

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.015

引用格式:张阳,高仲辉.基于国产 DSP“魂芯一号”的天气雷达信号处理器设计[J].电讯技术,2014,54(1):79-83.[ZHANG Yang,GAO Zhong-hui. Design of a Weather Radar Signal Processor Based on Domestic DSP HunXin-1 Chip[J].Telecommunication Engineering,2014,54(1):79-83.]

基于国产 DSP“魂芯一号”的天气雷达信号处理器设计*

张 阳^{1,**},高仲辉^{1,2}

(1. 成都信息工程学院 电子工程学院,成都 610225;2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所,合肥 230031)

摘 要:中国电子科技集团公司第三十八研究所研发了首款国产高端数字信号处理芯片“魂芯一号”(BW DSP100),为了打破国外高端芯片的垄断,该国产信号处理器在天气雷达中的应用具有重要意义。在自主开发的软件环境中,通过傅里叶变换法、脉冲对法和批处理方法等 3 种处理模式实现了天气雷达回波参数估计的处理过程,硬件上利用了“魂芯一号”,它具有 4 个核并行处理,能高效实时完成 3 种主要处理模式。论证结果表明,“魂芯一号”在精度和速度上均优于国外高端信号处理器。国产信号处理器应用于天气雷达上将突出其优越的实用价值。

关键词:天气雷达;数字信号处理;魂芯一号;回波参数估计

中图分类号:TN957.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0079-05

Design of a Weather Radar Signal Processor Based on Domestic DSP HunXin-1 Chip

ZHANG Yang¹,GAO Zhong-hui^{1,2}

(1. Department of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230031, China)

Abstract: The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC) has developed the first domestic high-end DSP named HunXin-1 Chip (BW DSP100). In order to break the monopoly of foreign high-end chips, the application of the domestic digital signal processor in weather radars is significant. With fast Fourier transform (FFT) method, Pulse Part Processing (PPP) method and batch method, the weather radar echo parameters estimation is accomplished based on the self-developed software environment. The HunXin-1 Chip with four cores of parallel processing ability is used in the hardware to complete three main processing modes efficiently. And it is demonstrated that HunXin-1 Chip is better than foreign high-end signal processor in speed and accuracy. Application of domestic signal processor in weather radars will highlight its superior practical value.

Key words: weather radar; DSP; BW DSP100 (HunXin-1 Chip); echo parameter estimation

数字信号处理器是气象雷达的重要组成部分,可利用各种算法求得气象目标信息。由于气象雷达信号处理系统处理的数据量大,运算复杂,且又要满足实时处理的要求,因此需采用高速 DSP (Digital Signal Processor) 芯片。当今主流的 DSP 芯片均来自国外,如目前的天气雷达信号处理系统主要采用

了 ADI (Analog Devices) 的 Tiger SHARC 系列、TI (Texas Instruments) 的 TMS320Cxx 系列等国外的芯片。“魂芯一号”(BW DSP100)将代替 ADI-TS101 芯片应用于民品天气雷达信号处理系统中,解决高端核心芯片依靠进口的现状。

本文首先介绍了该芯片的主要性能,其次介绍

* 收稿日期:2013-10-08;修回日期:2013-12-16 Received date:2013-10-08;Revised date:2013-12-16

** 通讯作者:zhangmartinyang@163.com Corresponding author:zhangmartinyang@163.com

了该信号处理器的硬件结构,该结构采用了经典的 DSP 和 FPGA (Field Programmable Gate Array) 相搭配。本文由 DSP 实现了气象雷达信号处理的 3 种主要处理模式,由 FPGA 的 Signal-Tap 分别抓取 BWDSP100 和国外芯片 ADI-TS101 在 3 种主要处理模式下的运行时间,并进行了对比分析。

1 硬件平台

1.1 芯片介绍

“魂芯一号”是 32 b 静态超标量处理器,它采用 16 发射、单指令流、多数据流架构 (SIMD),指令总线宽度 512 b,内部数据总线采用非对称全双工总线,读总线 512 b,写总线 256 b,共有 11 级流水。处理器的工作主频为 500 MHz,内部包含 4 个基本执行宏(简称宏),每个执行宏由 8 个算术逻辑单元 (ALU)、4 个乘法器 (MUL)、2 个移位器 (SHI)、1 个超算器 (SPU) 以及 1 个通用寄存器组成。运算部件支持 16 位/32 位定、32 位浮点,16 位/32 位定点复数、32 位浮点复数等数据格式,采用 VLIW (Very Long Instruction Word) 架构,具有强大的并行处理能力,能较好地满足高速实时信号处理的应用要求,是一款性能优越的国产高性能数字信号处理器^[1-2]。

1.2 系统架构

本系统硬件结构框图如图 1 所示,由两片博微 BWDSP100 芯片同 FPGA 一起构成一个基本的信号处理系统。DSP 芯片通过并口与 FLASH 相连实现程序和数据的自加载,通过 DSP 自身 Link 口在 DSP 片间、DSP 与 FPGA 间、板间实现数据快速交换。DSP 的主要配制信息(如加载模式调试模式选择、锁相环旁路模式选择、锁相环倍频系数选择)通过拨码开关 S2 控制,DSP 的 JTAG 接口选择调试 2 片或某一片,通过拨码开关 S1 选择。DSP 通过外接的 Flash 固化程序,FPGA 通过 EPCS16 存储程序。由于 DSP 和 FPGA 有并口和链路口等数据通路,所以可以非常方便地进行通信,FPGA 不仅从 DSP 中读写数据,FPGA 作为接口逻辑,还要将外部数据导给 DSP,待 DSP 处理完成后,再将结果送出去。FPGA 的集成开发环境带有 Signal-Tap,通过它可以很方便地观察 DSP 并口或链路口上的数据和时序情况。FPGA 的 GPIO (General Purpose Input Output) 口连接了发光二极管,通过 LED 可以指示 DSP 内部的一些信息。

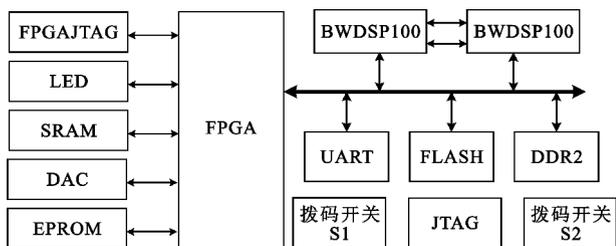


图 1 硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure diagram

2 算法及实现

天气雷达信号处理分系统对数字中频接收机送入的 I/Q 数据进行处理,从而得到天气目标回波信号的强度 Z、平均多普勒速度 V,以及谱宽 W 等的高精度估计,主要流程如图 2 所示。

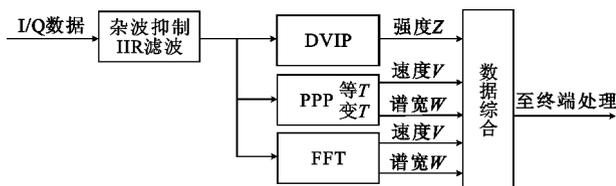


图 2 信号处理流程图

Fig. 2 DSP flow chart

此系统中所用的算法主要有地物杂波抑制 (IIR 滤波)、脉冲对 (Pulse Part Processing, PPP)、傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)、数字视频积分 (Digital Video Integral Process, DVIP)、参差重复频率 (Alternate Pulse Repetition Frequency, APRF), 以及批处理去模糊。算法在 BWDSP100 的具体实现中分为 3 种处理方式: FFT 处理方式、PPP 处理方式、批处理方式 (主要是退距离模糊), 当出现速度模糊时, 采用参差重频退速度模糊。

2.1 FFT 处理模式

FFT 是频域的处理模式,其处理流程如图 3 所示。

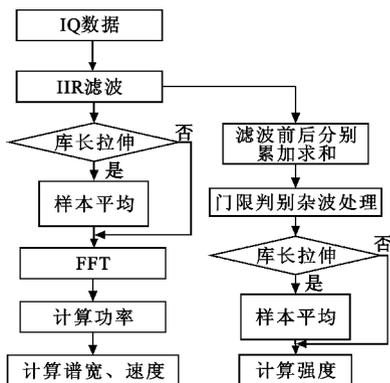


图 3 FFT 模式处理流程图

Fig. 3 FFT mode process flow chart

当终端选择 FFT 模式处理时, I/Q 数据首先经过三阶零点和三阶极点的 IIR 滤波器, 进行地物杂波滤除。其传递函数 $H(Z)$ 如式(1):

$$H(Z) = \frac{(Z-1)(Z^2-K_1Z+1)}{(Z-K_4)(Z^2-K_2Z+K_3)} \quad (1)$$

其中, K_1, K_2, K_3, K_4 为滤波系数, 通过仿真实验得到。

库长拉伸主要是由终端根据需要对 3 个距离库长 150 m、300 m、450 m 进行选择。

FFT 模式中的关键环节是进行 FFT 谱处理, 设采样后时域上的回波信号为 $x(n)$, 则其谱密度函数为

$$\hat{S}(k) = \left| \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} x(n) \exp(-j2\pi nk/N) \right|^2 \quad (2)$$

其中, N 为采样点数。

多普勒频率和谱宽可以直接利用信号功率谱的一阶矩和二阶中心矩定义进行估计, 即有

$$\hat{f}_d = \frac{1}{NTs \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{S}(k)} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} k \hat{S}(k) \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_f^2 = \frac{1}{(NTs)^2 \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{S}(k)} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} (k - \hat{f}_d Ts N)^2 \hat{S}(k) \quad (4)$$

其中, Ts 为脉冲重复周期。

在多普勒频率和谱宽计算中由于模周期循环各个频率值并不同时作模相加或模相减运算, 这样所得的频率值和方差将偏离实际值。为了减少这种偏差, 首先找到最大值, 以最大值为中心, 分别向上向下扩展 $N/2$ 个单元, 如果一端的单元数不够, 则将另一端多余的单元按模 N 的关系填充。

在 I/Q 数据经过 IIR 滤波器后, 与此同时通过 DVIP 视频积分计算回波强度 Z :

$$Z = \lg \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (I_i^2 + Q_i^2) \quad (5)$$

2.2 PPP 处理模式

PPP 处理是时域处理方式, 处理流程如图 4 所示。当终端选择 PPP 处理, 利用 PPP 计算谱宽和速度时, 根据气象回波的自相关函数而推导出速度和谱宽如下:

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi T} \arctan \frac{\text{Im}[R(T)]}{\text{Re}[R(T)]} \quad (6)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 T^2} \left[1 - \frac{|R(T)|}{R(0)} \right] \quad (7)$$

其中, T 为脉冲重复周期, $R(T)$ 为延时为 T 的自相关函数, $R(0)$ 为延时为零的自相关函数。

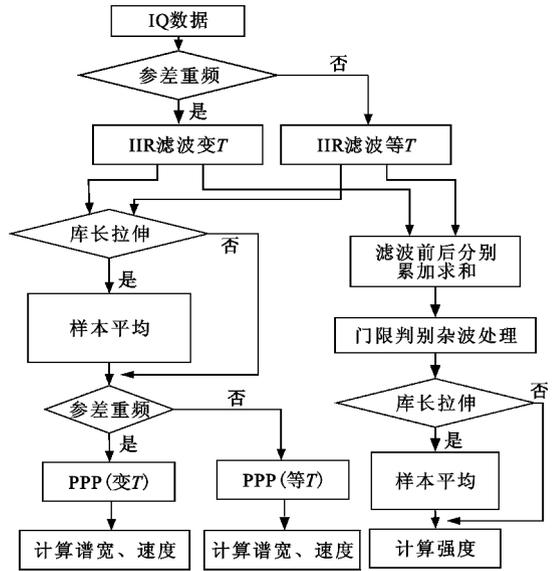


图 4 PPP 模式处理流程图

Fig. 4 PPP mode process flow chart

PPP 处理模式的重点在于采用了单频和参差重复频率^[3]两种处理模式。当所得速度出现模糊时, 在终端选择参差重频, 进行退速度模糊处理。其中 IIR 滤波分为等 T 和变 T 两个部分, 由于 IIR 滤波是脉间处理, 选择参差重频时, 即雷达发射 PRT (脉冲重复周期) 按 T_1, T_2 交替变换的脉冲序列 ($T_1 < T_2$), 为了保持相位一致, 长脉冲和短脉冲的滤波要分开滤波, 采用变 T 的方式。美国的 RVP5、RVP6、RVP7 天气雷达信号处理系统采用的也是 IIR 滤波, 这种方式的优点在于计算量少, 适合实时处理。雷达在双重复频率工作模式时, 分别求出延时 T_1 脉冲对的相关函数 $R(T_1)$ 和延时 T_2 脉冲对的相关函数 $R(T_2)$, 然后根据 $R(T_1), R(T_2)$ 的相位差估计多普勒速度:

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi(T_2-T_1)} \arctan [R(T_1)R(T_2)^*] \quad (8)$$

式中, λ 为发射脉冲波长, $\arctan [R(T_1)R(T_2)^*]$ 的取值范围在 $[-\pi, \pi]$ 之间。因此, 这种参差方案的最大不模糊速度为

$$V_{rmax} = \frac{\lambda}{4\pi(T_2-T_1)} \quad (9)$$

在实际 PPP 处理实现过程中, 把相邻的自相关函数相加, 求平均来代替推导所得的 $R(T)$ 。PPP 方法的一大特点是: 一个距离单元中只有两个相邻的脉冲也可求得多普勒速度。

2.3 批处理模式

退距离模糊的方法有批处理^[4]和相位编码^[5]等。批处理流程如图 5 所示, 该过程实现相对简单,

关键技术在于采用 40 个发射脉冲为 1 组,分成前 8 个脉冲和后 32 个脉冲。前 8 个长 PRT,由于探测距离远,可以消除距离模糊,故通过 DVIP 视频积分获得可靠的强度信息;对于后 32 个短的 PRT,不会出现速度模糊的现象,并且选择参差重频时,解速度模糊的效果更好,但是可能存在距离模糊问题,该回波可能叠加了二次回波甚至更高次的回波,所以我们必须对其速度场进行判断。在没有较强的二次回波存在时,给出一次回波的强度、速度和谱宽;当存在较强的二次回波时,给出一次回波的强度,同时用特殊标记表明此时的速度和谱宽为不可信。

图 6 ADI-TS101/ BWDSP100 处理结果
Fig. 6 ADI-TS101/ BWDSP100 process result

3.2 运行时间对比

3 种天气雷达的信号处理模式的运行时间均在常温的测试环境中,利用仿真线直接在两个信号处理卡板上抓取结果。

图 7 是两种芯片在 FFT 模式下通过 FPGA 自带的 Signal-Tap 所抓取的结果。

图 7 FFT 模式处理时间
Fig. 7 FFT mode process time

ADI-TS101 和 BWDSP100 分别采用 FLAG3 引脚和 GPIO4 引脚,均在 1 250 K 时钟下采样,采样深度均为 16 K。FFT 模式中,前者一个周期的翻转时间显然大于后者一个周期的翻转时间,BWDSP100 运行速度快于 ADI-TS101。此处的处理采用的是 64 点处理,256 个距离库,在一个径向上处理数据为 32 K。这里抓取的时间仅为一个径向,在天气雷达实时处理时,探测距离 150 km,一个径向有 1 000 个距离库,处理一个 PPI(平面位置显示)的时间、速度将绝对优于 ADI-TS101。

图 8 是两种芯片在 PPP 模式下通过 FPGA 所抓取的结果。此处的处理采用的是 32 点处理,1 024 个距离库,在一个径向上处理数据为 64 K。上半部分抓取的时间对比是重频处理模式,下半部分是单频处理模式。

图 8 PPP 模式处理时间
Fig. 8 PPP mode process time

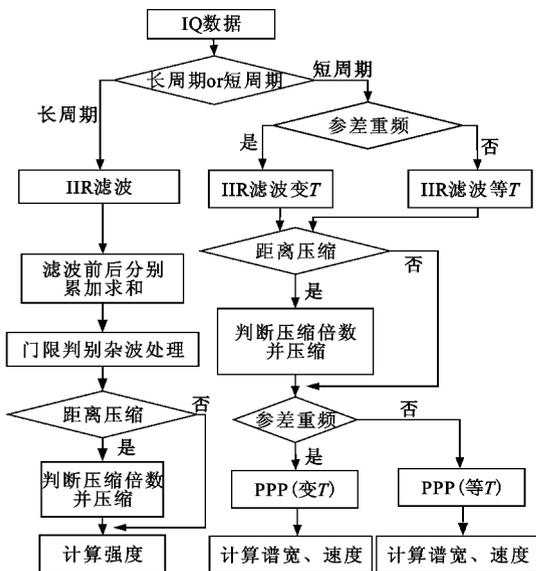


图 5 批处理模式流程图
Fig. 5 Batch mode process flow chart

3 性能比较

3.1 结果对比

ADI DSP 的软件环境是 VisualDSP + , BWDSP100 也有完全自主知识产权的软件开发环境 ECS(Efficient Coding Studio)^[1]。两种芯片通过软件编程和硬件的在线调试,得出气象目标回波的所需信息。图 6 给出了 FFT 模式下所得的强度(Power)、速度(Speed)和谱宽(Width)信息,是两种芯片分别在 VisualDSP++和 ECS 软件环境中所跑出的结果。在图 6 中前 3 个值分别是 ADI-TS101 的强度、速度和谱宽,后面 3 个值分别是 BWDSP100 的强度、速度和谱宽。通过图 6 的结果可以看出 BWDSP100 的精度更高,完全具有实用性。

图 9 是两种芯片在批处理模式下通过 FPGA 所抓取的结果。此处的处理采用的是 40 点处理,256 个距离库,在一个径向上处理数据为 20 K。上半部分抓取的时间对比是重频处理模式,下半部分是单频处理模式。

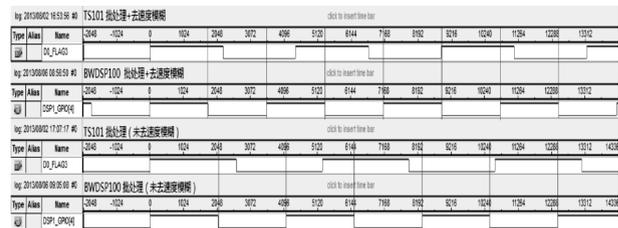


图 9 批处理模式时间
Fig. 9 Batch mode process time

从图 7~9 中汇总出两者芯片的单周期运行时间如表 1 所示,单位为 ms。

表 1 处理时间汇总
Table 1 Process time summary

处理方式	单周期运行时间/ms	
	TS101	BW100
FFT 处理	6.10	5.44
PPP 处理	2.95	2.39
PPP 处理(参差重频)	2.53	2.03
批处理	2.11	1.66
批处理(参差重频)	1.78	1.43

BWDSP100 包含 $x, y, z, t, 4$ 个基本执行宏,而 ADI-TS101 只有 x, y 2 个基本执行宏,在进行某些运算时,前者是后者 2 倍的速度。BWDSP100 内部存储容量为 28 Mb,而 ADI-TS101 内部存储容量仅为 6 Mb,例如在进行 64 点 FFT 模式处理时,需要从 RAM 中把数据存储到内部存储器中,前者的容量较大可以一次性存入数据,后者的容量较小,需要分批存入进行计算,这样增加了程序的复杂性,增多了程序的运行时间。

BWDSP100 有专门的模 8 寻址方式,是一种为适应矩阵寻址设计的寻址方式,可以较好地实现从阵列存储的不同存储单元中快速读出数据,在 FFT、矩阵等运算中,执行速度上有很大的优势。当单独做 FFT 运算处理点数较大时,其速度可以是 ADI-TS101 的 10 倍以上。这里的 FFT 只作了 64 点处理,速度性能还没有突显出来,并且所有程序只是实现了天气雷达信号处理的功能,程序上没有进行优化,故此芯片在速度上还有很大的提升空间。

4 结束语

本文介绍了“魂芯一号”在多普勒天气雷达中的应用。在天气雷达信号处理中批处理模式虽然可

以退距离模糊,但是当有二次回波存在时弱回波难以恢复。目前,天气雷达用的较多的是相位编码方法来恢复弱回波,今后将深入研究恢复弱回波的方法。本文的研究结果表明,“魂芯一号”在精度和速度上有很大的优势,这对于实现复杂的雷达信号处理算法是至关重要的。此芯片的应用对相控阵雷达、毫米波雷达、机载雷达以及航管雷达的应用和发展也具有重要意义。

参考文献:

- [1] 余锋林,刘小明,朱艳,等. BWDSP100 集成开发环境设计与实现[J]. 中国集成电路,2012,157(6):25-29. YU Feng-lin, LIU Xiao-ming, ZHU Yan, et al. Design and implementation of the software integrated development environment for BWDSP100 [J]. China Integrated Circuit, 2012,157(6):25-29. (in Chinese)
- [2] 穆文争,史鸿声. 国产高性能通用数字信号处理器的 DEMO 板设计[J]. 火控雷达技术,2012,41(3):33-36. MU Wen-zheng, SHI Hong-sheng. DEMO Board Design for High-Performance General-Purpose Digital Signal Processor [J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(3):33-36. (in Chinese)
- [3] Banjanin Z B, Zrnice D S. Clutter Rejection for Doppler Weather Radars which Use Staggered Pulses [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1991, 29(4): 610-620.
- [4] 周红平,沙雪松,张光峰. 批次处理解决气象雷达距离模糊[J]. 现代雷达,2006,28(11):20-21. ZHOU Hong-ping, SHA Xue-song, ZHANG Guang-feng. Resolving range ambiguity of weather radar using batch processing method [J]. Modern Radar, 2006, 28(11):20-21. (in Chinese)
- [5] Sachidananda M, Zrnice D S. Systematic phase codes for resolving range overlaid signals in a doppler weather radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(10):1351-1363.

作者简介:



张阳(1985—),男,安徽马鞍山人,成都信息工程学院硕士生,主要研究方向为气象雷达信号处理;

ZHANG Yang was born in Ma'anshan, Anhui Province, in 1985. He is now a graduate student. His research direction is weather radar signal processing.

Email: zhangmartinyang@163.com

高仲辉(1962—),男,安徽合肥人,1983 年于成都电讯工程学院获学士学位,现为研究员、总工程师,主要研究方向为气象雷达、航管雷达的总体研制工作。

GAO Zhong-hui was born in Hefei, Anhui Province, in 1962. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1983. He is now a senior engineer of professor and also the Chief Engineer. His research concerns system design of weather radar and ATC radar.