

弹载 SAR 实时信号处理研究

贺知明 朱江 周波
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文针对SAR成像方法进行了理论分析,研究了用于弹载SAR的时域子孔径算法实现,给出了算法的流程,最后根据实际系统需要,设计了采用高性能的DSP芯片TS203的信号处理系统并用于实际的数字信号处理并给出了该系统的成像处理结果。结果表明采用时域子孔径算法和该文所设计的硬件平台,能够正确对弹载SAR回波进行实时成像计算。

关键词: SAR; 时域子孔径; DSP

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-1011-03

Research on Real-Time Signal Processing of the Missile-Borne SAR

He Zhi-ming Zhu Jiang Zhou Bo
(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, the theoretical analyses and simulations of the SAR imaging processing are firstly made, the time-domain sub-aperture algorithm which is used to implement missile-borne SAR, are researched and the whole flow of the algorithm are given. Finally, thinking over the need of the practice system, a hardware system using the high performance DSP chip named TS203 to process digital signal practically are designed and the result of imaging are given. The result validates the efficiency of the time-domain sub-aperture algorithm and hardware platform.

Key words: SAR; Time-domain sub-aperture algorithm; DSP

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是20世纪70年代末期发展起来的先进雷达成像技术,能够全天候、全天时获得高分辨率图像,广泛应用于国民经济、军事及其它对地观测领域^[1, 2]。它通过回波信号的相干积累可获得距离向和方位向的二维高分辨率图像。作为SAR的一个分支的弹载SAR,其应用的公开报道并不多,见到较多报道的是美国洛拉公司的SAR导引头。这种SAR系统既可用于中段地形匹配,也可在导弹临近目标时提供具有较好分辨率的目标SAR图像,以便进行景象匹配,提高打击力度。美国、德国、俄罗斯等国也开展了先进SAR导引头的研制工作。近年来,国内一些研究所研制了弹载SAR系统,并成功地完成了试验。国内的一些高校也一直致力于这方面的研究,并取得了一批研究成果。弹载合成孔径雷达与传统的机载合成孔径雷达相比,具有飞行速度快,机动性大的特点,因此在进行成像处理时,必须选择适合弹载SAR运动特点的算法。近年来DSP技术迅猛发展,为实时处理和应用提供了广阔的空间。因此本文采用TS203完成了弹载SAR的实时信号处理。

2 弹载 SAR 算法分析

2.1 传统的 SAR 成像算法分析

最常用的SAR成像算法是采用方位预处理结合RD算法^[1, 2]来实现信号处理,其处理流程图1所示。A/D采样之后的数据先送入FPGA进行输入缓存和方位预叠加,从而降低数据率,使之达到能够被后端DSP实时处理的要求。经过方位预叠加的数据送入距离向处理模块进行距离维的压缩处理。处理完成的数据先进行转置存储,方位向处理模块从转置存储器中读出数据后,对数数据进行方位向处理。最后,对数据进行求模后输出。该算法的优点是算法比较成熟,且运算量小,易于实现实时处理,所以在机载SAR中得以广泛采用。但是该算法也有其局限性,因为方位预叠加实质

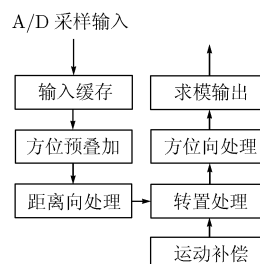


图1 系统处理流程图

上是方位向的数据先经过低通或带通滤波器进行滤波,然后再进行抽取。由于在整个处理过程中,滤波器的系数是固定不变的,因此就要求输入信号的频谱特性也大致恒定,所以要求飞行器的飞行行为匀速运动,且姿态平稳。而弹载 SAR 的运动特点是弹体运动速度快且变化剧烈,姿态的变化也很剧烈,天线的指向往往都不能严格指向正侧视方向,而是有一定的偏角,且偏角的角度也是随时变化的,导致输入信号的中心频率随时间变化很大,从而无法用恒定系数的滤波器进行滤波处理,自然采用方位预叠加来降低数据率的方法也就无法实现了。因此,必须采用其他的方法。

2.2 弹载 SAR 时域子孔径成像算法分析

弹载 SAR 由于弹体的飞行速度很高,在方位向必然产生很大的多普勒带宽,因此选取的脉冲重复频率也必然很高。如此高的数据率,要进行实时处理几乎是难以实现的,因此,必须设法降低处理的数据率,使之达到能够进行实时处理的要求。本文采用的时域子孔径方法就是可以降低数据率的方法之一。从减少数据量而言,子孔径时间越短越好。但是考虑到 SAR 图像方位分辨力要求,必须保证一定的子孔径时间。方位分辨力的计算公式为

$$\delta_a = v_a/B_a = v_a/(f_{dr} \cdot \Delta T_s) \quad (1)$$

其中 δ_a 为方位向分辨力, v_a 为导弹速度, B_a 为子孔径带宽, f_{dr} 为多普勒调频斜率, ΔT_s 为子孔径时间。由上式可知,为了获得较高的分辨力,则需要更长的子孔径时间,则所需处理的数据量也相应较大。在实际系统设计时,需要就分辨力和数据量进行折中考虑。

时域子孔径成像,其成像的基本原理和步骤如下:

首先对回波信号进行普通的距离向脉冲压缩,距离参考函数为

$$H(f) = \exp\left[j\pi\left(f^2/k_r\right)\right] \quad (2)$$

其中 f 为距离向的频率, k_r 为线性调频信号的调频斜率。输出信号的时域表达式为

$$S_r(t, \tau) = \text{sinc}\left[\pi B\left[\tau - \frac{2r(t)}{C}\right]\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi r(t)}{\lambda}\right] \quad (3)$$

其中 τ 为距离向时间,即快时间, t 为方位向时间,即慢时间, $r(t)$ 为瞬时斜距, B 为线性调频信号带宽。 $r(t)$ 的表达式为

$$r(t) = r_0 - \frac{\lambda f_{dc}}{2} t - \frac{\lambda f_{dr}}{4} t^2 \quad (4)$$

其中 r_0 为目标到雷达的垂直斜距, f_{dc} 为多普勒中心频率。

将 $r(t)$ 的表达式代入式(3)

$$S_r(t, \tau) = \text{sinc}\left[\pi B\left[\tau - \frac{2r_0}{C} + \frac{f_{dc}}{f_c} t + \frac{f_{dr}}{2f_c} t^2\right]\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi r_0}{\lambda}\right] \cdot \exp(j2\pi f_{dc} t) \cdot \exp(j\pi f_{dr} t^2) \quad (5)$$

其中 f_c 为载波频率。 sinc 函数中 t 的一次项代表距离走动,

必须对其进行校正。若令 $\text{sinc}\left[\pi B\left(\tau - 2r_0/C\right)\right]$ 的傅里叶变换为 $S_{r1}(f)$, 则 $\text{sinc}\left[\pi B\left(\tau - 2r_0/C + \left(f_{dc}/f_c\right)t + \left(f_{dr}/2f_c\right)t^2\right)\right]$ 对应的傅里叶变换为 $S_{r1}(f) \cdot \exp\left[j2\pi \frac{f_{dc}}{f_c} ft\right] \cdot \exp(-j\pi f_{dr} t^2)$, 为校正距离走动, 可将距离向频谱乘以一个补偿因子 Φ_1

$$\Phi_1 = \exp\left[-j2\pi \frac{f_{dc}}{f_c} ft\right] \quad (6)$$

多普勒中心频率 f_{dc} 必须从实测数据进行估计。从成像算法的实时性考虑, 不可能等所有子孔径的脉冲采样都到达后再估计 f_{dc} , 而是先根据惯导数据计算出 f_{dc} 的粗测值, 再采用杂波锁定的方法计算出精确值。

sinc 函数中的 t^2 项代表距离弯曲。在本系统中, 由于测绘带较小, 距离分辨率较低, 子孔径长度也不大, 成像区域内散射点的最大距离弯曲不会超过一个距离分辨单元, 距离弯曲的影响可以忽略。在式(4)中, 方位向处理时也必须对 f_{dc} 进行补偿, 否则可能使方位多普勒频率产生模糊, 导致最终的 SAR 图像出现折叠。方位多普勒中心频率补偿因子为

$$\Phi_2 = \exp(-j2\pi f_{dc} t) \quad (7)$$

$S_{r1}(t, \tau)$ 经过距离迁移校正和方位多普勒中心频率补偿后, 就完成了距离向处理的全部任务。

方位向处理很简单, 首先采用补偿因子 Φ_3 在时域进行去斜(Dechirp)

$$\Phi_3 = \exp(-j\pi f_{dr} t^2) \quad (8)$$

f_{dr} 也是从实测数据进行估计的, 最后对去斜后的数据在方位向进行傅里叶变换就能得到复图像输出。

综合上述步骤, 得到弹载 SAR 时域子孔径成像算法流程图如图 2 所示。

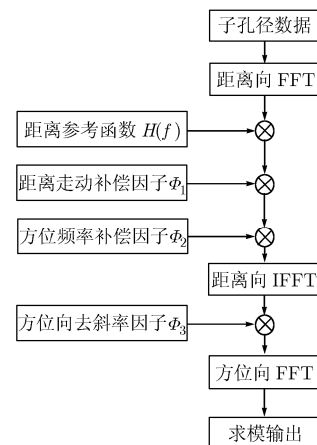


图2 弹载 SAR 时域子孔径成像算法流程图

3 弹载 SAR 信号处理的硬件实现

本文采用两片 ADI 公司的 TigerSHARC 系列 DSP 芯片, 型号为 TS203^[5], 核心频率为 500MHz, 一片用于距离向的处

理,另一片用于方位向的处理和图像处理,TS203的总线速率为 $50M \times 32bit/s$ 。弹载SAR信号处理硬件框图如图3所示。

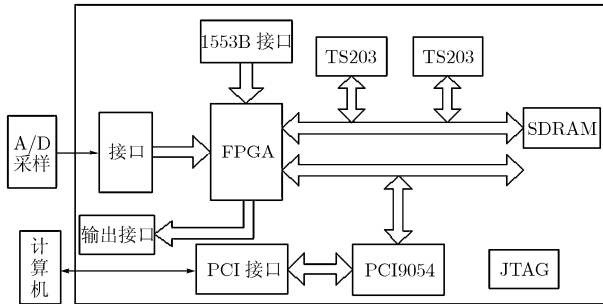


图3 弹载SAR信号处理硬件框图

两片DSP以共享总线的形式相连接^[6],并且连接到FPGA。总线的频率为50MHz,一个数据容量为256Mbit的SDRAM也挂载在总线上,作为数据转置存储之用。经A/D采样的数据先送至FPGA进行数据缓存处理,随后再送至第1片DSP进行距离向的压缩处理,完成距离向处理之后将数据送入SDRAM进行转置存储;第2片DSP则将转置存储完毕的数据从SDRAM读出,进行方位向的处理。处理完成的数据再经过FPGA的输出接口输出到下一级进行处理。此外,板上还设计了PCI接口用于与计算机连接,可实现原始数据的输入以及处理数据的输出,方便了数据的观测和程序的调试。

4 弹载SAR处理结果分析

本文以某合成孔径雷达为例,参数为:时宽 $T=5\mu s$,带宽 $B=85MHz$,波长 $\lambda=9mm$,脉冲重复频率 $f_r=20000Hz$,中心斜距 $R_0=22000m$,导弹速度 $v=4000m/s$ 。其中,图4为点目标的实际坐标位置,图5为经过处理之后的回波数据。根据成像结果灰度图可知,采用时域子孔径算法和本文所设计的硬件平台,能够正确对弹载SAR回波信号进行实时成像计算。



图4 点目标位置

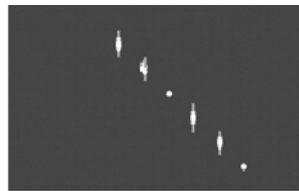


图5 经过处理板成像的灰度图

5 结束语

本文针对弹载SAR的特性,分析了时域子孔径算法,并采用该算法进行成像处理。随后介绍了弹载SAR系统的硬件实现方法,用高速DSP器件完成了弹载SAR的实时信号处理。目前,该硬件平台已用于实际的弹载SAR系统中,证明本文所述的软硬件方案均具有其可行性。

参考文献

- [1] 刘永坦等. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 36-51.
Liu Yong-tan, et al. Radar Imaging Technology [M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1999: 36-51.
- [2] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989: 227-232.
Zhang Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar Principal, System Analysis and Application [M]. Beijing: Science Press, 1989: 227-232.
- [3] 武昕伟, 朱兆达. 基于聚束照射SAR成像算法的条带SAR数据处理. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(5): 466-469.
Wu Xin-wei and Zhu Zhao-da. Stripmap SAR data processing based on spotlight SAR image formation algorithm. *Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002, 34(5): 466-469.
- [4] 孔德亮, 宋红军. 聚束式合成孔径雷达的条带式处理方法. 测试技术学报, 2004, 18(3): 223-227.
Kong De-liang and Song Hong-jun. Spotlight mode SAR signal process using stripmap technology. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18(3): 223-227.
- [5] Analog Device Cop. ADSP-TS201 Tiger SHARC Processor Hardware Reference, 2004.
- [6] Analog Device Cop. ADSP-TS20xS Tiger SHARC ® System Design Guidelines, 2005.

贺知明: 男, 1972年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理及雷达系统设计。
朱江: 男, 1980年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。
周波: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理与模拟器设计。