

An Efficient Implementation of Wideband Digital Signal down Converter Based on GPU*

CAO Lei*, YU Lihong, LI Zhi

(Electrical and Information Engineering Institute, Guangdong Baiyun University, Guangzhou 510450, China)

Abstract: With the widespread use of radio frequency resources, and a relatively narrow frequency range, for the management of the increasingly high demand, in order to ensure the reasonable control of the band, a converter structure has been put forward for broadband multi-channel digital signal, and to achieve efficient detection of a signal, to detect illegal users. The multiphase structure of a high efficient uniform DFT analysis filter bank is implemented on a powerful multi core parallel computing platform of GPU (Graphic Procession Unit). The implementation of this system is based on the computer graphics card. Under the Windows platform, all the software algorithms are adopted without additional hardware assistance. The wideband signal with bandwidth 2 MHz can output 1 000 narrow band signals in parallel.

Key words: wideband digital signal; GPU; uniform DFT analysis filter bank; software algorithm; parallel computing; narrowband signal

EEACC: 1250

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.026

一种基于 GPU 的宽带数字信号多路下 变频器的实现*

曹 蕾*, 余丽红, 李 智

(广东白云学院电气与信息工程学院, 广州 510450)

摘 要: 随着无线电的广泛使用, 而频段资源相对狭窄, 对于频段上信号的管理要求越来越高, 为确保频段的合理管控, 提出了针对宽带数字信号的多路下变频器结构, 用来实现对信号的高效检测, 以检测出不合法的用户。在 GPU (Graphic Procession Unit) 强大的多核并行计算平台上, 采用高效的均匀 DFT (Discrete Fourier Transform) 分析滤波器组的多相结构对其进行了实现。该实现利用计算机显卡, 在 Windows 平台下全部采用软件算法, 无需额外的硬件辅助, 对带宽 2 MHz 的宽带信号, 能并行实时输出 1 000 路窄带信号。

关键词: 宽带数字信号; GPU; 均匀 DFT 分析滤波器组; 软件算法; 并行计算; 窄带信号

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)02-0399-04

近年来, 伴随着微电子技术, 计算机技术的发展, 无线电通信越来越深入到人类的日常生活, 如何对频段进行有效监控, 如何快速检测非法的信号频点成为了无线电管理的难点。其中对宽带数字信号检测来说, 下变频是关键, 常规的多路数字下变频器主要采用硬件平台 (FPGA, DSP) 实现, 但囿于硬件资源的限制, 实现的路数有限, 往往是几十的数量级。为解决处理路数的难题, 即提出了一种基于 PC

机显卡 GPU, 结合类 C 语言编程来实现宽带数字信号多通道并行处理的技术方法^[1]。

利用 GPU 来实现并行数字信号处理的算法有很多种, 例如并行 MSD 算法^[2], Harris 角点检测并行算法^[3], 主动声纳处理算法^[4]等, 但是这些均存在一些问题, 其实现主要基于仿真或者试验环境, 对于实际的情况考虑不足, 例如 MSD 算法主要针对的是 PCM 信号, 但是算法描述简单, 缺少相关优化,

项目来源: 广东省自然科学基金项目 (2017A030313385); 广东省本科高校质量工程与高等教育教学改革建设项目 (CXQX-ZL201706)

收稿日期: 2018-04-15

修改日期: 2018-06-11

Harris 角点检测算法主要针对图像数据,对于数据传输考虑不足,主动声纳处理算法中对于信号的筛选存在问题,存在漏检的可能。本文从实际环境出发,仔细研究各环节参数,研究数据规整,并对内存到显存之间的数据传输^[5],卷积算法等进行了基于 GPU 的工程上的优化,以确保做到 2 MHz 带宽内所有 4 kHz 音频信号的完整输出。

1 算法在 GPU 中的实现

结合经典 DFT 架构^[6],通过对频域数据进行信道划分得到图 1,在 m 时刻,将输入的宽带信号 $x(n)$ 的第 k 条多相分支信号与低通滤波器系数 $h_{LP}(n)$ 的第 k 条多相分支数据卷积,卷积的结果 m 时刻, $K=D$ 条通道共有 $K=D$ 个结果,对这 $K=D$ 个结果做反向傅氏变换,得到 $K=D$ 个结果即对应在 m 时刻 $K=D$ 条通道的每一个输出,这个输出值就是低通、降采样的基带信号。

如果一个语音信号正好跨越两个相邻的信道,那么经过图 1 的处理,该语音信号就被分割到了两个不同的相邻信道。为了将这类情况排除,增加一种信道划分,该信道划分是将图 1 中的信道平移 π/K ,得到图 2。

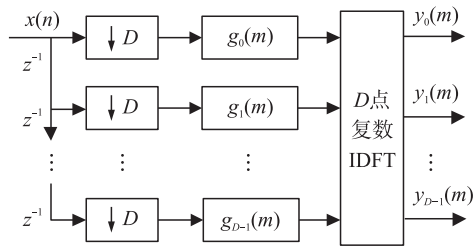


图 1 $\omega_k = 2\pi k/K$ 时均匀 DFT
分析滤波器组多相结构

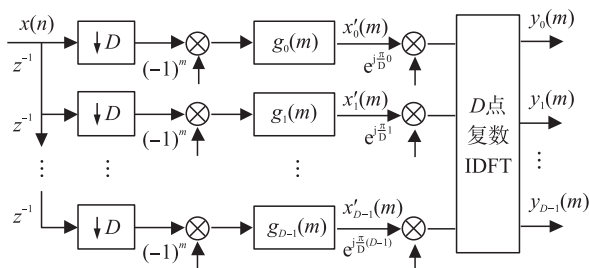


图 2 $\omega_k = 2\pi k/K + \pi/K$ 时均匀 DFT
分析滤波器组多相结构

在实际的信号处理过程中,由于需要对整个信道的信号进行完整的处理,因此实际的宽带数字信号多通道并行处理机的架构比图 1 和图 2 复杂,其上半部分的信道和下半部分的信道彼此重叠一半带宽,尽管信道个数增大了一倍,但却实现了所有窄带

信号的完整输出。

1.1 参数的计算

由图 1 和图 2 可知,参数包括宽带数字信号的带宽和采样率,输出信号的带宽和采样率,抽取因子 D ,低通滤波器的系数,相位校正矩阵^[7]。下面举例说明这些参数的设计。

假设输入宽带信号的带宽是 2 MHz,采样率是 2.5 MHz 的复数信号,要求输出的信号是 5 kHz 带宽的复数信号,因此,抽取因子 $D = 2.5 \text{ MHz}/5 \text{ kHz} = 500$,信道个数 $K=D$,需要在采样率为 2.5 MHz 的条件下设计低通滤波器,由于输出信号是 5 kHz 带宽的复数信号,所以低通滤波器的通带设计为 2 kHz,阻带设计为 3 kHz,这样能保证 4 kHz 范围内无混叠,设计出的滤波器阶数为 8 000 以上。相位校正矩阵是一个 $K \times 1$ 的复数矩阵,由于 $K=500$,利用计算工具生成相位校正阵。

1.2 数据的规整

首先是宽带输入数据,由图 1 和图 2 可知,对应每一个信道的输入数据是宽带输入数据的多相分支,由于抽取因子是 $D=500$,图 3 给出了宽带输入数据的排列。图 3 中的箭头示出了数据进入的方向^[8]。

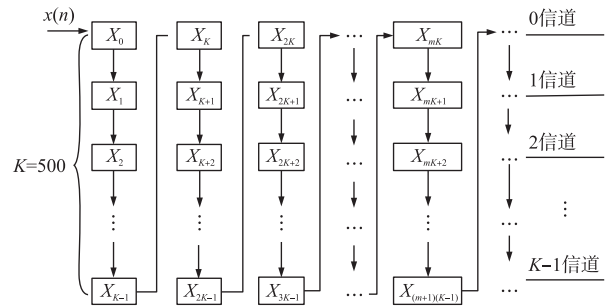


图 3 宽带输入数据的排列

其次是低通滤波器系数,同样,对应每一个信道的低通滤波器系数是整个低通滤波器系数的多相分支,由于抽取因子是 $D=500$,图 4 给出了低通滤波器数据的排列。

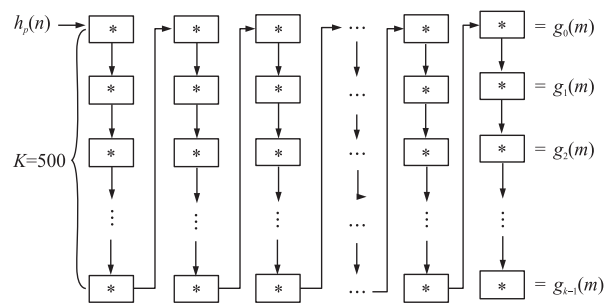


图 4 低通滤波器的数据排列

最后是相位校正矩阵,图 5 给出了相位校正矩阵的排列。

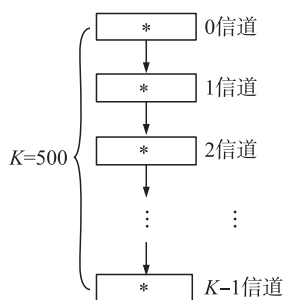


图5 相位校正矩阵的数据排列

1.3 GPU 并行算法设计

对于图1和图2中每一行的每一个点,都存在一个 N/D 点的点乘和相加运算,这里的 N 为低通滤波器的阶数, D 为抽取因子。为了充分利用GPU的并行性,取最接近并且不小于 N/D 的2的幂,用这个幂值作为一个块的线程个数来完成 N/D 个点乘操作,然后利用并行归约算法完成 N/D 个相加运算,从而得到一个卷积结果。对每一点的卷积运算必须在一个块内,该块的线程个数是最接近并且不小于 N/D 的2的幂,由于图1和图2中的数据是 $500 \times M$,使用二维块,块的行是500,列是 M 。图6给出了第 m 时刻的卷积计算框图。这 $500 \times M$ 个块的输出是 $500 \times M$ 个卷积结果,根据图1和图2可知,要对这 M 个500点数据求500点的IDFT,利用cufft库来计算,为了提高计算效率,cufft提供了批量FFT计算函数,可以一次计算出 M 个500点的IDFT^[9]。

对于图6的架构,需要相位校正矩阵,只需要在相应的位置插入相同参数的核函数即可,不再赘述。

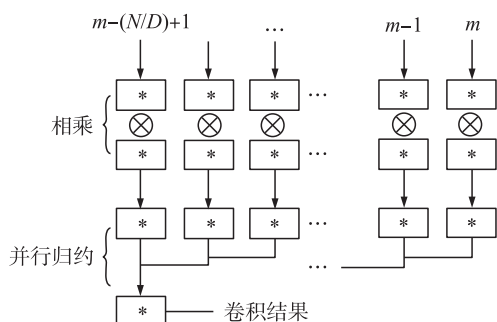


图6 卷积运算的GPU实现

2 工程实现上的优化

为最大化GPU的高速计算能力,采用以下的工程级优化^[10]:

(1)对于计算机内存和显存之间的数据传递问题的优化,采用缓存一定时间的宽带数据后,再一次性读入到GPU的全局内存中,然后GPU对宽带数据进行处理,最后将处理结果通过GPU的回调函数机制,传递回计算机进行后续处理。GPU回调函数

机制是异步模式,即在数据传递的同时,GPU和CPU依然可以进行各自的工作,互不影响。

(2)对于一些在运算中不会改变的值,将其保存在显存中的共享存储器中,如果共享存储器不够,则保存在全局存储器中,尽量避免在计算机内存和显存之间来回传递数据。

(3)在实现卷积运算时,每个块的 N/D 个点的点乘结果保存在共享存储器中,这样一来,做并行归约时,算法性能要比放在全局存储器中的访问速度要高一个数量级^[11]。

3 性能评测

对2M的短波宽带数字信号做算法评测,测试所用的显卡为NVIDIA GeForce 970 GTX,信号采样率为2.5 MHz,采样精度为16位(IQ复数表示),持续采集时间为54 s^[12]。设计的低通滤波器通带为2 kHz,阻带为3 kHz系数为8 313。抽取因子为500,两种信道划分架构的总路数为1 000路,实验结果如表1所示。

表1 1 000路信道的均匀DFT分析滤波器组在GPU上的耗时

路数	1 000
耗时/s	12
信号时长/s	54

在GPU上采用经典的数字下变频器算法,性能评测如表2所示。

表2 不同路数的经典的数字下变频器在GPU上的耗时比较

路数	耗时/s	信号时长/s
1	0.8	54
4	1.08	54
16	2.8	54
64	11	54
128	22	54
256	43	54
320	53.9	54

由表2可知,随着路数的增多,经典的数字下变频器的耗时也在非线性增长增加。当路数大于320路时,经典的数字下变频器的耗时将超出信号的持续时间,无法满足对信号实时处理的要求。在实时处理前提下,考虑部分时间冗余,利用GPU只可以实现256路的经典的数字下变频器。

为了证实GPU高效的并行计算能力,在Intel i7-4790K Core CPU上实现了1 000路信道的均匀DFT分析滤波器组,测试结果见表3,可见,同样的信号,同

样的参数,CPU 的处理时间几乎是 GPU 的 10 倍。

表 3 1 000 路信道的均匀 DFT 分析滤波器组
在 CPU 上的耗时

路数	1 000
耗时/s	100
信号时长/s	54

4 结论

基于 GPU 开发的中高速数字信号处理模块的优点显而易见,除了开发成本低之外,其通用性最为重要,可以通过软件无线电方式实现信号处理设备的快速灵活构建,对无线信号的接收处理的快速应变是一个较好的选择。

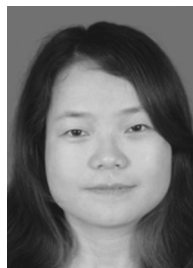
参考文献:

- [1] 程新勇. 基于 GPU 的通信基带信号处理并行算法设计[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [2] 李梓博,单福悦,高宁. 基于 GPU 的并行 MSD 算法研究[J]. 无线电工程,2016,46(3):26-29.

- [3] 杨辉跃,涂亚庆,张海涛. 基于 DFT 的相位差估计精度与改进方法[J]. 传感技术学报,2015,28(1):93-98.
- [4] 李晓敏,侯朝焕,鄢社锋. 一种基于 GPU 的主动声纳宽带信号处理实时系统[J]. 传感技术学报,2011,24(9):1279-1283.
- [5] 杨静. 信道化数字接收机技术的研究[D]. 成都:电子科技大学,2006.
- [6] Crochiere R E, Rabiner L. Recent Developments in the Design and Implementation of Digital Decimators, Interpolators, and Narrow Band Filters[C]//Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP. IEEE, 1976:292-295.
- [7] Ma X, Deng L, Zhao Y. Implementation of a Digital down Converter Using Graphics Processing Unit[C]//IEEE International Conference on Communication Technology. IEEE, 2014:655-660.
- [8] 宗孔德. 多抽样率信号处理[M]. 北京:清华大学出版社 1996:150-223.
- [9] Neelima B. Concurrency and Computation[J]. Practice and Experience 2015-1 Wiley journal 10.1002/cpe.3194 GPU.
- [10] 赵欢欢,张润生. 基于 GPU 的数字信道化设计[J]. 数字技术与应用,2017(6):162-163.
- [11] NVIDIA Corporation[S]. CUDA C Programming Guide. 2015.
- [12] Zuo Yong Zheng. Applied Mechanics and Materials[EB/OL]. 2012-121 Trans Tech 期刊 10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.3755.



曹 蕾(1981-),女,汉族,江苏张家港人,广东白云学院,讲师,硕士。主要研究方向为电路与系统、信号处理, caolei1981@aliyun.com;



余丽红(1985-),女,汉族,湖北咸宁人,硕士,讲师,主要研究方向为图像处理与分析;



李 智(1981-),男,汉族,湖南岳阳人,高级工程师,主要研究方向为信号处理。