

文章编号 :1001-2486(2000)06-0096-05

基于高性能 DSP 实现的多普勒波束锐化实时成像处理*

何峰* ,关冬林 ,宋千 ,李悦丽 ,周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 :在简要介绍多普勒波束锐化(DBS)成像原理和 TMS320C6201 芯片特点的基础上,着重讨论了 DBS 成像算法基于 DSP 的实现。在实现过程中充分考虑了通用 DSP 完成非线性运算、除法运算耗时大以及存贮 I/O 操作耗时不能忽略等特点。最后分析了算法性能并给出了实验结果。

关键词 :多普勒波束锐化 ;雷达成像 ;数字信号处理器

中图分类号 :TN957.52 ;TN958 **文献标识码** :A

Implementation of DBS Real-time Imaging Processing Based on Advanced DSP

HE Feng ,GUAN Dong-lin ,SONG Qian ,LI Yue-li ,ZHOU Zhi-min

(College of Electronic Science and Engineering , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract :This paper presents the principle of doppler beam sharpening(DBS) imaging and the characteristic of TMS320C6201. Then, the implementation of DBS imaging algorithm based on general DSP is described in detail, in which the characteristic of general DSP and the effect of memory I/O operation are taken into account. In the end the performances are analyzed and experiment results presented.

Key words :Doppler Beam Sharpening ; radar imaging ; digital signal processor

多普勒波束锐化(DBS)技术属于合成孔径技术的一种模式,通常用于空载成像雷达的空/空、空/地状态,用于改善图像方位向分辨率。DBS 模式雷达天线工作在扫描状态,对接收信号采用批处理方式,可在短时间内提供天线扫描区域角分辨率得到很大改善的大面积图像,因此在偏航修正、战场侦察、提高武器投入精度等领域有广泛的应用^[1,2]。

由于要对回波信号进行频率分析,DBS 成像处理运算量很大。以往的计算机技术在运算速度、精度、体积、功耗等诸方面与实时、实用成像要求相差甚远。随着 DSP 技术的飞速发展,用通用 DSP 系统完成实时成像处理已经成为现实。本文介绍了 DBS 算法基于通用 DSP 的实现,在保证精度的前提下对算法进行了一定的工程化处理,显著降低了处理时间。

1 DBS 成像原理

DBS 成像原理基于多普勒分辨理论^[1,2]。假设载体与波束照射区域的几何关系如图 1 所示,其中 \vec{AP} 为载体航迹, R_0 为 $t=0$ 时载体与目标的斜距, $R(t)$ 为载体与目标瞬时斜距,则

$$R(t) = [(v_x t - R_0 \sin \gamma \sin \theta)^2 + (v_y t - R_0 \sin \gamma \cos \theta)^2 + (H + v_z t)^2]^{1/2}$$

在 $t=0$ 处泰勒展开,并忽略高次项,有

$$R(t) = R_0 - (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma) t + \frac{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma)^2}{2R_0} t^2$$

令 $\phi(t)$ 为 B 点到雷达载体回波信号的相位随时间变化的函数,则有

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [\chi(R(t_0) - R(t))] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [\chi(v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma) t] \end{aligned}$$

* 收稿日期 2000-04-10
作者简介:何峰(1976-)男,硕士生。

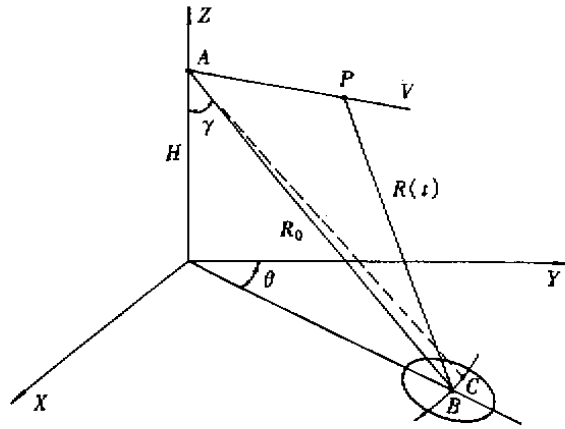


图1 载体与目标几何关系

Fig.1 Geometrical relationship between carrier and target

$$- \frac{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma)^2}{2R_0} t^2]$$

设 $f(t)$ 为天线扫描点的瞬时多普勒频率, 则有

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \frac{2}{\lambda} \cdot (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma) - \\ &\quad - \frac{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma)^2}{\lambda R_0} \cdot 2t \end{aligned}$$

多普勒频率为时间的一次函数, 具有线性调频的特点。在 t 很小时可近似为

$$f(t) = \frac{2}{\lambda} \cdot (v_x \sin \gamma \sin \theta + v_y \sin \gamma \cos \theta - v_z \cos \gamma) \quad (1)$$

当雷达波束照射区域同一距离环带上出现两个目标 B 和 C (两目标方位角相差 $\Delta\theta$) 时, 两目标的频差为

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_B - f_C \\ &= \frac{2v_x}{\lambda} \cdot [\sin \theta - \sin(\theta + \Delta\theta)] \sin \gamma + \frac{2v_y}{\lambda} [\cos \theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \sin \gamma \end{aligned}$$

若 $\Delta\theta$ 很小 Δf 可近似为

$$\Delta f = \frac{2}{\lambda} \cdot (v_y \sin \theta - v_x \cos \theta) \cdot \sin \gamma \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

由此可见, 同一距离环带内两点, 由于方位角相差 $\Delta\theta$ 而造成成比例的多普勒频率差。如果在多普勒频率范围内设置一组窄带滤波器, 就可以通过区分频率的方式使同一距离环带内不同方位的目标得以区分, 从而有效改善方位分辨率。

2 DBS 成像算法的工程化处理

2.1 TMS320C6201 芯片简介

TMS320C6201 是 TI 公司最新推出的 TMS320C6000 系列中的一款定点 DSP 芯片, 可广泛应用于图像处理、虚拟现实、雷达、语音处理、通信等领域。该芯片进一步发展了超长指令字 (VLIW) 结构和多流水线技术, 在每条长达 256 bit 的指令字中规定了多条流水线、多个处理单元的并行操作, 通过增加片内指令级并行度获得高性能^[3,4]。CPU 内核具有两个乘法器、6 个算术逻辑单元, 共享 32 个 32 位通用寄存

器,各功能单元可并发工作,5 ns 指令周期,峰值处理速度达 1600 MIPS。存储器及外围包括 64 Kbyte 片内程序存储器,64 Kbyte 片内数据存储器;多通道 DMA 控制器,具有 4 个独立的可编程通道和一个辅助通道;16 位 HPI 接口,供主设备访问 TMS320C6201 的全部存储空间和外设控制寄存器;32 位外部存储器接口(EMIF),可方便、无粘合地与多种类型的存储器件连接;32 位定时器;多通道串口(McBSP)等。

2.2 DBS 算法基于 TMS320C6201 的工程化处理

通用 DSP 芯片一般具有快速执行加法、乘法、乘加指令的特点,在数字信号处理方面,与一般的微处理器相比有很大的优越性。但在非线性运算、除法运算上仍需耗费大量处理时间,如果算法中含有大量此类运算,直接计算一般难以达到实时要求。另外,存储 I/O 操作相对耗时加大,必须予以充分考虑。

利用数字技术实现 DBS 成像的处理过程如图 2 所示。双路 A/D 的输入为 I、Q 两路模拟视频信号。不同时刻探测脉冲的回波经 A/D 采样后顺序存入缓存器。当回波个数达到一次批处理所要求的个数时,回波数据从缓存器一次被读入 DSP 芯片内存进行处理。

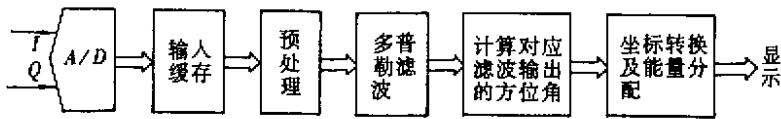


图 2 DBS 成像数字处理框图

Fig.2 flow chart of DBS processing

(1) 预处理:预处理过程中需对回波数据进行重排,相当于矩阵转置运算。如果通过执行指令完成,则会占用一定的处理时间。实际上,这一工作可在回波数据从缓存器读入内存的同时完成。有两种方法,第一种是在硬件上将 DSP 的地址线与缓存器地址线错位连接,局限性是硬件一旦确定,参数便不能更改,缺少灵活性,而且不适用于 FIFO 这一类缓存器。另一种方法是利用 TMS320C6201 的 DMA 通道灵活的可编程特性^[5]。TMS320C6201 的 DMA 控制器支持多帧传送(multiframe transfer),源、目的地址的帧内、帧间步进量可分别进行编程。利用这些特性可方便地完成转置这类操作,且灵活、易于修改。

(2) 多普勒滤波:多普勒滤波通常由 FFT 运算来实现,因为 FFT 运算等效为一个窄带滤波器组,幅度特性具有 $\sin x/x$ 的形式。这种频率特性具有较高的旁瓣,可通过选取一定的加权函数抑制旁瓣,改善滤波特性。

为提高效率,可针对 TMS320C6201 结构选取与之适应的 FFT 运算结构。比如,由于 TMS320C6201 内部具有 32 个 32 位通用寄存器,如果做 16 点 FFT 运算,则可用 16 个寄存器存贮 16 点数据,8 个寄存器存贮 8 个旋转因子,余下的作为临时寄存器。这样,16 点、4 级的蝶式运算可在 CPU 内核完成而无需相对开销很大的存储 I/O 操作。如果 FFT 运算点数相对较少,一个简单而对效率有很大提高的方案就是将 N 点 FFT 先分解至 N/16 个 16 点 FFT 运算,再分别在 CPU 内核完成。如何在通用 DSP 芯片上实现高效 FFT 运算是一个值得研究的问题,它与 FFT 点数、精度要求以及芯片内部结构密切相关,作者将另文讨论。

(3) 输出处理:回波信号经波束锐化滤波器处理得到对应于雷达坐标分割的分辨单元的散射特性,在实际空间成像时,需通过输出处理将雷达空间坐标上的散射特性变换到实际空间。

输出处理过程中需计算各子滤波器中心频率对应的方位角 θ ,亦即各子波束中心方位角。多普勒频率与方位角关系由式(1)确定。将各子滤波器中心频率 f 代入式(1)即可求出对应的方位角 θ 。计算过程中需完成大量非线性运算以及除法。虽可方便地调用库函数精确计算,但计算量过大而难以在实时系统中实现。通常可牺牲一定的精度,利用查表法完成非线性运算。但对该式而言,查表次数频繁,加之除法运算,仍需可观的运行时间。由于该运算处于整个算法流程循环的最内层,计算次数频繁,须作进一步处理以提高实时性能。

观察式(2)可发现,当水平速度向量与波束中心方位线夹角不为零(即 $v_y \sin \theta - v_x \cos \theta \neq 0$)且 θ 变化范围不大时, θ 与 f 近似成线性关系。因此可以预见,如果用插值多项式代替原式,可获得很好的近似

结果。

表 1 列出了在一组典型参数下不同阶数牛顿插值多项式近似式(1)所产生的相对误差(相对于平均锐化波束角)。可见,使用插值多项式近似可获得很高的精度。因此,可先根据精度要求确定插值多项式阶数,再利用牛顿插值公式计算出插值多项式各阶系数,然后求各子波束中心波束角时,只需做有限次的乘法和加法运算。计算插值多项式系数时仍需查表计算式(1),但由于其运算量分散到每个子滤波器而变得很小。在某些实际系统中参数能预先确定,则多项式系数可事先算好而不占用实时处理时间。

表 1 插值多项式近似精度

Tab.1 Precision of interpolated polynomial

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶
相对误差	0.28521	0.04421	0.00279	0.00043

在均使用片内存贮器的相同条件下,分别用调用库函数的单精度浮点运算、查表定点运算、不同阶插值多项式定点运算等计算方式编程,并在 TMS320C6201 芯片上运行,通过测试工具对指令执行时间进行了测试,并计算平均相对误差(以单精度浮点运算结果为准确值),结果见表 2。其中多项式插值计算包括了多项式系数的计算时间。对其结果分析如下:调用库函数的单精度浮点运算所需时间过长而不可能在实时成像中采用;查表定点运算不可避免的对精度有所降低(精度高低与表的长度直接相关),但运算时间降低了两个数量级,插值多项式近似法可达到逼近查表计算的精度,而在运算时间上又有大的减少,与其它方法比较具有明显的优越性。

表 2 各种算法运算量及精度比较

Tab.2 Comparison of various methods

计算方式	调用库函数、 单精度浮点	查表、定点	二阶插值、定点	三阶插值、定点	四阶插值、定点
运行时间(ns)	28140	305.21	52.45	83.1	120.4
相对误差	0	0.0464	0.0627	0.0496	0.0466

3 性能分析与成像结果

DBS 成像算法的运算量主要集中在 FFT 运算、方位角计算以及像表能量分配上。经工程化处理,FFT 运算时间降低近一半,方位角计算时间降低了三分之一以上。在精度上,虽进行了一定的近似处理,但仍保证了较高精度。FFT 采用定点运算,32 位的寄存器长度可以满足成像对精度的要求,计算像素方位角时,由于相对于平均锐化波束角的误差小于 0.05,像素之间的相对位置误差不会超过 0.1 个角度分辨单元。

改进后的算法经编程实现,在以 TMS320C6201 为核心的 DSP 成像系统上运行,具有处理速度快、精度高的特点。将地面线状目标回波数据经 D/A 变换成模拟视频信号后输入成像系统,实时成像结果如图 3 所示。图 4 为相同的数据经双精度运算得到的事后处理结果。图 5 为一仿真点阵的视频信号,经成像系统实时处理后的输出图像如图 6 所示,同一方位向上的点得到了很好的区分。我们还对 DBS 原始数据进行了实时成像处理,也得到了比较理想的效果。

4 小结

本文研究了应用通用 DSP 实现 DBS 成像算法,在保证精度的前提下对算法进行了一定工程化处理,显著降低了处理时间,实验证明具有处理速度快、精度高的特点。

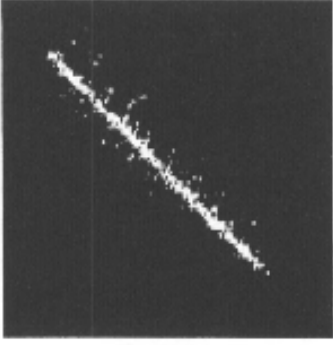


图3 实时成像结果

Fig.3 Real-time processing result

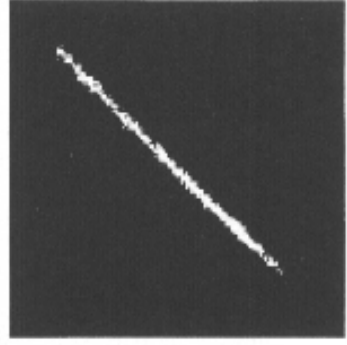


图4 事后处理结果

Fig.4 After-the-event processing result

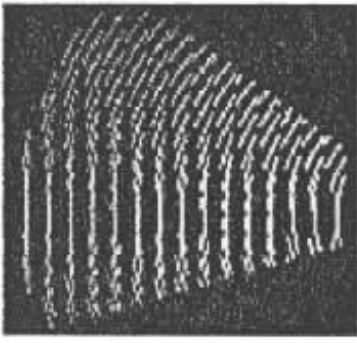


图5 点阵视频信号

Fig.5 video image of lattice

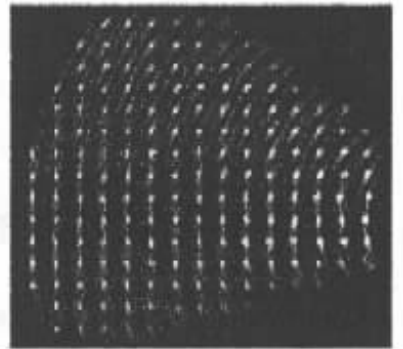


图6 点阵 DBS 图象

Fig.6 DBS image of lattice

参考文献：

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [2] 张直中. 微波成像术[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 苏涛, 吴顺君, 廖晓群. 高性能数字信号处理器与高速实时信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [4] 龙腾, 何佩琨, 曾涛, 李方慧. 高速实时数字信号处理器并行性研究[M]. 信号处理, Vol.15, No.4, 1999.
- [5] TMS320C6201/C6701 Peripheral[M], TEXAS INSTRUMENTS Inc, 1998.

