

采用向量内积的并行相关算法*

牟卫华^{1,2},倪少杰¹,白洋³,孙广富^{1,2},欧钢^{1,2}

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 北斗卫星导航产品2301质量检测中心, 湖南长沙 410073;

3. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 陕西西安 710051)

摘要:针对软件接收机相关器计算的实时性问题,通过分析扩频信号的接收过程,建立一种基于向量内积的并行相关信号接收模型。利用图形处理单元中大量的浮点运算单元进行矩阵与向量运算,并行计算各通道相关值,提高了信号相关运算的实时性。仿真验证结果表明,利用基于GPU的向量内积软件并行相关算法计算25 MHz采样率时长1 ms的信号相关值,25个通道共150个相关运算耗时967 μs ,与CPU上基于数学核心函数库的实现相比速度约提高了61.4倍,能够实现宽带扩频信号软件实时相关接收。

关键词:相关器;向量内积;软件接收机;并行计算;图形处理单元

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-050-06

Parallel correlation algorithm based on vector dot product

MOU Weihua^{1,2}, NI Shaojie¹, BAI Yang³, SUN Guangfu^{1,2}, OU Gang^{1,2}

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. BeiDou Satellite Navigation Product 2301 Quality Testing Center, Changsha 410073, China;

3. Equipment Management and Security Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: For solving the real-time problem of the software correlator, a parallel receiving model of spread spectrum signal based on vector dot product was proposed. The calculation speed of the signal correlation was improved by parallel computing correlation value of each channel with a large number of ALU in GPU (graphics processing unit). Simulation results show that, 25 channels with 150 correlation computation consume 967 μs in all for 1 ms signal of 25 MHz sampling rate by using the vector dot product parallel correlation algorithms based on GPU. Compared with the implementation on CPU based on MKL (math kernel library), the proposed method speeds up to 61.4 times, and the real-time correlation of the broadband spread spectrum signals in software can be realized.

Key words: correlator; vector dot product; software receiver; parallel computing; GPU

在导航接收机中,相关器是串行搜索捕获与通道跟踪的核心模块,用于计算剥离载波后的接收信号和本地不同延迟复现码的相关值,几十个通道的相关运算对运算资源提出很高的要求,计算实时性要求高。在抗多径、信号质量监测以及全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)遥感等应用中,则需要在一个通道中实现高分辨率多相关器^[1],相关器设计技术是接收机关键技术之一。

目前导航接收机方案有基于导航专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)或现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现的数字接收机硬件方案以及基于PC软件实现的软件接收机方案。硬件接收机

方案中,大量乘法器与累加器实现的相关器分别独立计算不同通道与相位的相关值,在硬件方案中通过增加算术逻辑资源来扩展通道数目^[2-3]。软件接收机采用软件实现接收算法,处理采样量化的中频输入信号,算法验证与信号体制升级更加灵活方便。软件接收机中运算资源固定,在这个约束条件下,要满足实时性要求,需要挖掘运算的并行性并优化算法,通过提高运算资源利用率来减小运算时间。基于CPU的软件接收机通过运用位运算、查表法、单指令多数数据流(Single Instruction Multiple Data, SIMD)指令以及多媒体扩展指令集(MultiMedia eXtensions, MMX)技术等策略加速了相关运算速度^[4-7]。

图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)

* 收稿日期:2017-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41604016)

作者简介:牟卫华(1979—),男,山东烟台人,副研究员,博士研究生,E-mail:drmou@163.com

中有数以百计的浮点运算单元,近几年,基于GPU的通用计算技术开始应用于工程计算领域,相关专家和研究机构对GPU通用计算在导航信号接收领域的应用进行了部分研究,通过GPU中大量的运算单元并行计算,相比基于CPU的相关运算速度进一步提升^[8-12]。目前多核多处理器并行结构计算机已成为桌面计算机的主流产品,大部分软件接收机算法基于单核处理器的串行运算,如何挖掘算法并行性并充分利用处理器资源是需要解决的核心问题。

针对软件接收机相关器计算的实时性问题,为了能够挖掘信号相关接收处理的并行性,本文引入向量概念对导航扩频信号相关接收处理过程进行分析,将输入信号和本地参考信号向量化后进行批处理,利用GPU中大量的浮点运算单元进行矩阵与向量运算,给出了基于GPU向量运算的扩频信号接收通道具体实现步骤,并对GPU并行实现方法和CPU上基于数学核心函数库(Math Kernel Library, MKL)的实现方法进行了对比测试。试验结果表明,基于GPU的向量内积软件并行相关算法与CPU上基于MKL的方法相比速度提高了61.4倍,能够实现宽带扩频信号软件实时相关。

1 基于向量内积的扩频信号接收

1.1 基于向量内积的扩频信号相关算法

信号接收通道中的核心部件为相关器,主要完成基带信号与本地参考信号的相关运算,若基带信号序列记为 $x(n)$,本地伪码采样序列记为 $y(n)$,则相干积分时间内两个信号的相关结果 r 计算如式(1)所示。

$$r = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (1)$$

其中, N 为相干积分时间内的采样点数。

在传统的实现方案中,相关器由乘法器与累加器组成,如图1所示。

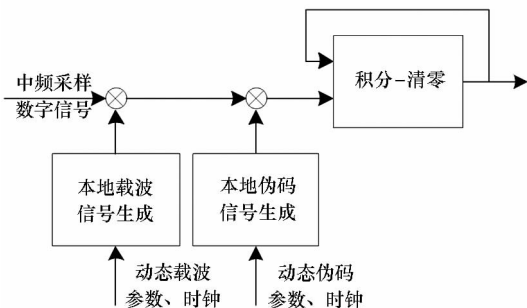


图1 传统累加器相关器结构

Fig. 1 Structure of traditional correlator

硬件相关器按串行方式一个采样时钟处理一个采样点数据,进行一次乘法运算以及一次累加运算,到达累积时间后存贮累加结果并清零,准备下一个累加周期。硬件相关器方案通过增加硬件逻辑资源实现一组相关器阵列,同时接收处理多个通道的卫星信号。

在多核处理器或GPU实现软件相关器时,为了充分利用众多处理器内核的运算资源,数据处理方式采用批处理方式,将所处理的数据向量化,相干积分时间内的基带复信号向量记为 \mathbf{X} ,本地伪码向量记为 \mathbf{Y} ,则:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x(0) & x(1) & \cdots & x(N-1)]^T \\ \mathbf{Y} = [y(0) & y(1) & \cdots & y(N-1)]^T \end{cases} \quad (2)$$

使用向量空间的概念来分析导航信号相关接收能带来诸多方便。相干积分时间内两个信号的相关结果 r 可由向量 \mathbf{X} 和向量 \mathbf{Y} 的内积计算得到,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{N}(\mathbf{Y}, \mathbf{X}) = \frac{1}{N} \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{X} \\ &= \frac{1}{N} [y(0) \quad y(1) \quad \cdots \quad y(N-1)] \cdot \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

基带复信号向量 \mathbf{X} 与本地伪码向量 \mathbf{Y} 的夹角记为 θ ,则:

$$\cos\theta = \frac{(\mathbf{Y}, \mathbf{X})}{\|\mathbf{Y}\| \cdot \|\mathbf{X}\|} = \frac{\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{x}}{\|\mathbf{Y}\| \cdot \|\mathbf{X}\|} \quad (4)$$

由柯西-许瓦兹不等式可知^[13-14]:

$$-1 \leq \frac{(\mathbf{Y}, \mathbf{X})}{\|\mathbf{Y}\| \cdot \|\mathbf{X}\|} \leq 1 \quad (5)$$

通过伪码跟踪环路的迭代处理,当即时通道伪码与基带信号伪码对齐时,即时通道伪码向量 \mathbf{Y} 与基带复信号向量 \mathbf{X} 的内积达到最大值,此时向量 \mathbf{X} 与向量 \mathbf{Y} 的夹角最小,理想情况下此时向量 \mathbf{X} 与向量 \mathbf{Y} 的夹角为0。但在实际系统实现中,由于信号有限带宽、通道的非线性失真以及跟踪误差等因素影响,向量夹角略大于0,向量夹角 θ 可作为衡量相关损耗的一项指标。

1.2 基于向量运算的扩频信号接收模型

记信号载波多普勒频率为 f_d ,载波相位为 φ ,信号采样周期为 T ,则相干积分时间内的本地载波多普勒信号向量记为 \mathbf{C} ,则:

$$\mathbf{C} = [e^{-j(-\varphi)} \quad e^{-j(-Tf_d-\varphi)} \quad \cdots \quad e^{-j[-(N-1)Tf_d-\varphi]}]^T \quad (6)$$

载波多普勒剥离后得到的基带复信号向量 \mathbf{X} 是通过计算相干积分时间内的输入信号向量 \mathbf{S} 与载波多普勒信号向量 \mathbf{C} 的哈达马积 (Hadamard product) 得到, 输入信号向量 \mathbf{S} 中的分量与载波多普勒信号向量 \mathbf{C} 中的分量对应相乘, 即:

$$\mathbf{S} = [s(0) \quad s(1) \quad \dots \quad s(N-1)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{S} \circ \mathbf{C}$$

$$= [s(0)e^{-j(-\varphi)} \quad s(1)e^{-j(-Tf_d-\varphi)} \quad \dots \quad s(N-1)e^{-j[-(N-1)Tf_d-\varphi]}]^T \quad (8)$$

其中, $\mathbf{S} \circ \mathbf{C}$ 表示向量 \mathbf{S} 与向量 \mathbf{C} 的哈达马积。

记扩频信号伪码频率为 f_p (包含伪码多普勒), 伪码初始相位为 ρ_0 , 信号采样周期为 T , 伪码序列为 $PN(n)$, 本地伪码向量记为 \mathbf{Y} , 则:

$$\mathbf{Y} = [PN(\rho_0) \quad PN(f_p T + \rho_0) \quad \dots \quad PN(f_p(N-1)T + \rho_0)]^T \quad (9)$$

伪码初始相位为 ρ_0 的本地伪码向量与基带信号向量 \mathbf{X} 的相关值 r 为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{N} \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{X} \\ &= \frac{1}{N} \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{S} \circ \mathbf{C} \\ &= \frac{1}{N} \{PN(\rho_0) \quad PN(f_p T + \rho_0) \quad \dots \quad PN[f_p(N-1)T + \rho_0]\} \cdot \\ &\quad \begin{bmatrix} s(0)e^{-j(-\varphi)} \\ s(1)e^{-j(-Tf_d-\varphi)} \\ \vdots \\ s(N-1)e^{-j[-(N-1)Tf_d-\varphi]} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

若本地生成一组 3 个不同伪码相位的伪码向量, 分别为码相位超前 δ 的伪码向量 \mathbf{Y}_E 、即时伪码向量 \mathbf{Y}_P 、码相位滞后 δ 的伪码向量 \mathbf{Y}_L , 这 3 个伪码向量组成本地参考伪码矩阵 \mathbf{Y}_{EPL} , 则 \mathbf{Y}_{EPL} 与基带信号向量 \mathbf{X} 的相关值向量 $\mathbf{R} = [r_E \quad r_P \quad r_L]^T$ 计算如式 (11) 所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{EPL}^T \cdot \mathbf{X} \\ &= \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{EPL}^T \cdot \mathbf{S} \circ \mathbf{C} \\ &= \frac{1}{N} \begin{bmatrix} PN(\rho_0 - \delta) & PN(f_p T + \rho_0 - \delta) & \dots & PN(f_p(N-1)T + \rho_0 - \delta) \\ PN(\rho_0) & PN(f_p T + \rho_0) & \dots & PN(f_p(N-1)T + \rho_0) \\ PN(\rho_0 + \delta) & PN(f_p T + \rho_0 + \delta) & \dots & PN(f_p(N-1)T + \rho_0 + \delta) \end{bmatrix} \cdot \\ &\quad \begin{bmatrix} s(0)e^{-j(-\varphi)} \\ s(1)e^{-j(-Tf_d-\varphi)} \\ \vdots \\ s(N-1)e^{-j[-(N-1)Tf_d-\varphi]} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

运用该方法, 本地生成 M (为奇数) 个伪码向量, 码相位间隔为 $2/(M-1)$ 个码片长度, 这 M 个伪码向量组成本地参考伪码矩阵 \mathbf{Y}_{MP} , M 个相关

值组成的多相关值向量为 \mathbf{R}_{MP} , 则基于向量内积的多相关器计算如式 (12) 所示。

$$\mathbf{R}_{MP} = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{MP}^T \cdot \mathbf{X} = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{MP}^T \cdot \mathbf{S} \circ \mathbf{C} \quad (12)$$

基于向量内积软件并行相关器 (Vector dot product Software Parallel Correlator, VecSPC) 的扩频信号接收通道模型如图 2 所示。

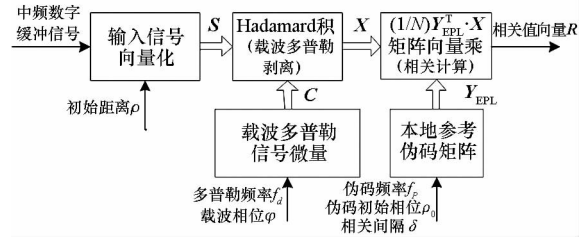


图 2 基于向量内积软件并行相关器 (VecSPC) 的扩频信号接收通道模型

Fig. 2 Model of channels to receive spread spectrum signals based on VecSPC

1.3 基于向量运算的多导频通道扩频信号接收

新体制导航信号中导频通道上无电文调制, 此时不同通道间能够共用输入信号向量 \mathbf{S} , 采用该方法能够减少矩阵向量乘法次数, 进一步提高并行运算效率。由于不同卫星接收通道之间载波多普勒不相同, 将通道 i 的本地参考伪码向量 \mathbf{Y}_{Ei} 、 \mathbf{Y}_{Pi} 、 \mathbf{Y}_{Li} 与通道 i 的载波多普勒信号向量 \mathbf{C}_i ($i=0, 1, \dots, K$, 其中 K 为通道数) 对应元素相乘, 计算其哈达马积, 组成本地参考信号矩阵 \mathbf{Y}_{Fd-EPL} , 将本地参考信号矩阵 \mathbf{Y}_{Fd-EPL} 与输入信号向量 \mathbf{S} 相乘得到 K 个导频信号通道不同伪码延迟的相关值向量 \mathbf{R}_K 。

基于向量运算的多导频信号接收通道模型如图 3 所示。

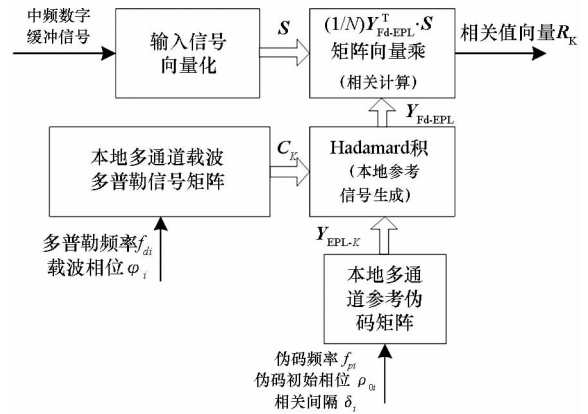


图 3 基于向量运算的多导频信号接收通道模型

Fig. 3 Model of multiple pilot frequency channels to receive signals based on vector arithmetic

2 基于向量运算的扩频信号接收软件实现

2.1 基于多核 CPU 与 GPU 的向量运算

目前并行计算在各方面取得了很大进展,多数系统都存在一定的并行性,并行处理器已成为现代计算机的标配,多核是主流系统配置,目前桌面系统包含 2~32 个处理器,工程应用中需要的大量计算已经从大型计算机转移到普通电脑。英特尔数学核心函数库包含了高度优化的基础线性代数子程序库(Basic Linear Algebra Subprograms, BLAS),在工程计算应用领域,能够充分发挥处理器的运算性能。相比 CPU, GPU 中有更多的运算逻辑部件(Arithmetic Logic Unit, ALU),最近几年,基于 GPU 的通用计算技术中由 GPU 负责计算大规模数据的并行计算,计算统一设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)是一种 GPU 上并行计算的编程框架, CUBLAS(CUDA Basic Linear Algebra Subprograms)函数库是 CUDA 驱动程序上的子程序,针对大规模矩阵乘法运算提供最佳的运算性能^[15]。

2.2 基于向量运算的软件扩频信号接收步骤

依据基于向量运算的扩频信号接收模型,软件扩频信号并行接收具体的步骤如下^[16]:

1) 根据伪距 ρ 将输入信号向量化,得到输入信号向量 S ;

2) 根据多普勒频率 f_d 、载波相位 φ , 利用基于 GPU 的并行信号生成方法,由式(6)计算生成本地载波多普勒信号向量 C ,计算输入信号向量 S 与本地载波多普勒信号向量 C 的哈达马积,将向量的分量对应相乘,得到剥离载波的基带复信号向量 X ;

3) 根据伪码频率 f_p 、伪码初始相位 ρ_0 以及相关间隔 δ , 利用基于 GPU 的并行信号生成方法,由式(9)生成本地伪码向量,3 个相关间隔为 δ 的本地伪码向量组成本地参考伪码矩阵 Y_{EPL} ;

4) 基于 GPU 并行计算基带复信号向量 X 与本地参考伪码矩阵 Y_{EPL} 的乘积,得到相关值向量 R ;

5) 根据相关值向量 R , 由 CPU 进行载波环路跟踪和伪码环路跟踪计算,估计本地信号参数,包括多普勒频率 f_d 、载波相位 φ , 伪码频率 f_p 、伪码初始相位 ρ_0 和伪距 ρ 等。

多导频通道扩频信号接收步骤如下:

1) 将输入信号向量化,得到输入信号向量 S ;

2) 根据伪码频率 f_{p_i} 、伪码初始相位 ρ_{0_i} 以及相

关间隔 δ_i , 利用基于 GPU 的并行信号生成方法,生成本地伪码向量,每个通道中 3 个相关间隔为 δ_i 共 K 个通道的本地伪码向量组成本地多通道参考伪码矩阵 Y_{EPL-K} ;

3) 根据多普勒频率 f_{d_i} 、载波相位 φ_i , 利用基于 GPU 的并行信号生成方法,计算生成本地多通道载波多普勒信号矩阵 C_K ,计算本地多通道参考伪码矩阵 Y_{EPL-K} 与载波多普勒信号矩阵 C_K 的哈达马积,将分量对应相乘,得到本地参考信号矩阵 Y_{Fd-EPL} ;

4) 基于 GPU 并行计算本地参考信号矩阵 Y_{Fd-EPL} 与输入信号向量 S 的乘积,得到 K 个导频信号通道不同伪码延迟的相关值向量 R_K ;

3 算法测试验证

3.1 实验方案设计

通过对比 CPU 上基于 MKL 向量运算实现的多路扩频信号接收通道运算耗时和基于 GPU 并行向量计算的接收通道运算耗时,分析 GPU 运算加速性能。利用基于向量内积并行多相关器计算不同码延迟的相关值,验证相关运算正确性。仿真验证平台 CPU 为 Intel Xeon E5-2640 v3 8 核 16 线程双处理器,主频 2.6 GHz, GPU 为 NVIDIA Tesla K40m。

仿真信号采样速率为 25 MHz,伪码采用 GPS P 码,伪码速率为 10.23 MHz,多普勒频率为 1 kHz,相关积分长度为 1 ms。

3.2 多导频接收通道并行加速性能

利用 Nsight Performance Analysis 工具测试在不同接收通道数时,基于 GPU 实现的扩频信号多通道接收运算函数的耗时。利用函数 QueryPerformanceCounter 测试基于 MKL 实现的扩频信号多通道接收运算的耗时。不同通道数两种方法实现耗时如图 4 所示。

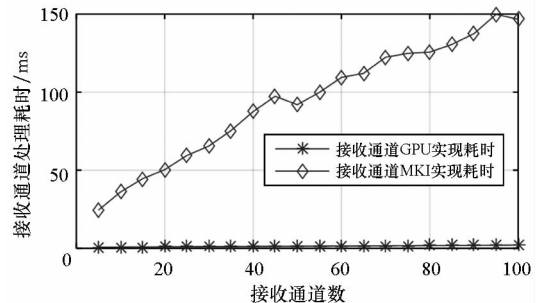


图4 多导频信号接收通道 GPU 与 MKL 实现运算耗时
Fig. 4 Time consumed by the calculation of pilot signal receiving channels implemented on GPU and MKL

从图中可以看出,基于 MKL 向量运算的实现方法,通道数增大 20 倍时运算耗时增大 6 倍,CPU 多核处理器的并行性加速了运算性能。相比 MKL 实现,GPU 实现方法耗时更少,随着通道数目的增多,耗时也未明显增加。

多导频信号接收通道 GPU 实现方法和 MKL 实现方法的加速比与通道数的关系如图 5 所示。随着通道数目增多,大量数据浮点运算在整个函数耗时中的比重增大,GPU 加速比从 5 个通道时 35 倍左右,增大到 40 个通道时 75 倍左右,可见多通道信号处理更能发挥 GPU 的并行处理优势。

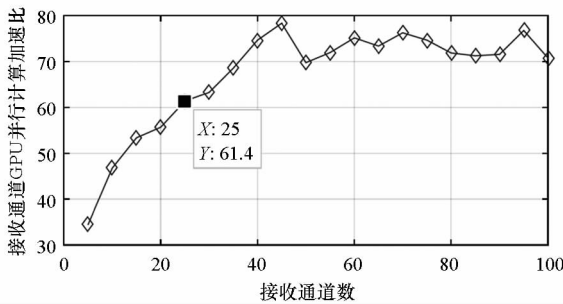


图 5 多导频信号接收通道并行加速性能

Fig. 5 Parallel acceleration performance of multiple pilot frequency receiving channels

多导频信号接收通道 GPU 实现方法的耗时如图 6 所示,当通道数小于 25 时,1 ms 采样数据运算总耗时小于实时处理时间门限,此时从图 5 的加速比曲线中可知,与 CPU 上基于 MKL 的实现相比加速约 61.4 倍,能够实现实时处理。

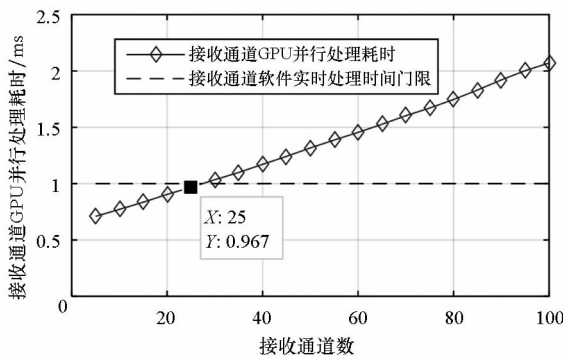


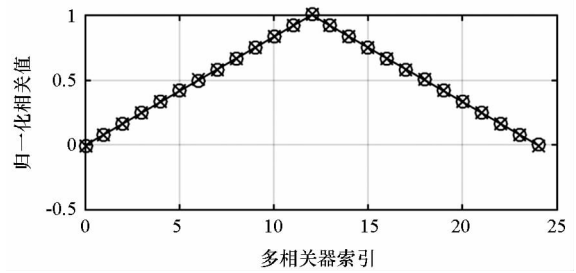
图 6 多导频信号接收通道 GPU 实现运算耗时

Fig. 6 Time consumed by multiple pilot signal receiving channels computed based on GPU

3.3 仿真数据验证

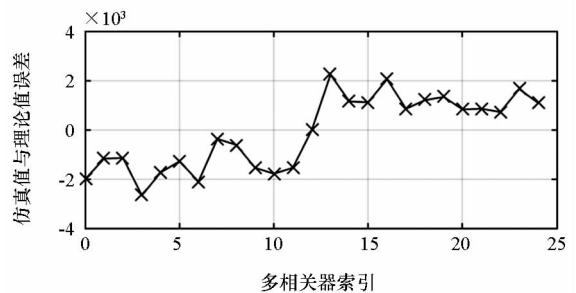
利用基于向量内积软件并行多相关器计算 1 个卫星通道在 2 个码片内均匀分布的 25 个不同伪码延迟的相关值,仿真的 25 路多相关器输出值如图 7 所示。

可以看出仿真值与理论值相符,利用基于向量内积软件并行多相关器可以实现导航信号实时相关域完好性监测分析。



(a) 归一化多相关值曲线

(a) Normalized multiple correlation value curve



(b) 多相关值误差曲线

(b) Multiple correlation value error curve

图 7 基于 GPU 向量内积的多相关值曲线

Fig. 7 Multiple correlation value curve error based on GPU vector dot product

4 结论

本文提出的基于向量内积的软件并行相关算法,发挥了 GPU 的并行运算潜力,提高了扩频信号相关运算的实时性。其中基于向量内积软件并行相关器的扩频信号接收通道模型,适用于二进制相移键控、正交相移键控等扩频信号接收,基于向量运算的多导频信号接收通道模型适用于含有导频分量的二进制偏移载波 (Binary Offset Carrier, BOC) 信号接收。相比在 FPGA 中实现的方法,该方法中接收通道全部算法采用 PC 软件编程实现,对于卫星导航各类 BOC 信号接收算法的验证,修改灵活方便,可广泛应用于宽带导航扩频信号实时软件接收机相关接收通道。

随着 GPU 运算能力的进一步增强,基于 GPU 能够实现更多信号通道的软件实时相关接收,实现多种系统信号体制的接收性能测试验证,快速形成原型样机,为多系统组合接收机开发提供算法验证平台。

参考文献 (References)

[1] 黄仰博,李井源,欧钢. 基于差分结构的高分辨率多相关

- 器实现技术[J]. 微处理机, 2011, 32(4): 55-57, 61.
- HUANG Yangbo, LI Jingyuan, OU Gang. Implementation of high resolution multiple correlators based on differential structure[J]. Microprocessors, 2011, 32(4): 55-57, 61. (in Chinese)
- [2] 孙鹏, 叶萌华, 张辉. 数字相关器的FPGA实现[J]. 北京电子科技学院学报, 2008, 16(2): 10-11.
- SUN Peng, YE Menghua, ZHANG Hui. The FPGA implementation of digital correlator[J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2008, 16(2): 10-11. (in Chinese)
- [3] 王尔申, 张淑芳, 胡青, 等. GPS接收机相关器技术研究及FPGA实现[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3582-3585.
- WANG Ershen, ZHANG Shufang, HU Qing, et al. GPS correlator research and FPGA implementation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3582-3585. (in Chinese)
- [4] 李丹, 寇艳红. GPS软件接收机实时化设计与实现[J]. 无线电工程, 2008, 38(5): 29-31.
- LI Dan, KOU Yanhong. Speedup design and realization of GPS software receiver[J]. Radio Engineering, 2008, 38(5): 29-31. (in Chinese)
- [5] 翟传润, 张婧. GPS软件接收机相关器的设计[J]. 计算机仿真, 2008, 25(12): 74-76.
- ZHAI Chuanrun, ZHANG Jing. Design of a new correlator applied to GPS software receiver[J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 74-76. (in Chinese)
- [6] 向为, 李垣陵, 牟卫华, 等. 实时GNSS软件接收机并行相关器设计[J]. 宇航学报, 2014, 35(2): 213-219.
- XIANG Wei, LI Yuanling, MOU Weihua, et al. Design of a real-time GNSS software receiver parallel correlator[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(2): 213-219. (in Chinese)
- [7] Tao J, Yu W, Qin H L, et al. A real-time GPS software receiver correlator design for embedded platform[C]//Proceedings of Second International Conference on Communications and Networking, 2011.
- [8] Wu C, Qian Y, Cui X, et al. The optimized method and algorithms in the CPU & GPU-based GNSS software receiver[C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009.
- [9] 谢维华, 张军. 一种实时GNSS软件接收机CUDA相关器算法[C]//第五届中国卫星导航学术年会, 2014.
- XIE Weihua, ZHANG Jun. A new CUDA correlator algorithm for real-time GNSS software receiver[C]//Proceedings of 5th China Satellite Navigation Conference, 2014. (in Chinese)
- [10] Huang B, Yao Z, Guo F, et al. STARx-a GPU based multi-system full-band real-time GNSS software receiver[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2013.
- [11] Park K W, Yang J S, Park C, et al. Implementation of GPGPU based real-time signal acquisition and tracking module for multi-constellation GNSS software receiver[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2014.
- [12] 张尧, 唐小妹, 陈华明, 等. 基于GPU的GNSS信号跟踪设计与实现[J]. 全球定位系统, 2014, 39(5): 59-63.
- ZHANG Yao, TANG Xiaomei, CHEN Huaming, et al. Design and implementation of GNSS signal tracking based on GPU[J]. GNSS World of China, 2014, 39(5): 59-63. (in Chinese)
- [13] 田桂平, 万钧力, 陈滢涛. 基于矢量内积法的高精度数字相位差计[J]. 电测与仪表, 2004, 41(10): 16-18.
- TIAN Guiping, WAN Junli, CHEN Yantao. High precision digital phase detector based on inner product theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(10): 16-18. (in Chinese)
- [14] 黄正英, 李季, 陈结祥, 等. 向量内积法检相在激光测距系统中的应用[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(6): 31-34.
- HUANG Zhengying, LI Ji, CHEN Jiexiang, et al. The phase difference detector by inner product applied in laser phase distance measurement system[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(6): 31-34. (in Chinese)
- [15] 肖江, 胡柯良, 邓元勇. 基于CUDA的矩阵乘法和FFT性能测试[J]. 计算机工程, 2009, 35(10): 7-10.
- XIAO Jiang, HU Keliang, DENG Yuanyong. Ability test for matrix-multiplication and FFT based on CUDA[J]. Computer Engineering, 2009, 35(10): 7-10. (in Chinese)
- [16] 牟卫华, 王雷, 朱祥维, 等. 基于GPU的高动态导航信号实时仿真生成[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(3): 30-34.
- MOU Weihua, WANG Lei, ZHU Xiangwei, et al. High dynamic navigation signal real time simulation and generation based on GPU[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(3): 30-34. (in Chinese)