

# 矢量处理器在 SAR 实时成像中的应用及性能分析

王 俊, 孙进平, 毛士艺, 王月忠

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 本文介绍了自行研制的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)实时成像处理机中的矢量处理器,及其在实时成像处理中的应用.该矢量处理器在(I)FFT等信号处理方面具有优越的特性,非常适合完成CS成像算法中的(I)FFT和复乘运算.在实时成像处理时,本文运用二维(I)FFT运算,能够避免转角存储,降低处理时间开销,减少对处理器的控制步骤,从而充分发挥该处理器在处理性能、数据传输率和可编程性等方面的优点.文中还分析了该矢量处理器的处理精度,及其对实时成像处理的影响.并将该矢量处理器成功地应用到SAR实时处理机中,最后给出了实际成像结果.

**关键词:** FFT; 实时信号处理; CS 算法

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12A-1928-04

## Performance and Application in SAR of a High Speed Vector Processor

WANG Jun, SUN Jirping, MAO Shi-yi, WANG Yue-zhong

(Department of electronic engineering, Beijing University of Aero. & Astro., Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper studied and accomplished a Synthetic Aperture Radar (SAR) real time processor with good performance. The high speed vector processor, which is the core element of the real time processor is introduced first. The vector processor could be applied to any other field which has massive data to be processed. The study uses 2DFFT to complement CS algorithm, which can remove corner turn and reduce processing overhead. The paper analyzes the precision and processing time of the vector processor and gives a satisfactory image produced by the processor.

**Key words:** FFT; real time; CS algorithm

## 1 引言

实时信号处理在保证信息的有用性和有效性方面极其重要.为此,人们不断寻求快速算法,开发高速数字信号处理器(DSP).根据DSP的功能可以分为通用和专用两类,其中通用DSP可以完成大部分信号处理,专用DSP只能完成特定的信号处理.但是专用DSP在处理性能和数据传输率上优于通用DSP,适合解决超高速海量信号实时处理问题(如:雷达和声纳等领域).

目前DSP的性能非常强大,以处理1024点复数FFT为例,ADSP21160需要90 $\mu$ s(100MHz),TMS320C6X需要74 $\mu$ s(200MHz).而专用DSP在进行FFT等运算时的速度更快,DSP24完成上述运算仅需要21 $\mu$ s(100MHz),即使ADSP21060的同期产品BDSP9124在80 $\mu$ s(40MHz)内也能够完成上述运算<sup>[1-4]</sup>.

SAR实时成像需要在短时间内对大量数据进行处理,因此对实时处理机的处理性能和数据传输速率都有很高的要求.自行研制的基于Chip Scaling(CS)算法的SAR实时处理机

包括矢量处理器、ADC模块、预处理器、通用处理器、记录处理器、图像后处理器和中心控制器等.专用DSP(BDSP9124/9320)构成的矢量处理器完成CS算法的主要运算((I)FFT和复乘).该矢量处理器的海量处理性能和高速数据吞吐率,能够满足SAR实时处理对处理性能和数据传输的要求.

本文介绍了矢量处理器的构成,及其在SAR实时成像中的应用,并分析了矢量处理器块浮点机制对FFT、脉冲压缩处理精度的影响,最后给出处理器完成脉冲压缩的时间开销及成像结果(本文中的讨论对更高性能的专用DSP DSP24一样适用).

## 2 SAR实时处理简介

CS算法是一种经典的、不经插值运算就可以较好完成距离徙动校正的精确成像算法.算法基本流程如图1所示,主要涉及FFT/IFFT和复乘运算,适合FFT专用处理器或高性能通用并行处理器完成<sup>[5]</sup>.

本文采用矢量处理器完成FFT和复乘运算,并且为雷达

回波数据、中间处理结果及脉冲压缩后图像数据提供高速数据通道. 三个相位校正因子的计算由实时处理机的其他部分完成, 并将计算结果经高速数据总线实时传送给矢量处理器.

矢量处理器规格为 C 尺寸 VXI 电路板, 其处理能力强大, 而且具有可编程性和可扩展性, 可以完成 1M 点以内复数数据的处理, 1M 点复数 FFT 仅需要 131ms. 该处理器可以 FFT、FCT、矩阵等运算(包括一维、二维及多维(1) FFT 运算). 另外矢量处理器在完成基-2、基-4 运算的同时可以完成加窗处理, 因而可以进一步减少时间开销.

矢量处理器结构如图 2 所示, 主芯片采用 Butterfly DSP 公司的 BDSP9124/9320, 其中主处理器 BDSP9124 具有 4 个 48bits 的数据接口和一个控制接口, 负责完成数据运算; 外接 RAM 完成数据存储; 地

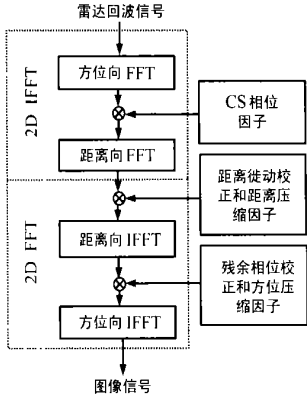


图 1 CS 算法流程

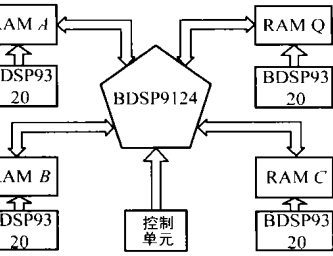


图 2 BDSP9124/9320 处理结构

址发生器 BDSP9320 产生 BDSP9124 所需要的各种 RAM 地址; 控制单元采用 Intel386EX 嵌入式控制器, 并由 FPGA 完成必要的逻辑对 BDSP9124/9320 进行控制. 其中 RAM A 和 RAM Q 采用乒乓存储器结构, 提高了矢量处理器与外部数据的交换速度. 在 SAR 实时信号处理中这两组乒乓存储器完成雷达回波、图像和 CS 相位因子等数据的高速交换, 提高了数据吞吐率<sup>[6]</sup>.

### 3 矢量处理器脉冲压缩过程

如图 1 所示 CS 算法涉及 2 次 FFT、2 次 IFFT 和三次复乘. 由于矢量处理器在(1) FFT 运算过程中可以无开销地完成复乘, 因此可将 CS 算法看作 2 次 FFT 和 2 次 IFFT 运算. 在进行成像处理时既可以按照一维 FFT 运算, 即先进行方位向 FFT, 再进行距离向 FFT ……; 也可将算法看作二维 FFT 运算和二维 IFFT 运算(如图 1 中虚线框所示).

#### 3.1 一维 FFT 法

处理过程如图 3 所示: 第一步, 对输入的回波数据(数据存放格式如图 3(a)所示)进行转角存储(转角存储时输入存储器的地址连续递增, 而输出存储器的地址按列递增, 这些地址方式 BDSP9320 均能产生), 输出数据的存放格式如图 3(b)所示; 第二步, 按照图 3(c)中箭头所示方式一行行进行方位向 FFT(由矢量处理器具有码位倒置功能, 因此可以保证 FFT 运算前后数据均按照正序排列); 第三步, 进行转角存储 ……直到图 3(i)完成脉冲压缩, 输出图像数据. 通用处理器产生的 3 个相位因子分别按照图 3(e)、(f)、(h)格式发送给矢量处理器.

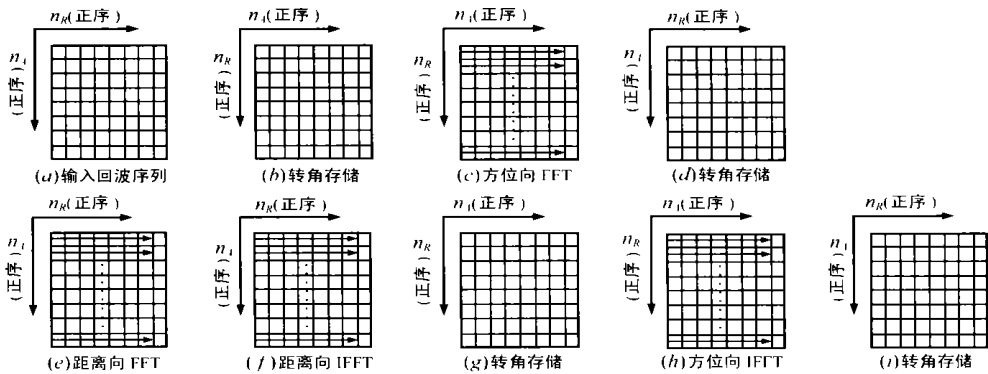


图 3 一维 FFT 完成 CS 算法流程

#### 3.2 二维 FFT 法

处理过程如图 5 所示. 输入回波数据在存储器中的存放格式同前为行列正序记为  $(n_A, n_R)$  (如图 4(a)所示). 第一步, 二维 FFT 进行方位向和距离向 FFT 前, 矢量处理器首先对所有数据进行码位倒置操作, 即  $RBF0(n_A, n_B) = (RBF0(n_R), RBF0(n_A))$ , 这样不仅行列的码位倒置而且行列互换, 完成了转角存储(输出数据存放格式如图 4(b)所示); 第二步, 进行方位向 FFT 运算, 运算后的数据存放格式如图 4(c)所示; 第三步, 继续执行距离向 FFT, 执行结果如图 4(d)所示, 数据存放格式为输入回波数据的转角存储记为  $(n_R, n_A)$ , 这种存放格式有利于下面的距离向 IFFT 和方位向 IFFT; 第四步, 进行

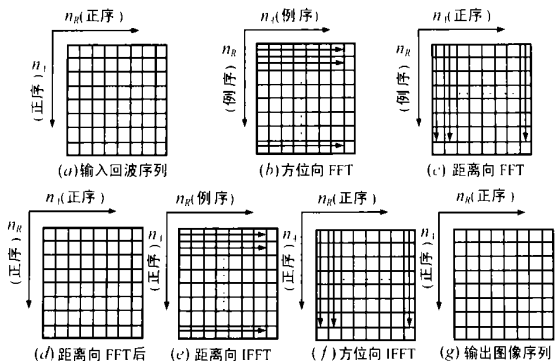


图 4 二维 FFT 完成 CS 算法流程

两维 IFFT 处理前的码位倒置, 结果如图 4(e) 所示; 接下来依次完成方位向和距离向 IFFT 运算, 输出的图像数据如图 4(g) 所示正好和输入数据存放格式相同( $n_A, n_R$ ). 通用处理器产生的 3 个相位因子分别按照图 4(c)、(e)、(f) 的格式发送给矢量处理器.

### 3.3 两种方法的特点

两种方法的特点如表 1 所示. 其中两维 FFT 法具有较大优点, 所以我们采用两维 FFT 处理方法.

表 1 两种方法的特点

一维 FFT 法	两维 FFT 法
需要 4 次转码存储.	无需转码存储, 减少了处理流程.
编程比较麻烦需要一行行进行 $N_A$ 或 $N_R$ 点(1) FFT 运算, 控制比较频繁不利于矢量处理器的操作(例如 2048×512 点的两维(1) FFT 仅需要 8192 次控制).	编程比较方便, 按照 $N_A \times N_B$ 点(1) FFT 对矢量处理器进行控制, 控制次数极少有利于发挥矢量处理器的性能(例如 2048×512 点的两维(1) FFT 仅需要 7 次控制).
不利于矢量处理器块浮点运算	有利于矢量处理器块浮点运算.
通用处理器送来的数据存放格式中不涉及码位倒置现象.	通用处理器送来的数据存放格式中有码位倒置现象.

注: 通用处理器送来数据的码位倒置现象, 利用通用处理器中负责数据通信的 FPGA 进行编程产生需要的地址.

设需要处理的 FFT 序列长度为  $N$ , 存储器字长为  $b$ ,  $q = 2^{-b}$ .

输入端一次衰减法引入计算噪声与信号的信噪比为<sup>[7]</sup>:

$$\delta_X^2 / \delta_F^2 = 1/N^2 q^2 \quad (1)$$

逐级衰减法是在每级蝶形运算时衰减, 其处理精度介于一次性衰减和块浮点之间.

块浮点法通过调整每级蝶形运算前的衰减倍数, 即防止了溢出, 又减少了计算误差. 矢量处理器内部的超长寄存器保证运算时不会产生误差, 只在数据输出时产生截断误差. 每次输出实部、虚部各产生一个量化误差. 该误差方差为:

$$\delta_B^2 = E[|e|^2] = q^2/6 \quad (2)$$

为了讨论方便设在(1) FFT 运算中采用相同基  $RAX$ , 则运算所需级数  $M = \log_{RAX} N$ , 并设第  $m$  级蝶形运算的输入为  $X_{m-1}(n_i)$  输出为  $X_m(n_i)$ ,  $i \in [0, RAX]$ . 则

$$\begin{aligned} & \max(|X_m(n_0)|, |X_m(n_1)|, \dots, |X_m(n_{RAX-2})|, |X_m(n_{RAX-1})|) \\ & \leq RAX \cdot \max(|X_{m-1}(n_0)|, |X_{m-1}(n_1)|, \dots, |X_{m-1}(n_{RAX-2})|, |X_{m-1}(n_{RAX-1})|) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)说明, 如果  $|X_{m-1}(n)| \leq 1$ , 则  $|X_m(n)| \leq RAX$ . 即将  $X_{m-1}(n)$  衰减为  $1/RAX$ , 则不会使  $|X_m(n)| > 1$  而溢出. 块浮点就是利用这种机制来扩充定点处理器所处理数据的动态范围. 同时为了尽量保持处理精度, 并不是在所有情况下都移位  $RAX$ . 最坏情况下, 即每级都存在衰减为  $1/RAX$  的移位,  $m$  级的误差个数为  $RAX^{M-m+1}$ , 经过  $(1/RAX)^{M-m}$  的衰减, 所以总的误差方差为:

$$\delta_F^2 = \sum_{m=1}^M RAX^{M-m+1} \delta_B^2 [(1/RAX)^{M-m}]^2 \approx (RAX^2 / (RAX-1)) \delta_B^2 \quad (4)$$

SAR 成像为宽带系统, 假设输入信号为均匀分布的白噪声序列  $x(n)$ , 由于矢量处理器的实、虚部取置范围为  $[-1, 1]$ , 所以第一次输入信号模值有可能在  $[\sqrt{2}, 1]$  范围内. 此时首先

## 4 矢量处理器处理性能

由于矢量处理器是 SAR 实时成像处理机的核心部分, 它的性能关系到 SAR 实时成像质量. 下面对矢量处理机的两个重要性能处理精度和实时性进行分析.

### 4.1 处理精度

矢量处理器采用块浮点机制属于定点处理. 由于定点数所能表示数值范围比较小, 因此在进行数据运算时必须设法防止计算结果溢出. 在进行 FFT 运算有以下几种方法: 输入端一次衰减法、逐级衰减法和块浮点法.

需要将输入衰减  $1/2$ , 才能可保证以后每级不会出现模值大于 1 的情况, 所以

$$\delta_X^2 = 1/(12N) \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得最小信噪比为:

$$\delta_X^2 / \delta_F^2 = (RAX-1)/(12N \cdot RAX^2 \cdot \delta_B^2) \quad (6)$$

当输入信号足够小处理不产生移位时, 信噪比最大为.

$$\delta_X^2 / \delta_F^2 = 3/\delta_B^2 \quad (7)$$

由式(6)、(7)可以得到 BDSP9124 块浮点处理器, 由于有限字长所带入的计算误差信噪比范围:

$$(RAX-1)/(2N \cdot RAX^2 \cdot q^2) \leq \delta_X^2 / \delta_F^2 \leq 18/q^2 \quad (8)$$

浮点处理引入的计算噪声信噪比<sup>[7]</sup>:

$$\delta_X^2 / \delta_F^2 = 3/(2Mq^2) \quad (9)$$

式(1)、(8)、(9)说明误差信噪比与序列长度的关系, 可以看出块浮点处理精度介于定点和浮点之间. 以上分析以输入白噪声为例, 实际上信噪比会因输入信号的不同而有所变化, 其误差在 15% 以内.

### 4.2 实时性

BDSP9124 内部为流水线结构, 数据按照时钟周期顺次进入处理器, 经过特定的处理延迟后输出. 以  $N$  点复序列 FFT 为例说明处理时间开销,  $M = \log_{RAX} N$ , 处理器的时钟周期为  $t_c$ , 处理延迟为  $t_{\text{delay-RAX}}$ , 则总的处理时间为<sup>[7]</sup>:

$$t = M \cdot (N \cdot t_c + t_{\text{delay-RAX}}) \approx MNt_c = N \cdot (\log_{RAX} N) \cdot t_c \quad (10)$$

对于可以用基-16 运算的 FFT, 如果采用基-2 运算其处理时间会是采用基-16 运算的 4 倍.

综上所述, 处理点数  $N$  和运算时采用的基底  $RAX$  均会影响引入的误差及处理时间. 处理点数越多, 处理精度会下降, 相应处理时间会加长; 基底越大, 运算误差将会越大, 但  $RAX$  越大运算效率越高. 我们注意到大基底运算可以大量节省计算时间, 而引入的计算误差并不十分明显(基-4 比基-2 多引入 1.2dB 的误差、基-16 比基-2 多引入 6.3dB 的误差),

所以在误差允许的情况下应尽量选用大基底组合(以上分析均假设在运算时采用相同的基底组合,对实际处理中往往需要不同基底一起完成处理,以上结论仍然成立)。

## 5 矢量处理器在 SAR 实时处理机中的实际性能

以上我们简要分析了矢量处理器在 SAR 成像中的应用和性能,下面给出实际的处理结果。

本矢量处理器可以完成 1M 点复数处理。在实际应用中我们对方位向 512 点,距离向 2048 点的数据进行处理。运用大基底运算(基-2、基-16、基-16、基-2、基-4、基-16、基-16)整个 CS 算法中矢量处理器仅需要 20 多条控制语句。脉冲压缩时间为 0.597s。脉冲压缩结果如图 5 所示距离向和方位向均得到了很好的压缩。图 6 为方位向剖面图,可以看出压缩后的峰值旁瓣比接近理论值 13.2dB,距离向的压缩结果和方位向一样。

对 ESAR 数据进行处理也得到了满意的图像。由上述分析和处理结果可以看出矢量处理器的强大功能。

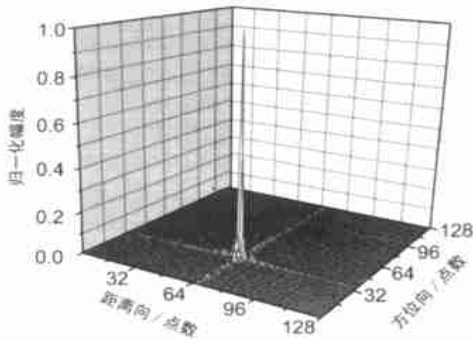


图 5 脉冲压缩结果

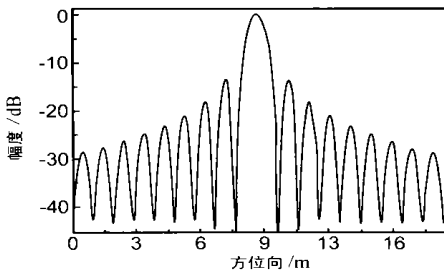


图 6 方位向剖面图

## 6 结论

本文成功地设计了一种高性能矢量处理器,并与其他处理器联合组成一个高性能 SAR 实时处理机。该实时处理机能够在正侧视和前斜视模式下进行条带式成像处理,分辨率均在 3m 以下。矢量处理器完成 SAR 成像 CS 算法中的 FFT 和复乘等关键运算。在进行这些处理时,本文运用 2DFFT 运算避免了转角存储,降低了处理器时间开销。本文在对处理器处理精度和实时性分析的基础上,在进行成像处理时选用大的基底,这样既减少了成像时间,又不至于引入过多的处理误差。最后通过实际应用进一步说明该矢量处理器具有强大的处理功能、高速海量数据传输速度、简洁的编程控制方法和可扩展性,可以应用在 SAR 实时处理及其它要求对海量数据进行实时信号处理的领域。

### 参考文献:

- [1] BDSP9124/BDSP9320 User's Guide [R]. USA: Butterfly DSP Electronics Corporation, 1997.
- [2] DSP24 Users Guide [R]. USA: DSP Architectures Inc., 2000.
- [3] ADSP21160 SHARC Technical Specification [R]. USA: Analog Devices Inc., 1998.
- [4] 任丽香, 马淑芳, 李方慧. TMS320C6000 系列 DSPs 的原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [5] Alberto Moreira, Yonghong Huang. Airborne SAR processing of highly squint data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans. on GE, 1994, 32(5): 1029-1040.
- [6] 王俊, 毛士艺, 刘祥林. 高速矢量处理机的设计与实现 [J]. 航空学报, 2001, 5, 22(3): 212-216.
- [7] 董绍平, 陈世耕, 王洋. 数字信号处理基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.

### 作者简介:

王俊 男, 1972 年生于陕西省渭南市, 北京航空航天大学电子工程系博士研究生, 主要从事实时信号处理方面的研究。

孙进平 男, 1975 年生于甘肃省秦安县, 北京航空航天大学信号与信息处理专业博士研究生, 1998 年于北京航空航天大学获工学硕士学位, 现主要从事机载 SAR 成像方面的研究。

毛士艺 男, 1935 年生于重庆, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士。主要研究领域为: 高分辨率雷达成像、弱信号检测、非高斯信号建模、信号分类、多传感器融合、数据互联和多目标跟踪。