

◇ 研究报告 ◇

深水多波束测深系统脉冲压缩实时算法*

董 飞[†] 刘治宇 刘小刚 刘晓东

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 深水多波束测深系统是一种高效率、高精度和高分辨率的海洋调查勘测仪器。针对深水多波束测深系统中脉冲压缩运算量大的问题,提出了一种基于分组的脉冲压缩实时算法。该算法对需要进行脉冲压缩的波束进行分组,每个节拍只计算一组波束,可大幅减少深水多波束测深系统脉冲压缩的运算时间,节省了处理器资源。该算法已成功应用于某深水多波束测深系统,经多次海试证明,工作稳定可靠。

关键词 脉冲压缩,深水多波束测深系统,线性调频信号,实时算法

中图分类号: TB565 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2015)03-0216-04

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.03.005

Real-time pulse compression algorithm of deepwater multi-beam bathymetric sonar

DONG Fei LIU Zhiyu LIU Xiaogang LIU Xiaodong

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Deepwater multi-beam bathymetric sonar is a kind of high efficiency, high precision and high resolution ocean survey instrument. Considering large computation cost of pulse compression in deepwater multi-beam bathymetric sonar, a real-time pulse compression algorithm based on grouping was proposed. The algorithm divided beams, which need pulse compression, into groups. In each beat only one beam group was calculated. The algorithm can reduce much operation time of pulse compression and save processor resources. The algorithm has been applied in some deepwater multi-beam bathymetric sonar and proved stable and reliable in sea trial.

Key words Pulse compression, Deepwater multi-beam bathymetric sonar, Linear frequency modulation signal, Real-time algorithm

2014-04-23 收稿;2014-06-30 定稿

*国家 863 计划项目 (2007AA090901)

作者简介:董飞 (1983-),男,山西晋城人,助理研究员,硕士,研究方向:水声信号处理。

[†] 通讯作者 E-mail: dongfei_83@mail.ioa.ac.cn

1 引言

多波束测深系统是水声技术、计算机技术、导航定位技术和数字化传感器技术等多种技术的高度集成。其工作原理是通过换能器进行声波广角度定向发射、接收,通过各种传感器对各个波束测点的空间位置进行归算,从而获取与航向垂直的条带式高密度水深数据。多波束测深系统可在接收方向形成数百个接收波束,每个接收波束可以测出相应位置的深度,具有横向覆盖范围大、波束窄、效率高等优点,适用于海上工程施工区和重要航道的较大面积的精确测量,也可以用于精确测量航行障碍物的位置、深度^[1-5]。

在深水多波束测深系统中,由于边缘回波距离较长,信噪比较低,经常在边缘采用线性调频信号作为发射信号。通过加长线性调频信号的脉宽可增大发射信号的能量,通过对线性调频信号的回波进行脉冲压缩运算可提高回波的信噪比和空间分辨力。

深水多波束测深系统的实时运算有如下特点:采样率较高,每个节拍的快拍时间较短;运算量大,处理器资源有限;波束数目较多。而脉冲压缩计算又涉及到多次FFT运算,如果对每个波束直接进行脉冲压缩计算,运算量较大,不但对有限的处理器资源造成了浪费,还有可能无法满足实时性要求。

文献[6-7]中对高速脉冲压缩计算进行了一些研究,但一般是针对某种硬件平台的结构特点在计算层面进行的优化。本文针对多波束自身的特点,提出一种基于分组的脉冲压缩实时算法,极大地减少了运算量,节省了处理器资源。该算法已在ADSP TS201中实现,并在海上试验中得到了验证。

2 利用FFT算法实现脉冲压缩

脉冲压缩的实质为匹配滤波。匹配滤波器为最大信噪比准则的最优滤波器,在高斯白噪声的情况下使用。匹配滤波器的单位冲激响应为信号的镜像,即

$$h[n] = s[N - 1 - n], \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (1)$$

其中 $s[n]$ 为信号, $h[n]$ 为匹配滤波器的单位冲激响应, n 为采样点序号, N 为信号点数。

匹配滤波器的输出是在 $N - 1$ 时刻进行采样得

到的,即

$$y[N - 1] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n]x[n]. \quad (2)$$

匹配滤波器的计算是仿形相关运算,实际中可采用FFT进行快速运算,需分别扩展信号和数据长度为 $L = 2^\gamma$ (γ 为整数),其中 L 不小于信号和数据的长度之和。

3 深水多波束测深系统脉冲压缩实时算法

在深水多波束测深系统中,脉冲压缩前每个节拍的数据长度为 N ,需要将数据点数缓冲到 L 时再进行脉冲压缩计算,取脉冲压缩结果的前 N 个数据作为本节拍所需结果(见图1)。

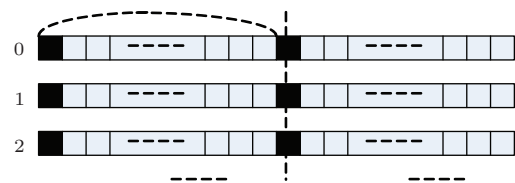


图1 直接脉冲压缩示意图

Fig. 1 Direct pulse compression

其中,每一行表示一个波束的脉冲压缩结果缓冲区,前面的序号表示波束号。黑色小方块为当前节拍的结果数据,长度为 N 。

上述为直接脉冲压缩计算方法。该方法需要在每个节拍对每个需要脉冲压缩的波束进行脉冲压缩计算。深水多波束测深系统中,需要脉冲压缩的波束数可能达到数百个之多,每次脉冲压缩又需要进行多次FFT运算,运算量非常庞大。针对运算量大的问题,本文提出一种基于分组的脉冲压缩实时算法。该算法的基本思想为将要进行脉冲压缩的波束进行分组,每个节拍只对其中一组波束进行计算,计算结果取前面的一段数据,可供多个节拍使用。各组之间交错取运算结果。该算法将多波束的脉冲压缩运算分散到多个节拍,有效缓解了运算实时性的压力。

假设有 K 个波束需要进行脉冲压缩运算。仿形信号脉宽为 τ ,对应的采样率为 F_s ,则仿形信号对应的点数为 $F_s\tau$ 。脉冲压缩模块输入端数据经前端处理后,每个节拍每个波束有 N 个数据。FFT长度为 L ,需要将数据缓冲到 L 点时再进行脉冲压缩计算。要求FFT长度满足两个条件:

- (1) $L = 2^\gamma \geq F_s \tau + N - 1$ (γ 为整数);
- (2) $\lfloor (L - F_s \tau + 1)/N \rfloor > 1$.

深水多波束测深系统中数据是持续不断的数据流,脉冲压缩计算可以看作是一个短的有限长序列与一个长序列的相关运算。根据重叠保留法的理论可知,每次脉冲压缩运算之后,前面的 $L - F_s \tau + 1$ 个点为准确的结果。由于每个节拍需要截取 N 个数据,故每次脉冲压缩的结果可供 $\lfloor (L - F_s \tau + 1)/N \rfloor$ 个节拍使用。本文提出的脉冲压缩实时算法基于这个理论进行分组。

假设分组的个数为 N_{sec} , N_{sec} 满足条件 $N_{\text{sec}} \leq \lfloor (L - F_s \tau + 1)/N \rfloor$ 。每组中的波束个数为 $\lfloor K/N_{\text{sec}} \rfloor$ 或 $\lceil K/N_{\text{sec}} \rceil$ 。

分组方式为:第0、 N_{sec} 、 $2N_{\text{sec}}$ 、 \dots 号波束为第一组,第1、 $N_{\text{sec}} + 1$ 、 $2N_{\text{sec}} + 1$ 、 \dots 号波束为第二组,以此类推。分组情况如图2所示。

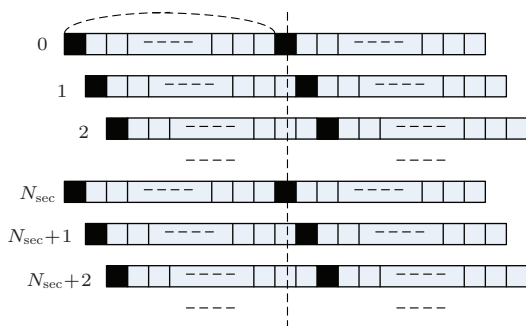


图2 脉冲压缩分组示意图

Fig. 2 Grouping of pulse compression

其中,每一行表示一个波束的脉冲压缩结果缓冲区,前面的序号表示波束号。每个方格表示一个节拍的结果数据,长度为 N 。

第一个节拍只对第一组波束进行脉冲压缩计算,取黑色小方块为当前节拍的结果数据,其余波束不进行计算,取与黑色小方块对齐的数据作为当前结果(见图2)。第二个节拍只对第二组波束进行脉冲压缩计算,以此类推。

该算法可以将脉冲压缩的运算时间减小到接近 $1/N_{\text{sec}}$,极大地减小了深水多波束测深系统中脉冲压缩实时运算的运算量,节省了运算时间。

4 海试结果处理

为了验证算法的有效性,本小节通过对海试数据进行处理,对直接脉冲压缩计算方法和基于分组

的脉冲压缩实时算法在运算结果和运算时间两方面进行了对比。

数据为某深水多波束测深系统在南海某海域的试验数据。实现平台为ADI公司的TigerSHARC DSP TS201。

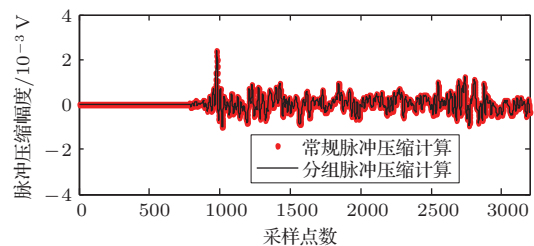
ADSP TS201是一款性能极高的静态超标量处理器,专对大的信号处理任务和通信结构进行了优化。该处理器将非常宽的存储器宽度和双运算模块(支持32位和40位浮点及8位、16位、32位和64位定点处理)组合在一起,建立了数字信号处理器性能的新标准。TigerSHARC静态超标量结构使DSP每周期能够执行多达4条指令,24个16位定点运算和6个浮点运算。该DSP可采用多片级联的方式实现深水多波束测深系统实时信号处理软件。

深水多波束测深系统线性调频信号的脉宽为200 ms,采样频率为1220 Hz。对应的需要进行脉冲压缩的波束数为120个。每个节拍的数据为8个,FFT长度为1024。取 N_{sec} 为8,16,32三种情况。对比情况如表1所示。

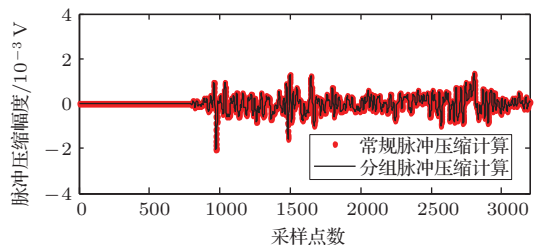
表1 脉冲压缩计算时间对比

Table 1 Computer time compare for pulse compression

N_{sec}	直接计算	8	16	32
时间 (ms)	8.64	1.15	0.64	0.36



(a) 脉冲压缩计算实部比较



(b) 脉冲压缩计算虚部比较

图3 N_{sec} 为32

Fig. 3 N_{sec} is 32

从图3可以看出,基于分组的脉冲压缩实时算法可以准确地进行脉冲压缩计算。从表1可以看出,

基于分组的脉冲压缩实时算法运算时间显著缩短,且分组多时,效果更明显。

图4为不同分组情况下运算时间的对比,横坐标为需要进行脉冲压缩的波束个数,纵坐标为脉冲压缩运算的时间占整个快拍时间的比例。可以看到,当不分组时,随着波束数的增长,脉冲压缩的运算很快占满了整个快拍时间,实时性得不到满足,而分组使得运算时间大幅缩短,不但实时性得到了满足,还可以节省出大量的处理器时间用于其它功能模块的运算。

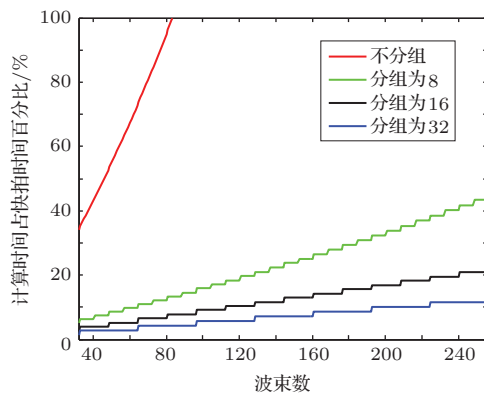


图4 计算时间与快拍时间之比随波束数的变化

Fig. 4 The ratio of computation time and beat time versus beam numbers

5 结论

本文提出了一种基于分组的脉冲压缩实时算法。该算法在FFT长度、仿形信号长度和每个节拍的数据长度满足一定约束关系的情况下,可作为一种通用算法用于不同处理器平台的多通道脉冲压缩计算,利用合理的分组提高运算效率。算法已成功应用于深水多波束测深系统,在保证运算正确的

前提下,极大地减少了运算量,节省了处理器资源,经多次海试证明,工作稳定可靠。

参 考 文 献

- [1] 李海森,周天,徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 73-80.
LI Haisen, ZHOU Tian, XU Chao. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(2): 73-80.
- [2] YOSHIDA Z, ASADA A, IKEDA Y, et al. High precision survey by the multi-beam sonar in the dam site[C]. OCEANS, 2004, 2: 1133-1138.
- [3] FAIRFIEL N, WETTERGREEN D. Active localization on the ocean floor with multibeam sonar[C]. OCEANS, 2008: 1-10.
- [4] 来向华,马建林,潘国富,等. 多波束测深技术在海底管道检测中的应用[J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 68-73.
LAI Xianghua, MA Jianlin, PAN Guofu, et al. Application of multi-beam echo sounding techniques in submarine pipeline inspection[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(3): 68-73.
- [5] 王闰成,卫国兵. 多波束探测技术的应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(5): 20-23.
WANG Runcheng, WEI Guobing. The application of multi-beam sounding technology[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(5): 20-23.
- [6] 李方慧,龙腾,毛二可. 基于TMS320C6201的并行高速实时数字脉冲压缩系统研究[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1272-1275.
LI Fanghui, LONG Teng, MAO Erke. Study of the high-speed real-time digital pulse compression system based on TMS320C6201[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1272-1275.
- [7] 夏小梅,王子旭. 用高速ADSP-TSxxx实现LFM信号的实时脉冲压缩[J]. 电子工程师, 2004, 30(4): 1-3.
XIA Xiaomei, WANG Zixu. Real-time pulse compression of LFM based on high-speed ADSP-TSxxx[J]. Electronic Engineer, 2004, 30(4): 1-3.