

# 一种高超声速雷达目标检测与参数估计方法

张宝玲, 郑海昕, 薛俊诗

(装备学院 光电装备系, 北京 101416)

**摘要:**工作于特高频/甚高频(UHF/VHF)频段的双基地雷达探测系统可作为高超声速临近空间目标探测的重要手段之一。为了解决探测系统发现与跟踪目标的实时性问题,提出一种基于图像处理器(GPU)的高超声速高动态目标回波信号检测与参数估计方法。研究了GPU用于高速高动态回波信号检测与参数估计的基本原理,给出实现方案的设计过程、原理框图、软件设计步骤及部分代码片段。最后,选择具有代表性参数的信号在实际平台上进行测试,结果表明,利用GPU进行400路4 096数据点的并行计算时间可以控制在200 ms内,实时性和估计参数指标满足设计要求。

**关键词:**高超声速飞行器;多基地雷达;信号检测;参数估计;图像处理器

中图分类号:TN820.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)04-0043-06

## A Method for Hypersonic Radar Target Detection and Parameter Estimation

Zhang Baoling, Zheng Haixin, Xue Junshi

(Department of Optoelectronics, Equipment Academy, Beijing 101406, China)

**Abstract:** The bistatic radar detection system working in UHF/VHF served as one of the important means of hypersonic near space target detection. In order to solve the problem of real time target detecting and tracing, a method for hypersonic and high-dynamic target echo signal detection and parameter estimation based on GPU was put forward. The basic principles of this method were first introduced and the design process, block diagram, software design procedure and part of the code fragment were then presented. Finally, signals with representative parameters were selected and tested on the actual platform. The results show that with GPU, the parallel correlation computation of 400 channels, 4 096 data points can be completed within 200 ms, indicating that the real time and estimation parameter indexes meet the design requirements.

**Key words:** near space hypersonic vehicles; multistatic radar; signal detection; parameter estimation; graphic processing unit

临近空间飞行器是指运行在临近空间范围(20~100 km)的飞行器<sup>[1]</sup>。它能快速在敌方战区上空飞行而不易被敌方防空监视系统发现,从而为指挥官提供不间断的监视情报,以增强其对战场情况的了解。部署这种高空飞行器,成本低、时间快,适合现代战争的需求<sup>[2-3]</sup>。由于这种飞行器具有飞行高度高、速度快、距离远等特点,给探测系统带来发现难、探测难、跟踪难等严峻挑战。雷达探测是临近空间目标探测的主要技术手段<sup>[4]</sup>,目前尚无对临近空间目标监视预警的有效手段。

多基地雷达探测系统具有隐蔽性好,生存能力、抗干扰能力、反侦察能力、反干扰能力强等技术优势<sup>[5]</sup>。工作于特高频(ultra high frequency, UHF)/甚高频(very high frequency, VHF)频段的多基地雷达探测系统用于高超声速临近空间目标探测,可以从等离子鞘套的反射回波提取目标的有效信息,实现对目标的捕获

收稿日期:2015-06-11

作者简介:张宝玲(1964—),女,河北乐亭人,副教授,主要从事航天测控方面的研究工作。E-mail:zbl710@126.com

和初步定位,为精确跟踪雷达提供引导信息,克服临近空间高超声速目标所特有的黑障效应。把多基地雷达的发射机布设于后方,可以提高探测系统的安全性,如果再采用一定形式的扩频技术,例如二相编码脉冲信号,则使得敌方侦察雷达探测到发射机的概率进一步下降,使探测系统具有卓越的生存能力。临近空间高超声速目标具有高速、高动态的特性<sup>[6]</sup>,在一个天线波束内的驻留时间很短,因而,各接收站必须具备对接收信号进行快速检测的能力,从而及时发现目标,所以,探测系统的实时性成为系统的重要技术指标。

经典的伪码信号捕获方法是一个包括载波多普勒频移搜索和伪码相位偏移搜索的二维捕获过程,可以用 FPGA(field programmable gate array,现场可编程门阵列)实现,也可以用软件实现。鉴于临近空间高超声速目标的高速度和高动态特性<sup>[6]</sup>,如果用硬件实现上述并行捕获过程,硬件电路将极其复杂,难以实现,而基于 CPU(central processing unit,中央处理器)并行多路快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)的实时性难以满足要求。GPU(graphic processing unit,图形处理器)具有高度并行化的特点,如果对并行算法改进后将其应用于多基地雷达高超声速临近空间目标探测系统,则可以实现临近空间高动态回波的快速捕获。

### 1 利用 GPU 高速高动态回波信号检测的基本原理

GPU 是一种拥有极强计算能力和较高存储器带宽的多线程多核处理器。近几年, GPU 的性能每一年就可以翻倍,大大超过了 CPU 遵照摩尔定律(每 18~24 月性能翻倍)的发展速度<sup>[7]</sup>。2003 年,Morelan 等<sup>[8]</sup>利用常规算法在 GPU 上实现了快速傅里叶变换。英伟达(NVIDIA)推出统一设备架构(compute unified device architecture, CUDA)后, GPU 的强大性能得到充分发挥,应用领域也不断扩展。GPU 计算单元结构如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

将 GPU 应用于高速目标回波信号的检测与参数估计时,利用 GPU 中的众多线程处理器进行并行 FFT 处理及相关计算,完成伪码相关(或解扩)计算和载波频率计算,设伪码周期长度为  $N$ ,则利用 GPU 实现目标快速捕获的基本原理如图 2 所示。GPU 只能调用一次 CUFFT 库同时做多个 FFT,因此需要对采样编码数据做一些特殊处理:将 GPU 中的计算结果返回 CPU 中,再将相关峰值与判决门限比对,即可完成回波信号的检测;将载波谱线的频率与本地标准频率比对,即可获得多普勒频率粗值。将相关峰值时刻与发送信号的初相位进行比较,即可获得回波信号伪码的粗相位。将该值作为本地伪码数控振荡器(numerically controlled oscillator, NCO)的初始值,再进行伪码精确捕获,即可获得精确的回波时延,用于测距解算。测距精度取决于伪码 NCO 的步进值,步进值越小,精度越高,但实时性越差。

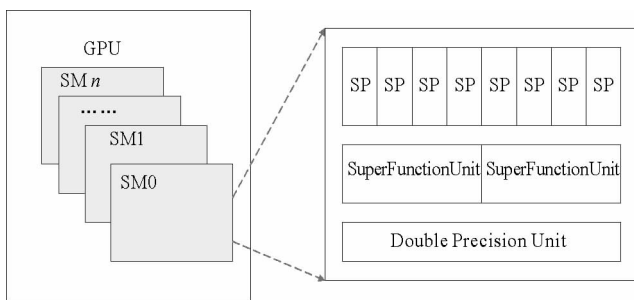


图 1 GPU 计算单元结构

Fig. 1 Structure of GPU computing unit

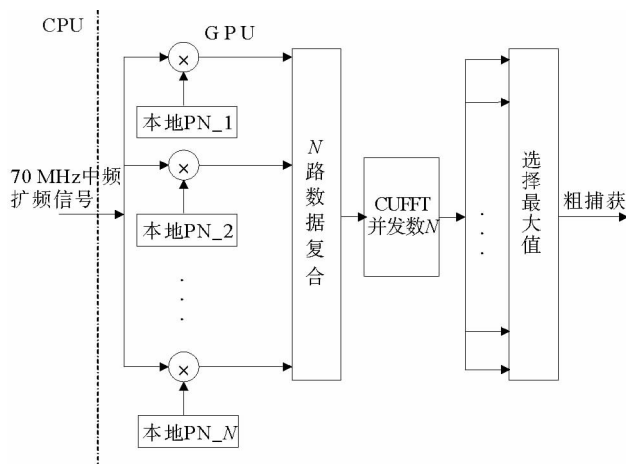


图 2 基于 GPU 的并行捕获算法原理框图

Fig. 2 Diagram of parallel algorithm based on GPU

## 2 基于 GPU 的回波信号检测与参数估计方案

### 2.1 确定并行通道数目

双基地雷达探测系统的多普勒频率、多普勒变化率分别为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \varphi \cos \frac{\beta}{2}; \quad (1)$$

$$f'_d = \frac{a}{\lambda} \cos \varphi \cos \frac{\beta}{2}. \quad (2)$$

其中： $v$ —目标在双基地平面内的运动速度，m/s； $a$ —加速度，m/s<sup>2</sup>； $\beta$ —双基地角，(°)； $\lambda$ —波长，m； $\varphi$ —目标速度方向与双基地角平分线的夹角，(°)。

设多基地雷达系统的探测频率为 300 MHz，双基地角  $\beta$  的范围是 [3°, 157°]，则当临近空间高超声速目标在双基地平面内的速度最大值为 5.1 km/s 时，利用式(1)和式(2)可以计算出目标回波的多普勒频率为 [-10, 10] kHz。适当增加伪码长度，可以提高伪码捕获增益，但信号检测与参数估计的实时性将变差。增加调制脉冲时长，可降低回波信号剧烈波动带来的影响。

一般情况下，多普勒频率搜索间隔等于一个脉冲时长的倒数便能满足信号捕获的要求，由于临近空间高动态回波信噪比较低，可适当减小多普勒搜索步长，选择搜索频率为 500~1 000 Hz。

### 2.2 采样数据的前期处理

前期处理的主要内容包括：

- 1) 将采样后的中频信号分别与各通道的本地复载波相乘，对多普勒频偏进行补偿；
- 2) 产生本地伪码信号，并对其进行内插，使内插后的本地伪码长度与剥离载波后的中频信号采样数据长度一致；
- 3) 将补偿后的中频信号和本地伪码信号从 CPU 内存拷贝到 GPU 显存；
- 4) 将输入信号与不同初相位的 PN 码对应码位相乘后再进行数据复合，形成串行数据块，以便利用一个 CUFFT 做多个 FFT，实现 FFT 的并行运算。

### 2.3 GPU 端多路并行运算

利用 CUFFT 库函数实现  $(D+1)$  路 FFT 并行运算，分别对各通道数据与本地伪码信号进行 FFT 运算<sup>[9]</sup>。将本地伪码信号 FFT 处理后的结果取共轭，并与 FFT 处理后的  $D$  路并行中频信号分别相乘，乘法运算可以利用 GPU 核函数设计的并行算法进行；将频域相乘后的结果再次调用 CUFFT，完成 IFFT 运算，对运算结果并行取模。

### 2.4 CPU 端峰值搜索

GPU 的逻辑判断执行能力较差，寻找相关峰值、捕获判决的任务由 CPU 完成。进行捕获判决后，匹配时的结果为含有伪码相位信息、具有相关峰值的谱线，而不匹配时的结果相当于对回波信号进行了一次伪码调制，不会得到峰值信息。将相关峰值最大时刻与发送信号的初相位进行比较，即可获得回波信号的伪码粗相位，而由峰值所在的通道数可得到多普勒估计值。

根据以上分析，设计基于 GPU 的高动态回波信号检测与参数估计方案，原理框图如图 3 所示。

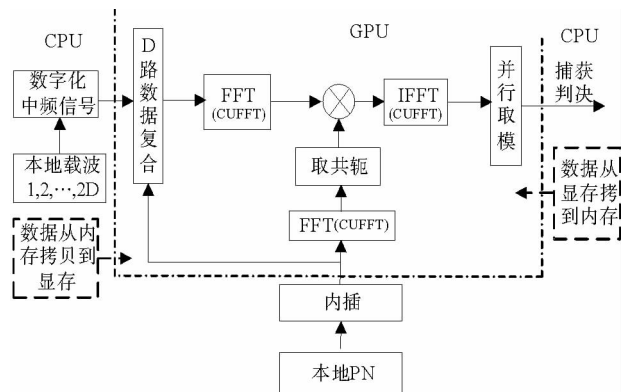


图 3 基于 GPU 的高动态回波捕获原理图

Fig. 3 Diagram of high-dynamic echo capturing based on GPU

### 3 软件设计

CUDA 编程模型是将进行串行计算和逻辑运算的 CPU(主机)和负责高速并行计算的 GPU(设备)由 PCI-E 总线连接。由于 CPU 和 GPU 之间的数据传递需要耗费一定的时间,所以在进行 CUDA 编程时,应尽量减少二者之间的数据传递,提高计算效率。理想情况下,CPU 串行代码只负责内核函数的启动与清理,而计算任务尽量由 GPU 完成。软件主程序流程如下:

- 1)初始化数据。首先利用 Malloc 为内存申请用于存储本地伪码信号、中间处理结果的空间,将回波采样数据和内插后的本地伪码读入内存;然后利用 cudaMalloc 在 GPU 端申请用于存储由 CPU 读入的数据和计算结果的空间。
- 2)对 CUDA 内核的 FFT 进行初始化,并设置运算点数。设并行通道数为  $D$ ,每路信号采样点数为  $N$ ,则运算点数为  $(D+1)N$ 。
- 3)将 CPU 内存中的多通道多普勒补偿后数据送入 GPU 显存。
- 4)调用 CUFFT 完成多路并行快速傅里叶变换,用乘法核函数完成并行乘法运算,然后对各运算结果并行取模。
- 5)将计算结果读回 CPU,完成捕获判决。相关峰最大值低于门限值,判定无目标;相关峰最大值高于门限值,判定有目标,并计算目标的多普勒粗值和码相位。将该值作为载波 NCO 的初始值,进行精确捕获,则可进行连续跟踪,并获得精确的多普勒频率用于速度解算。

### 4 方案验证

为了验证方案的可行性,在实际 GPU 平台上对基于 FFT 的多通道频域并行捕获的高动态回波捕获性能进行测试。共测试三组数据:一组捕获数据,两组跟踪数据。测试过程中,兼顾搜索效率和参数估计精度,在保证系统工作的实时性和有效性的前提下,提高目标检测概率和参数估计的精度。

测试条件:探测信号频率 300 MHz,双基地角  $\beta$  变化范围  $[3^\circ, 157^\circ]$ ,临近空间高超声速目标在双基地平面内的速度最大值为 5.1 km/s,根据式(1)可以计算出,多普勒的捕获空间为  $[-10, 10]$  kHz。回波信号多普勒频率为 4 045 Hz,信噪比 -20 dB,搜索通道频率间隔 100 Hz。采样频率 40 MHz,码速率 6.138 Mcps,折合 6.5 采样点/码片,以一个伪码周期为相关积分时间计算测试点数。根据不同阶段进行不同频率的重采样,调节测试数据点数。

测试平台:CPU 型号为 Intel Core i7965,主要参数为内存 12 GB,主频 3.2 GHz,内存外频为 1 600 MHz,编译器 Visual Studio 2008。GPU 型号为 Tesla C2075,主要参数为显存 6 GHz,时钟频率 1.5 GHz,核心处理器 448 个,峰值双精度浮点性能 515 Gflops,存储器带宽 148 Gbytes/s。GPU 与 CPU 之间的通信采用 PCI-E 2.0 $\times$ 6。测试方法是根据不同处理阶段,采用不同处理精度,获取计算时间。部分程序代码如图 4 所示,测试结果如表 1 所示。

表 1 基于 GPU 的扩频信号并行捕获性能测试

Tab.1 Parallel capture performance testing of spread spectrum signal based GPU

PN 码长	相位精度	并行通道数	处理时间/ms	总时间/ms	处理阶段
1 023	1/2 码片	201	23	75	目标捕获
1 023	1/4 码片	201	41	133	目标跟踪
1 023	1/4 码片	401	71	186	目标跟踪

测试得到相关峰值最大值的通道数为 141,与理论分析相同;多普勒估计粗值为 4 000 Hz,与理论值相比存在一定误差。利用 GPU 完成伪码并行捕获,将捕获后的数据拷贝回 CPU 进行峰值搜索,得到仿真结果如图 5 所示。

为了进一步对捕获性能做出评估,利用 CPU 和 GPU 分别完成对相同点数和多普勒通道数的回波信号

的伪码捕获,分别对点数为 4 096,通道数为 100,150,200,250,300,350,400 进行测试试验(仿真过程中,只统计核心计算时间,忽略通信时间、信号生成时间等),结果如图 6 所示。



图 4 部分程序代码

Fig. 4 Some program codes

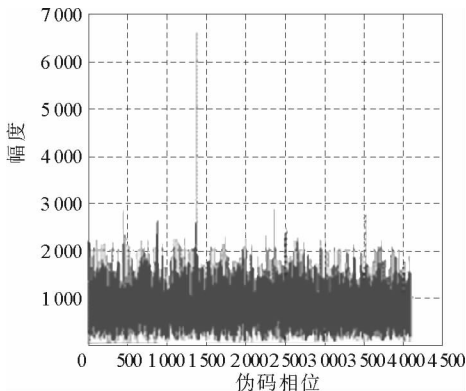


图 5 相位捕获结果

Fig. 5 The result of phase capturing

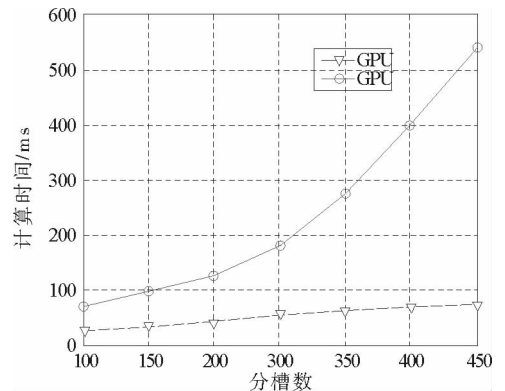


图 6 捕获时间对比

Fig. 6 The comparison of capture time

利用 GPU 进行 400 路 4 096 数据点的并行计算,时间可以控制在 200 ms 内。当数据量较大时,并行运算速度约为串行的 10 倍。在进行临近空间高超声速目标检测时,可以适当增加并行通道数,提高捕获精度。利用 GPU 可以在满足一定精度的前提下快速完成高动态回波信号捕获,充分保证目标探测的实时性。

## 5 结束语

临近空间高超声速目标的特殊性对探测系统的实时性提出特殊要求,当扩频探测信号的伪码周期较长时,无论是基于 FPGA 的硬件信号检测和参数估计方案,还是常规的软件方案,都难以满足快速发现和跟踪目标的要求。GPU 具有高度并行化、多线程多核的硬件结构特点,分析和实际测试表明,将其应用于临近空间高动态回波信号的检测和参数初步估计,可以实现临近空间高动态回波信号的实时捕获,进而完成目标的快速检测与参数估计。

### 参考文献:

- [1]唐志华. 基于临近空间的目标探测及宽带通信[J]. 无线电工程, 2007, 37(11): 28-45.  
Tang Zhihua. Target acquisition and broadband communication based on near-space vehicles[J]. Radio Engineering of China, 2007, 37(11): 28-45.
- [2]Domingo M, Rivas F, Perez J, et al. Computation of the RCS of complex bodies modeled using NURBS surfaces[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 1995, 37(6): 36-47.
- [3]宫健, 王春阳, 李为民, 等. 临近空间双基地雷达对隐身目标的最大探测距离[J]. 制导与引信, 2008, 29(3): 53-56.  
Gong Jian, Wang Chunyang, Li Weimin, et al. Maximum detection range of near space bistatic radar for anti-stealth[J]. Guidance and Fuze, 2008, 29(3): 53-56.
- [4]肖松, 谭贤四, 王红, 等. 国外临近空间高超声速飞行器探测系统研究[J]. 飞航导弹, 2012(6): 28-31.  
Xiao Song, Tan Xiansi, Wang Hong, et al. Study on overseas near space hypersonic aircraft detection system[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(6): 28-31.
- [5]廖玉忠, 刘付显. 临近空间双基地雷达抗干扰能力分析[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(5): 36-40.  
Liao Yuzhong, Liu Fuxian. Anti-jamming capability analysis for nearby space bistatic Radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(5): 36-40.
- [6]关欣, 赵静, 何友. 临近空间高超音速飞行器跟踪技术[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(8): 4-6.  
Guan Xin, Zhao Jing, He You. Track technology of hypersonic aircraft in near space[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(8): 4-6.
- [7]张舒, 褚艳丽, 赵开勇, 等. GPU 高性能运算之 CUDA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 1-10.
- [8]Moreland K, Angel E. The FFT on a GPU[C]//Proceedings of Graphics Hardware. San Diego, 2003: 112-119.
- [9]陈源, 王元钦, 刘莹. 基于 GPU 加速的扩频信号捕获方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(2): 240-245.  
Chen Yuan, Wang Yuanqin, Liu Ying. Acquisition method with spread spectrum technique based on GPU acceleration[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(2): 240-245.

(责任编辑: 吕文红)