位向依次通过 EDMA3 搬运到核内 L2 的数组中,以便有更快的处理速度。由于距离向 PCS 和方位向 PCS 对于数据矩阵的方位向和距离向处理方式不同,而为了更加充分地发挥 EDMA3 搬运数据的速度优势,需要搬运的数据地址连续[8],所以我们在距离向 PCS 和方位向 PCS 之间加入对 DDR3 中的数据的数据的转置操作,以保证在方位向 PCS 模块中 EDMA3 搬运的数据的地址也是连续的。为了同样的目的,在后续距离向 FFT 模块和自聚焦模块前也会进行相同操作。在方位向 PCS 之后, SAR 数据分布在波束域,经过距离向 FFT 之后得到我们需要的成像结果。

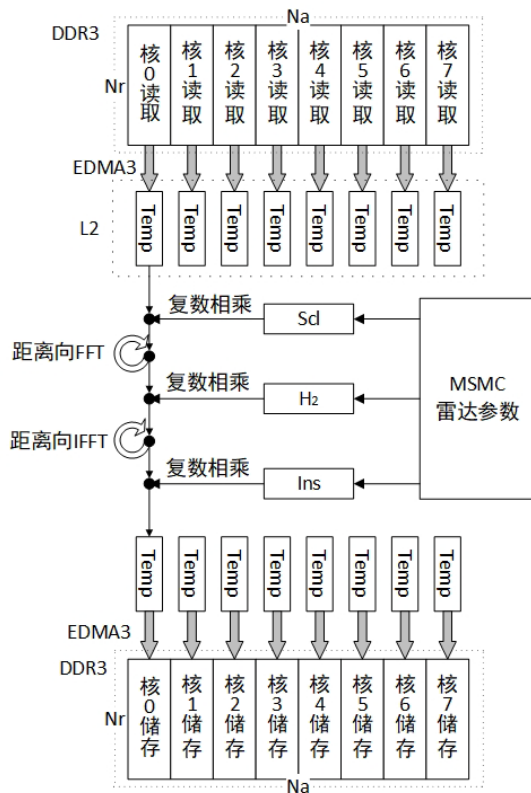


图3 距离向 PCS 多核处理

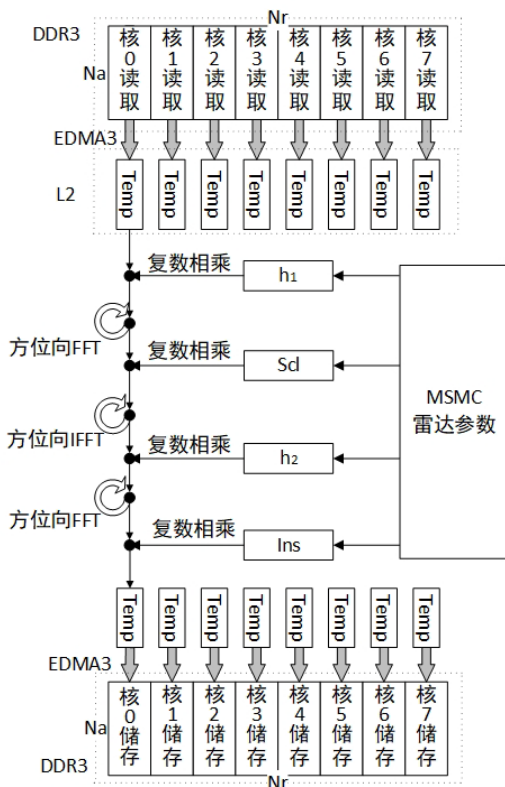


图4 方位向 PCS 多核处理

3.2 基于8核的自聚焦处理

在实际条件下, 雷达运动情况会受到气流、平台振动、飞行轨迹并非理想直线等因素影响, 导致回波

相位误差, 从而使 PFA 处理结果的图像聚焦情况不理想。为了提升图像质量, 减少相位误差, 我们对 PFA 图像进行 PGA 处理。PGA 具体处理流程如下:

1. 根据最大能量原则, 我们从每个距离门选出最大能量点或者将每个距离门的能量求和进行排序, 在整幅图像中挑选能量最大的 3%-20% 的距离门数据, 作为后续进行相位误差估计的数据。
2. 将挑选出的数据的每一个距离门的数据通过循环移位将每个距离门数据最大能量点移到中心位置, 再依次进行加 Hamming 窗、方位 IFFT、与共轭后的数据错位相乘等操作后得到每个距离门的方位相位梯度值。
3. 转置已经得到的相位梯度值矩阵, 按距离向求和后求相位角, 再对相位角积分后可得各方位位置对应的相位误差值。
4. 将计算出的误差对挑选出用于估计相位误差的数据进行补偿, 然后使用补偿后的数据进行再次估计, 总共迭代 6 次, 这 6 次累积的相位误差就是最终的相位误差。用最终的相位误差共轭后与 PFA 图像方位向 IFFT 后的结果相乘, 再方位向 FFT 后得到 PGA 重新聚焦后的图像。

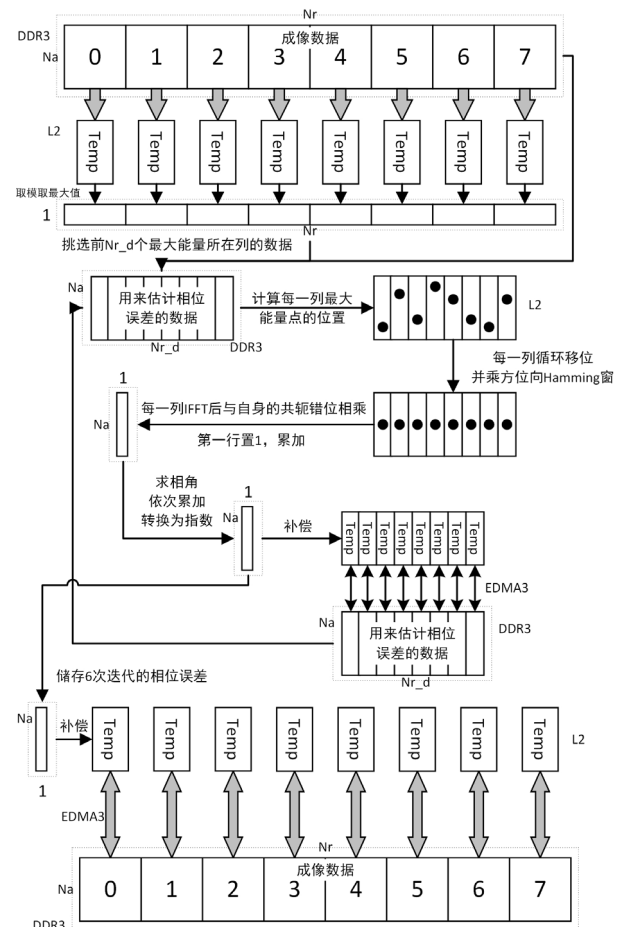


图5 自聚焦多核处理

3.4 基于 8 核的几何失真校正处理

由于 PFA 算法在原理上存在一定的近似,即采用了平面波假设,但随着分辨率的提高,成像场景的增大,平面波假设引入的波前弯曲误差就变的不可忽略了。波前弯曲会导致 PFA 图像产生目标位置的几何失真,即真实的位置 (x_i,y_i) 处的目标在图像中的位置变为 (a,b) [4]。

在实际处理中,我们先确定几何失真校正的成像区域,并划分校正点网格图,确定每个校正点的坐标。然后将成像区域平均分成 8 份,每个核负责一份,根据校正点坐标计算其在 PFA 图像中的坐标,可以通过插值的方式或者临近点近似的方式得到该点的值,并将其放回校正点的位置。各个核每做完一列点的校正后将这列数据取模后通过 EDMA3 存入 DDR3 中,准备后续的量化输出。

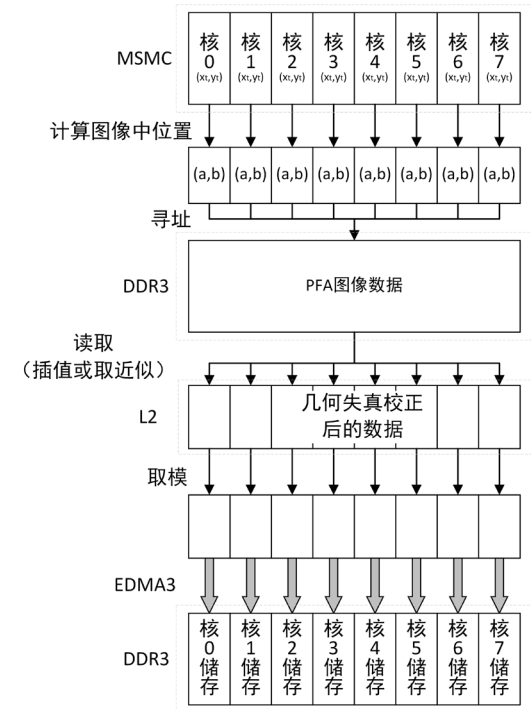


图 6 几何失真校正多核处理

3.5 基于 8 核的图像量化

经过几何失真校正处理后的数据是 float 型的实数,在传输过程中消耗的时间会较长,为了缩短传输时间,提高效率,我们可以将 float 型的数据转化为 Uint8 型的 256 级灰度值。在量化的过程中,先比较得出所有数据的最大值和最小值,这两者之差与 256 的比值就是量化间隔,所有数据超出最小值的部分与量化间隔的比值就是量化后的灰度值。量化后的图像数据可以通过网线更快地回传给上位机,从而显示 SAR 图像。

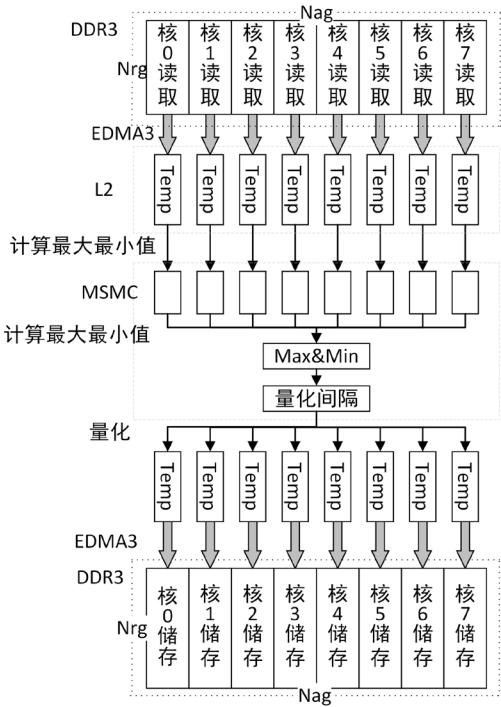


图 7 图像量化多核处理

4 成像验证与结果分析

为验证本文处理框架的正确性,我们将正侧视机载 SAR 的实测数据输入上述实时成像处理模块。同时,记录各模块处理时间,分析比较 DSP 处理效率。

4.1 实测数据处理结果

表 1 为正侧视机载 SAR 实测数据的主要参数,数据大小为 4096*2048。该数据经过包括距离向 PCS、方位向 PCS 和距离向 FFT 的 PFA 模块处理后,再经过自聚焦处理模块,几何失真校正模块和图像量化模块,最终输出的图像如图 8。

从图 8 中我们可以看到坦克、道路、建筑和赛道等地面目标,与图 9 的雷达光学图像对比可以看出该 SAR 图像很好的展示了该区域的情况,证明了本文采用架构的正确性和有效性。

表 1 主要成像参数

参数名	数值
波长 (m)	0.0309
带宽 (MHz)	1800
采样率 (MHz)	4.3
作用距离 (M)	500
飞行速度 (m/s)	5

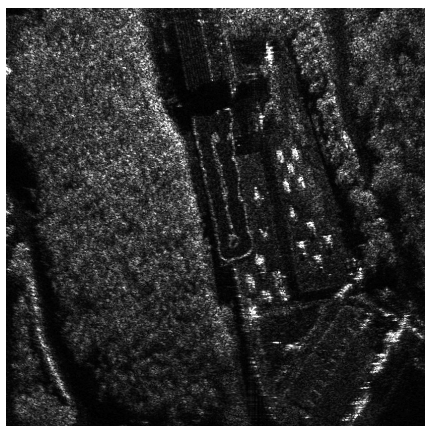


图 8 实测数据成像结果



图 9 雷达成像区域光学图像

4.2 处理时间分析

表 2 处理时间对比

模块	DSP 耗时 (s)	MATLAB 耗时 (s)
距离向 PCS	0.131861604	0.602319
方位向 PCS	0.184639064	1.476934
距离向 FFT	0.040895870	0.147695
矩阵转置(总和)	0.317566020	\
自聚焦	0.381752028	0.430673
几何失真校正	0.053187646	0.254537
量化	0.007771906	\
总计	1.117674138	2.912158

表 2 是 DSP 与 MATLAB 处理同样的 4096*2048 点图像所用时间以及各个模块所用的时间。可以看到 DSP 在距离向 PCS、方位向 PCS、距离向 FFT、几何失真校正模块耗时较 MATLAB 有显著减少。但由于自聚焦模块内部有转置步骤，DSP 耗时与 MATLAB 接近。整体处理时间 DSP 比 MATLAB 缩短了 60%，可见，DSP 显著提高了计算性能，而且 2048 条脉冲积累时间接近 3.9 秒，DSP 处理时间远小于脉冲积累时间，满足实时成像要求。

5 结论

本文设计了基于多核 DSP 的正侧视合成孔径雷达的实时成像系统架构。本架构利用在经典二维插值 PFA 算法基础上改进的使用二维 PCS 的 PFA 算法，配合自聚焦模块，几何失真校正模块和图像量化模块完成对图像的处理，并通过对实测数据成像验证了架构的正确性和有效性。与 MATLAB 相比，多核 DSP 显著缩短了图像处理时间，提升处理效率，为 DSP 平台处理正侧视 SAR 成像任务提供了一套切实可行的算法设计和软硬件方案。

参考文献:

- [1] M. A., P. P., Y. M., K. G., H. I., and P. P. K., "A tutorial on synthetic aperture radar," IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, vol. 1, pp. 6-43.
- [2] D. Zhu, X. Mao, Y. Li and Z. Zhu, "Derivation of the far-field limit of PFA for SAR moving target imaging," 2009 IET International Radar Conference, 2009, pp. 1-5.
- [3] Z. D., Y. S. and Z. Z., "Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, vol. 44, pp. 1433-1448 .
- [4] 毛新华. PFA 在 SAR 超高分辨率成像和 SAR/GMTI 中的应用研究[D].南京航空航天大学,2009.
- [5] 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.
- [6] TMS320C6678 Multicore Fixed and Floating Point Digital Processor. Texas Instrument, 2011.
- [7] KeyStone Architecture Enhanced Direct Memory Access (EDMA3) Controller User Guide. Texas Instruments, 2011.
- [8] 赵浩浩. 大斜视时域 SAR 成像算法的多核 DSP 并行架构实现技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.