

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.007

# GPS 信号的捕获算法研究与硬件实现

杨国伟, 张多利, 王宇

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**文章在平均相关捕获算法和渐进码相位捕获算法的基础上,优化粗/细捕方式,提出平均渐近法进行细捕获。改进的捕获算法在粗捕获时只使用单个序列对载波频率进行搜索,粗捕获成功后进行细捕获;细捕获时先根据平均渐近法选取序列再进行相关处理,既能保证码相位精度又减少了计算量;基于改进捕获算法设计并行展开结构的频域捕获器,并在 Xilinx Virtex-7 现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)上完成其硬件实现。实测结果表明:当接收机采样频率为 16.368 MHz 时,改进捕获算法相较于现有捕获算法计算量减少了 43.53%;设计实现的改进型捕获器单颗卫星捕获用时小于等于 2.88 ms,可以实现快速有效的信号捕获。

**关键词:**平均相关;快速捕获;载波频率;全球定位系统(GPS);现场可编程门阵列(FPGA)

**中图分类号:**TN47 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)04-0475-07

## Research and hardware implementation of GPS signal acquisition algorithm

YANG Guowei, ZHANG Duoli, WANG Yu

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Based on the average correlation acquisition algorithm and the progressive code phase acquisition algorithm, this paper optimizes the coarse/fine acquisition method, and proposes the average asymptotic method for fine acquisition. The improved algorithm only uses a single sequence to search for the carrier frequency during coarse acquisition, and performs fine acquisition after successful coarse acquisition. When acquiring finely, the sequence is selected according to the average asymptotic method and then processed, which not only ensures the accuracy of the code phase, but also reduces the amount of computation. When the receiver sampling frequency is 16.368 MHz, the improved acquisition algorithm achieves a 43.53% reduction in computation compared to the existing acquisition algorithm. Based on the improved acquisition algorithm, a frequency domain acquirer with parallel unfolding structure is designed, and its hardware implementation is completed on the Xilinx Virtex-7 field programmable gate array(FPGA). The result shows that the acquisition time of the frequency domain acquirer for a single satellite is less than or equal to 2.88 ms, enabling fast and effective signal acquisition.

**Key words:** average correlation; fast acquisition; carrier frequency; global positioning system(GPS); field programmable gate array(FPGA)

## 0 引言

全球定位系统(global positioning system,

GPS)是由美国开发的卫星导航系统<sup>[1]</sup>,目前 GPS 接收机已广泛应用于民用技术、科学研究和军事领域。GPS 接收机基带信号处理过程中的捕获

收稿日期:2023-04-28;修回日期:2023-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61874156);安徽省高校协同创新资助项目(GXXT-2019-030)

作者简介:杨国伟(1996—),女,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

张多利(1976—),男,黑龙江七台河人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: zhangduoli@hfut.edu.cn.

模块<sup>[2]</sup>需要快速且正确捕获到 GPS 信号。对于单颗卫星来说,捕获需要完成载波频率与码相位的二维搜索<sup>[3]</sup>,该阶段会消耗大量软硬件资源。降低捕获阶段的计算量、减少捕获时间是信号捕获的关键问题<sup>[4]</sup>。

文献[5]基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)提出频率/码并行的频域捕获算法,将时域的相关运算转化为频域的乘法运算,减少了二维搜索次数使捕获速度提高。该算法提出之后迅速成为了 GPS 信号快速捕获的核心,但由于捕获过程中引入 FFT 运算,大大增加了相关处理的复杂度。目前已有大量针对该算法 FFT 复杂度较高问题的研究。文献[6]基于频率并行捕获算法对数据进行下采样处理以降低 FFT 的处理点数,相较于频率并行捕获而言计算量大幅减少。

然而频率并行捕获算法二维捕获次数是码并行捕获算法的 49 倍以上<sup>[7]</sup>,因此大多研究以码并行捕获算法为研究对象。基于码并行捕获算法,文献[8]提出将 GPS 中频信号分解为 3 个部分,通过融合算法得到相关结果,在不损失捕获精度的情况下减少了捕获时间和资源消耗;文献[9]提出平均相关捕获算法,根据起始地址不同将 GPS 中频信号分为多个序列后再进行捕获,相关处理过程中对数据下采样处理,降低 FFT 复杂度的同时保证了码相位精度不变,然而该算法的整体计算量并未减少。为减少平均相关捕获算法的相关处理次数,文献[10]提出优化的峰值检测算法,根据第 1 个序列的预捕获结果决定是否进行后续序列的捕获,减少了载波频率维度的相关处理次数;文献[11]提出粗、细捕结合的捕获算法,根据 2 个序列的粗捕获结果进行细捕获,截取部分伪码进行相关处理,保证在捕获精度基本不变的情况下降低计算量,相较于文献[10]算法降低了细捕获的计算量但增加了粗捕获的相关处理次数。以上捕获算法从降低 FFT 复杂度角度做出了许多改进,但总体计算量下降有限。

针对上述问题,本文提出一种改进捕获算法,降低粗捕获相关处理次数的同时,采用平均渐近法优化细捕获方式,从而减少计算量。采样频率为 16.368 MHz 时,本文算法比文献[11]算法节省 43.53% 以上的计算量,且计算量增幅随着采样点数的增多而降低;设计并硬件实现的频域捕获器捕获速度为文献[11]的 7.42 倍。

## 1 平均相关捕获算法原理

单颗卫星的 GPS 中频信号模型<sup>[11]</sup>为:

$$S(t) = A_c C_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_{L1}) + n(t) \quad (1)$$

其中: $A_c$  为 GPS 卫星的信号振幅; $C_i(t)$  为第  $i$  颗卫星的 C/A 码; $D_i(t)$  为第  $i$  颗卫星的导航电文; $f_c$  为卫星中频载波频率,该频率包含卫星接收信号的中心频率与相对运动产生的多普勒频移<sup>[12]</sup>; $\varphi_{L1}$  为载波的起始相位; $n(t)$  为加性高斯白噪声。

设接收机采样频率为  $f_s$ , 相关时间  $T = 1 \text{ ms}$ , 则相关长度为:

$$N = T f_s \quad (2)$$

即在相关时间内输入中频信号共有  $N$  个采样点。平均相关捕获算法在相关处理过程中将  $N$  点的输入中频信号下采样至 1 024 点,由于  $N/1\,024$  不一定是整数,采样时可根据下式计算需要几点累加,即

$$\begin{cases} A + B = 1\,024, \\ AM + BO = N \end{cases} \quad (3)$$

其中: $M$  为  $N/1\,024$  向上取整值; $O$  为  $N/1\,024$  向下取整值; $A$  为相邻数据进行  $M$  值累加的次数; $B$  为相邻数据进行  $O$  值累加的次数。下采样时 2 种累加均匀分布在输入中频信号中。

输入中频信号的起点不一定是首个 C/A 码码片的第 1 个采样点,因为 C/A 码是一种循环序列,所以前  $M$  个输入中频信号中必定有 1 个采样点是首个码片的第 1 个采样点。根据起点不同将输入中频信号分为  $M$  组序列,每组序列包含  $N$  个点数据,如图 1 所示,其中存在 1 组序列与 C/A 码有最大相关值(即该组序列能够很好地近似 C/A 码)。

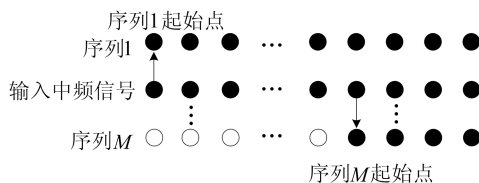


图 1 序列示意图

$M$  组序列分别作为输入数据进行相关处理,处理过程如图 2 所示。具体步骤如下:

1) 由载波发生器产生两路正交的本地载波信号,分别与输入中频信号相乘后得到两路变频信号。

2) 两路变频信号分别下采样至 1 024 点后合并为复数进行 FFT 变换,得到 GPS 信号 FFT 结果。

3) C/A 码发生器产生本地 C/A 码,经下采样得到 1 024 点本地码,对该本地码进行 FFT 变换后取共轭,得到本地信号共轭结果。

4) GPS 信号 FFT 结果与本地信号共轭结果相乘后进行反快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)得到相关结果,对该结果取模平方得到最终的相关值。

5) 对该相关值进行峰值检测,得到相关结果的最大值(记为相关峰值  $P_{max}$ )、最大值位置(记为峰值相位  $C_{code}$ )和次大值,计算相关峰值与次大值的比值  $R_{ratio}$ ,输出  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $R_{ratio}$ 。

若  $R_{ratio} > 2^{[13]}$  则说明捕获到信号,对比该载波频率下  $M$  组序列的相关峰值并选出其中最大值,该最大相关峰值对应的码相位即为命中的码相位,此时结束该颗卫星的捕获,捕获的码相位精度为 1 个采样点;若  $R_{ratio} < 2$  则调整载波发生器的载波频率,重复上述相关处理过程,直到该颗卫星的载波频率搜索完毕。

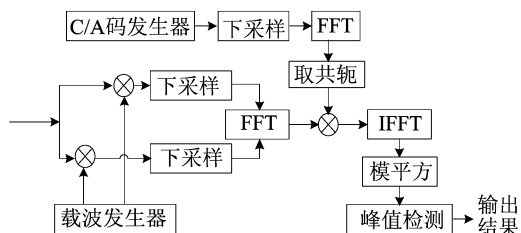


图 2 相关处理过程

## 2 改进捕获算法的研究

### 2.1 序列相关特性

若接收机的采样频率为 16.368 MHz,则 1 ms 相关时间内输入中频信号共有 16 368 个采样点。单颗卫星多普勒频移范围为  $[-5, 5]$  kHz,搜索步长为 500 Hz,共有 21 个频点需要搜索,将实际载波频率设置在第 7 个频点。

基于 MATLAB 搭建平均相关算法软件模型,不同频点下 16 个序列的相关峰值如图 3 所示。

从图 3 可以看出,本地载波频率命中时,16 个序列的相关峰值均大于<sup>[9]</sup>其余频点下的相关峰值。

每个序列的首个下采样位置不同,因此输入中频信号与本地 C/A 码的相关性不同。本地载

波频率命中时 16 个序列的相关峰值差异如图 4 所示。

从图 4 可以看出,16 个相关峰值存在一个最大值,并且整体趋势呈现出单峰单谷特性。

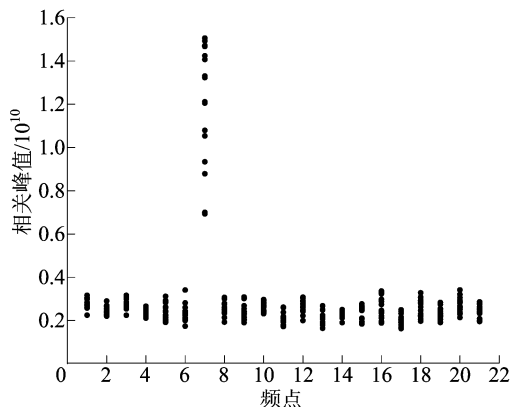


图 3 不同频点下 16 个序列的相关峰值

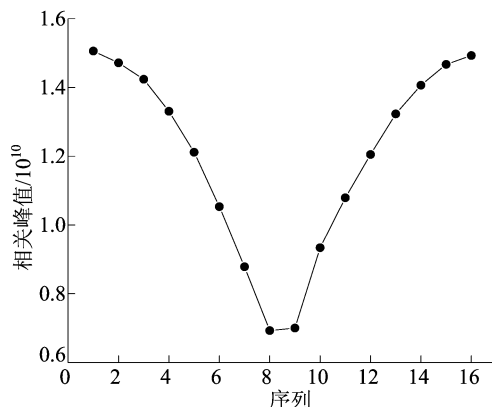


图 4 本地载波频率命中时 16 个序列的相关峰值

### 2.2 改进捕获算法

本文提出的改进捕获算法分为粗捕获和细捕获 2 个阶段。

#### 2.2.1 粗捕获

根据载波频率命中时  $M$  组序列均有较大相关峰值的特性,任意选取  $M$  组序列中的单个序列作为粗捕获的输入(下文以选取的第 1 个序列为例进行设计)。

针对载波频率进行搜索的过程如下:进行如图 2 所示的相关处理,得到该序列的  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $R_{ratio}$ ;若  $R_{ratio} > 2$ ,则输出当前的载波频率  $f_0$ 、 $P_{max}$ 、 $C_{code}$  和序列号(记为  $X$ )作为第 1 轮细捕获的输入,并进入细捕获过程,此时码相位精度为 1 个码片;若  $R_{ratio} < 2$ ,则调整载波发生器的载波频率重复这一过程,直到搜索完该颗卫星下的全部频点。

2.2.2 细捕获

根据载波频率命中时相关峰值的单峰单谷特性,采用平均渐近法搜索相关峰值最大的序列,该方法无需对全部  $M-1$  组序列进行相关处理便可找到相关峰值最大的序列,进而找到命中的码相位。

设细捕获的载波频率为粗捕获的输出  $f_c$ ,平均渐近法的步骤如下。

1) 第 1 轮细捕获时根据粗捕获的输出设置  $P_{max}$ 、 $C_{code}$  和  $X$  的初始值。

2) 基于步长公式计算需要选取序列的范围,以序列  $X$  为中心,以  $L$  为步长选取序列  $X-L$  和序列  $X+L$ ,序列选取方式示意图如图 5 所示。步长公式为:

$$L = \lceil \frac{M}{3} \times (\frac{1}{2})^{k-1} \rceil \quad (4)$$

其中: $L$  为步长,其值为向上取整; $M$  为序列组数; $k$  表示当前处于第  $k$  轮细捕获。

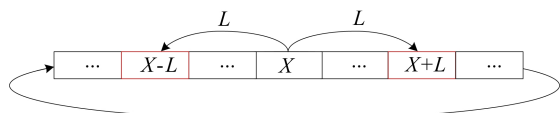


图 5 序列选取方式示意图

3) 序列  $X+L$  和序列  $X-L$  作为两路输入数据,分别进行如图 2 所示的相关处理,得到相关峰值  $P_{max1}$  和  $P_{max2}$ ,根据  $P_{max1}$ 、 $P_{max2}$ 、 $P_{max}$  中的最大值更新  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $X$ 。

4) 判断当前步长是否为 1;若不为 1 则返回步骤 2) 开始下一轮细捕获;若为 1 则按式(5)计算命中的码相位  $\tau$ ,与  $f_c$  一同作为捕获结果输出,并结束该颗卫星的捕获,此时码相位精度为 1 个采样点,即

$$\tau = MC_{code} + X - 1 \quad (5)$$

上述过程中  $X$  的取值范围为  $1 \sim M$ 。 $X-L$  为以序列  $X$  为中心向左选取序列,若  $X-L < 1$ ,则实际选取序列为  $X-L+M$ ; $X+L$  为向右选取序列,若  $X+L > M$ ,则实际选取序列为  $X+L-M$ 。

综上可知本文提出的改进捕获算法主要改进如下:首先,粗捕获时仅使用 1 个序列来搜索载波频率,大幅减少了载波频率维度的相关处理次数;其次,细捕获时采用平均渐近法选取序列,减少了码相位维度的相关处理次数,进一步地减少了计算量。

2.3 算法分析

文献[6]、文献[8]、文献[11]和本文提出的改

进捕获算法这 4 种捕获算法的计算量对比如图 6 所示。其中:横坐标为 1 ms 相关时间内包含的采样点数  $N$ ,由接收机采样频率决定;纵坐标为各捕获算法的计算量;FFT 与 IFFT 均按基 4 模式进行分析。

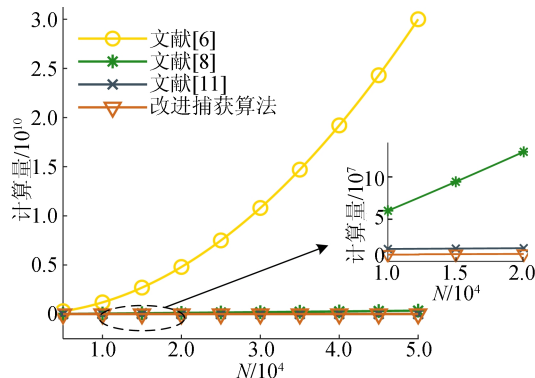


图 6 4 种捕获算法计算量对比

采样频率为 16.368 MHz 时,4 种捕获算法的计算量对比见表 1 所列。

表 1 16.368 MHz 采样频率下 4 种捕获算法的计算量对比

捕获算法	计算量	优化百分比/%
文献[8]	3 215 980 000	99.73
文献[6]	103 770 000	91.68
文献[11]	15 282 752	43.53
改进捕获算法	8 629 488	

从表 1 可以看出,相较于现有捕获算法,本文改进捕获算法至少优化了 43.53% 的计算量,且计算量增幅随着采样点数的增加而降低。

3 频域捕获器设计方案

3.1 整体架构

本文设计的频域捕获器整体结构如图 7 所示。

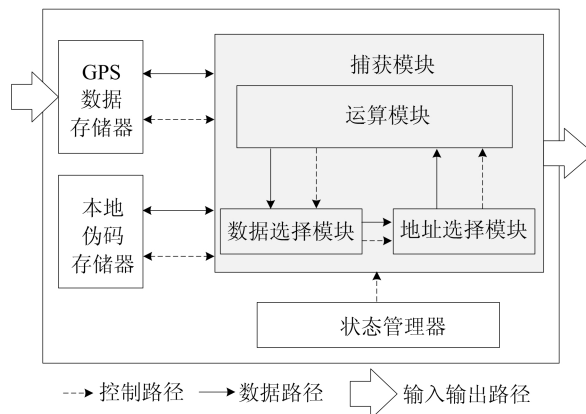


图 7 频域捕获器整体结构

频域捕获器整体结构主要由捕获模块、状态管理器、GPS 数据存储器和本地伪码存储器组成,其中捕获模块包括运算模块、数据选择模块和地址选择模块。

频域捕获器的工作流程分为 3 个阶段:

1) 输入接口接收输入中频数据并存储到 GPS 数据存储,接收完成后状态管理器控制捕获模块开启工作。

2) 地址选择模块产生 GPS 数据存储器的读地址,存储器的输出数据写入运算模块,与顺序读取的本地伪码存储器的输出数据进行相关处理,根据相关结果更新数据选择模块的数据并进行步长判断。

3) 当满足步长等于 1 的条件时,输出捕获结果。

C/A 码序列 FFT 的共轭结果对于某颗卫星而言是固定的,可将其固化于本地伪码存储器中避免无效捕获。

状态管理器控制各模块的工作状态,当 GPS 数据存储中输入中频数据准备好时开始捕获,当捕获完成时控制数据选择模块输出捕获结果。

### 3.2 地址选择模块设计

本设计的捕获过程包括粗捕获和细捕获 2 个部分。粗捕获使用第 1 个序列进行相关处理,两路相关模块输入数据的起始地址与终止地址相同;细捕获中需要对不同序列进行相关处理,因此两路相关模块输入数据的起始地址不同。为节省存储空间,本设计通过地址选择模块计算数据的起始地址。两路输入数据的起始地址不同时,两路数据存在重合部分。计算步长  $L$  并根据其值计算出地址偏移量,从而得到两路运算模块输入数据的起始地址与结束地址。

### 3.3 运算模块设计

运算模块结构如图 8 所示。采用并行展开结构对捕获过程进行加速,包括数据读取模块和两路并行的相关模块。其中单路相关模块包括多个子模块,分别为下变频模块、下采样模块、FFT、复数乘法模块、IFFT 和峰值检测模块。

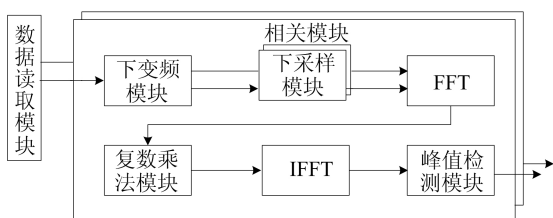


图 8 运算模块结构

数据读取模块接收存储器发送的输入中频数据,根据地址选择模块提供的两组起始地址和结束地址,将该数据分为两路进行相关处理。两路数据的读取是并行的但存在时序偏移,该偏移与偏移地址直接相关,这一设计避免了并行计算带来的存储资源的倍增。

读取 GPS 数据存储器的同时,下变频模块产生本地载波信号与输入信号混频,两路混频结果写入下采样模块进行处理。

上述 3 个模块间采用流水结构,隐藏了下变频与下采样的计算时间。

本设计中 FFT 与 IFFT 使用 Xilinx 的 FFT IP 核,并选择基 4 模式进行计算。下采样模块输出的两路下采样结果分别作为 FFT 的实部与虚部输入,FFT 计算输出的同时进行本地伪码的读取,写入复数乘法模块进行计算。

峰值检测模块计算 IFFT 结果的模平方和,输出  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $R_{ratio}$ 。该模块与 IFFT 间采用流水结构,实时得到峰值检测模块的输出结果。

### 3.4 数据选择模块设计

由数据选择模块分别判断两路载波频率是否命中。根据判断结果和两路峰值检测模块的输出更新  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $X$  并计算下轮捕获的载波频率,粗捕获时  $P_{max}$ 、 $C_{code}$ 、 $X$  保持不变,细捕获时载波频率保持不变。

计算完成后判断步长是否等于 1;若不等于 1 则仍需进行捕获,由状态管理器控制地址选择模块启动,根据更新的  $X$  选取序列进行新一轮的捕获;若等于 1 则说明细捕获结束,根据式(4)计算并输出最后的码相位结果。

## 4 实验验证及分析

### 4.1 算法验证

本文基于 MATLAB 平台对改进捕获算法进行相关时间为 1 ms 的捕获仿真。仿真参数见表 2 所列。

表 2 仿真参数

参数	数值
采样频率/MHz	16.368 0
中频频率/MHz	4.130 4
多普勒频移搜索范围/kHz	$[-10, +10]$
多普勒搜索步长/Hz	500
多普勒频移/Hz	-3 957
码相位偏移/chip	413
信噪比/dB	-19

采用式(1)所示的 GPS 中频信号模型产生仿真数据,为使每个序列的数据量相同,产生了 2 ms 的 1 号卫星 GPS 中频信号。其中:信号振幅为  $-160$  dBW; $i$  取值为 1; $D_i(t)$  取值为 1;载波的起始相位  $\varphi_{L1}$  为 0。

本文改进捕获算法捕获结果如图 9 所示。图 9a 所示为粗捕获搜索频点的情况,并展示了在第 13 个频点的相关结果;图 9b 所示为细捕获过

程中码相位的捕获情况;图 9c 所示为第 14 个序列的三维捕获结果。

从图 9 可以看出,第 13 个频点下相关峰值远远高于其他频点下的相关峰值,在第 13 个频点捕获到了该卫星。在该频点进行细捕获,第 4 轮细捕获确定第 14 个序列存在最大相关峰值,命中的码相位为 413,载波频率为 4.126 4 MHz,与设定值相同,成功实现捕获。

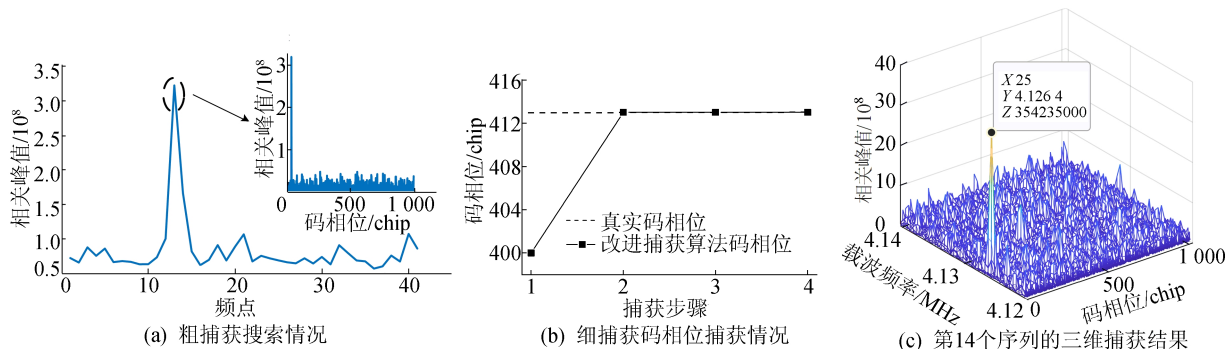


图 9 改进捕获算法捕获结果

在不同信噪比环境下进行 1 000 次捕获概率测试,改进捕获算法的捕获成功概率如图 10 所示。

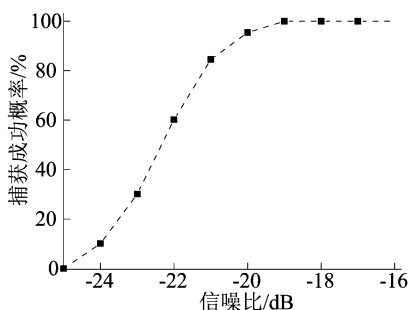


图 10 不同噪声环境下的捕获成功概率

从图 10 可以看出,噪声强度越弱,捕获成功

概率越高,改进捕获算法在信噪比高于室外中仰角(信噪比为  $-19$  dB)的环境下捕获成功概率达到 100%。

#### 4.2 改进型捕获器测试与性能分析

硬件实现是以 Vivado 2019.1 作为开发工具,采用 Xilinx 公司的 XC7K325TFFG900-2 芯片。以 MATLAB 平台产生的 1 号卫星 GPS 中频信号作为输入中频数据。

FPGA 捕获结果如图 11 所示。

图 11 中:1 处位置进行第 4 轮细捕获;在第 4 轮细捕获完成后于 2 处位置得到命中的码相位为 413;3 处位置输出的载波控制字为 1082768391,根据式(6)计算得到命中的载波频率为 4.126 4 MHz,与软件仿真结果相同,成功实现捕获。

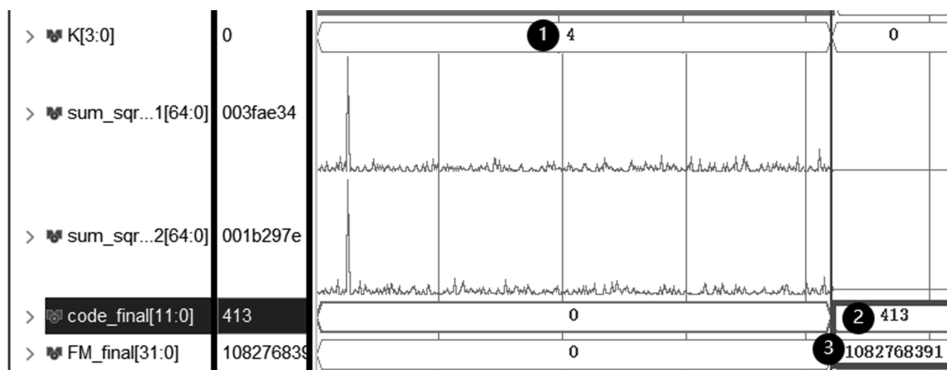


图 11 FPGA 捕获结果

更改输入中频信号进行100次实验,捕获正确概率为100%。

$$f_o = (F_M/2^{32})f_s \quad (6)$$

其中: $F_M$ 为频率控制字; $f_s$ 为采样频率。

本文设计的频域捕获器与文献[10]、文献[11]、文献[1]频域捕获器的资源消耗对比见表3所列。最大工作主频为180 MHz。文献[1]采用时域捕获算法,硬件资源消耗少但捕获速度慢;文献[10]和文献[1]采用平均相关捕获算法和单路硬件结构;本文基于改进捕获算法设计的频域捕获器,采用并行展开结构与模块间流水处理方式进行算法的硬件实现,资源消耗相比现有文献有所增加,但捕获速度提升较高。

由表3可知,在采样点数相同的情况下,本文频域捕获器捕获速度比文献[10]提高了3.29倍,比文献[11]捕获速度提高了7.42倍,相比文献[1]捕获速度提高了88.89倍。

表3 GPS频域捕获器硬件性能的对比

文献	文献[10]	文献[11]	文献[1]	本文
Slices	6 983	17 563	1 728	25 868
DSP		52	12	132
BRAM	95	82	192	105
2个频率捕获所需要的周期数	69 024			20 986
单颗卫星捕获时间/ms		21.37	256.00	2.88

## 5 结 论

本文针对GPS信号快速捕获问题,对粗/细捕方式进行优化,使用单个序列进行载波频率维度的粗捕获,同时采用平均渐近法以降低序列的相关次数,计算量相较于现有捕获算法至少优化了43.53%;此外实现了该改进捕获算法的硬件设计,采用并行展开结构与模块间流水处理加速捕获过程,本文设计实现的频域捕获器单颗卫星的捕获时间小于等于2.88 ms,可以实现快速有效的信号捕获。

## [参 考 文 献]

- [1] KESHIHAA RUDRA GANA DEV V, RANJAN G. An optimized FPGA architecture for GPS signal acquisition[C]//2022 IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology(GCAT). [S. l.]:IEEE,2022:9972099.
- [2] LU Y. A fast GPS signal acquisition method based on fuzzy logic[C]//3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering. [S. l.]:IEEE,2020:89-92.
- [3] HE G, SONG M, SONG P. GPS signal acquisition based on compressive sensing [C]//18th International Conference on Communication Technology. [S. l.]:IEEE,2018:1013-1016.
- [4] 顾建华,严国军,杨久东. GPS软件接收机信号快速捕获新方法[J]. 火力与指挥控制,2019,44(6):67-71.
- [5] VAN N D J R, COENEN A. New fast GPS code-acquisition technique using FFT[J]. Electronics Letters,1991,2(27):158-160.
- [6] 高唱,陈则王,曾庆喜,等. 基于FPGA+DSP的北斗信号快速捕获算法设计与实现[J]. 河北科技大学学报,2020,41(6):477-485.
- [7] 陈冲. GPS捕获算法及中频信号采样器的研究与实现[D]. 南京:东南大学,2012.
- [8] ZENG Q X, ZHANG P N. The fast acquisition algorithm for intelligent vehicle software receiver based on divided FFT[C]//2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence. [S. l.]:IEEE,2016:598-602.
- [9] ALAQEELI A, STARZYK J, VAN G F. Real-time acquisition and tracking for GPS receivers[C]//Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems. [S. l.]:IEEE,2003:1205933.
- [10] 汪宿梁,毛志刚,谢憬. 基于GPS预捕获的算法研究及硬件实现[J]. 微电子学与计算机,2009,26(6):105-108,113.
- [11] 陈蒙琪. GPS基带信号捕获算法的研究和FPGA实现[D]. 济南:山东大学,2020.
- [12] 程向红,徐文杰. 一种低运算量GNSS接收机快速捕获方法[J]. 中国惯性技术学报,2022,30(2):168-173.
- [13] 李新山,郭伟. GPS信号C/A码快速精密捕获技术研究[J]. 计算机应用研究,2014,31(4):1131-1134.

(责任编辑 胡亚敏)