

# GLONASS 捕获系统中 FFT 核复用关键问题<sup>①</sup>

耿建平<sup>1</sup>, 朱剑飞<sup>1</sup>, 纪元法<sup>2</sup>, 孙希延<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

<sup>2</sup>(桂林电子科技大学 应用科技学院, 桂林 541004)

<sup>3</sup>(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004)

**摘要:** 根据 GLONASS 卫星信号组成和特性及其伪码捕获原理, 运用并行码相位捕获算法在 MATLAB 环境下完成 GLONASS 卫星信号的捕获仿真, 同时根据 MATLAB 下建立的仿真平台, 设计了基于此方法的 FPGA 具体实现电路; 为了满足 FFT 运算点数的要求, 采用数据 Sinc 内插滤波器对数据进行精确内插, 将输入的 62000 点数据内插为 4096 点, 同时为了复用 FFT 核, 分别采用了加快 C/A 码读取速度的方法、运用状态机的状态值加上数据指数项的数据截位方法; 最后通过 Xilinx 的 ISE 软件调用 Modelsim 对整个捕获模块进行仿真. 仿真结果表明: 该系统实现了 GLONASS 信号的捕获, 满足了接收机系统功能和性能的要求, 可直接用于 GLONASS 实时接收机系统的设计中.

**关键词:** GLONASS; 并行码相位搜索捕获; FFT 核; FPGA

## Critical Problems about FFT Core Reuse in GLONASS Acquisition System

GENG Jian-Ping<sup>1</sup>, ZHU Jian-Fei<sup>1</sup>, JI Yuan-Fa<sup>2</sup>, SUN Xi-Yan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

<sup>2</sup>(School of Applied Science and Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

<sup>3</sup>(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** According to the characteristics of GLONASS satellite signal and the principles of PR code acquisition, the acquisition of GLONASS signal using parallel code phase acquisition algorithm based on FFT are simulated in MATLAB, on the basis of simulation platform established in MATLAB, the FPGA implementation of GLONASS PR code signal acquisition system based on the parallel code phase acquisition is designed; Meanwhile, the Sinc data interpolation filter is used to implement the precise data interpolation to satisfy the demand for FFT transformation by interpolating the inputted 62000 points to 4096 points which is transferred to FFT-IFFT module, and in order to reuse the FFT core, the method of accelerating the read speed of the C/A code and the method of using the state value of the FSM and the exponent of the data to intercept the data bits are used. At last the whole acquisition module are verified by the simulation of Xilinx's ISE calling ModelSim software. The simulation results show that the system can acquire the GLONASS signal. It is concluded that the designed system can satisfy the requested function and performance of receiver system, and can be used in the real-time GLONASS receiver system.

**Key words:** GLONASS; Parallel code phase search acquisition; FFT core; FPGA

GLONASS(Global Orbiting Navigation Satellite System)是由前苏联(现由俄罗斯)国防部独立研制和控

制的第二代军用卫星导航系统, 该系统的潜在民用前景巨大, 而且与 GPS 互为补充. 俄罗斯目前正在着手

① 基金项目:国家重点基础研究发展技术计划(973)(2007CB815500);国家自然科学基金(60802018,61062003);广西高校优秀人才资助项目;桂林电子科技大学人才专项基金

收稿时间:2011-03-08;收到修改稿时间:2011-05-06

GLONASS 系统维护与更新建设工作, 应该密切关注 GLONASS 系统的不断完善和性能的改进, 更好地将其与应用技术整合起来, 以便更多更广泛地发展利用卫星导航系统.

GLONASS 卫星信号和 GPS 一样在特定的载波频率 L1 和 L2 子带上发送的导航信息是个二进制序列, 调制方式是 BPSK. 同样 GLONASS 也有载波 L1 子带和载波 L2 子带. 但是 GLONASS 采用的是频分多址技术, L1 和 L2 载波频率的标称值由如下表达式确定<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{L1 子带} \quad f_{k1} &= f_{01} + kDf_1, \\ \text{L2 子带} \quad f_{k2} &= f_{02} + kDf_2, \end{aligned}$$

其中 K 为 GLONASS 卫星发送的信号的频道通道, 在 L1 和 L2 子带内对应为:

$$\begin{aligned} f_{01} &= 1602 \text{ MHz}; & Df_1 &= 562.5 \text{ kHz} \\ f_{02} &= 1246 \text{ MHz}; & Df_2 &= 437.5 \text{ kHz} \end{aligned}$$

在伪随机码上 GLONASS 和 GPS 也有一定的差异, GPS 的伪随机码是 GOLD 码, 是两个 M 序列的模二加, GLONASS 的 PR 测距码是周期为 1ms 和频率为 511KHZ 的 M 序列, 是 9 级移位寄存器的第七级输出处的采样<sup>[2]</sup>. 生成该序列的初始化矢量是(11111111), 对应的 9 阶移位寄存器所生成的多项式为  $G(x) = 1 + X^5 + X^9$ .

为了跟踪和解码 GLONASS 信号, 首先要捕获到信号. 将捕获到的 GLONASS 信号的必要参数立刻传递给跟踪过程, 再通过跟踪过程便可得到卫星的导航电文<sup>[3]</sup>. GLONASS 信号捕获主要涉及两个参数: C/A 码的起始点和载波频率, 主要的算法有: 时域滑动相关捕获和 FFT 频域捕获算法. 由于时域滑动相关捕获速度比较慢, 所以本文直接阐述捕获速度比较快的并行码相位捕获.

### 1 捕获算法原理及其MATLAB仿真

卫星信号捕获是利用伪随机码良好的相关特性, 检测本地 C/A 码和卫星信号伪随机码的相关输出的过程.

假设输入信号为  $S(t) = C_s(t)e^{j2pft}$ , 其中  $C_s(t)$  为卫星的 C/A 码序列,  $e^{j2pft}$  为卫星信号载波, 同时设本地产生的 C/A 码为  $C_l(t)$ , 本地载波为  $e^{j2p(f+f_d)t}$ , 则信号捕获的过程可以近似的表示为<sup>[4]</sup>:

$$Z(t, f_d) = S(t) * e^{j2p(f+f_d)t} * C_l(t)$$

当输入信号的 C/A 码相位及其载波频率和本地产生的 C/A 码和载波匹配时,  $Z(t, f_d)$  有相关峰, 并且超过门限, 则表示信号已经捕获, 时域滑动相关捕获算法简单, 但是由于每次都只搜索一个搜索单元, 假设二维搜索范围包括 A 个搜索频带和 B 个搜索码带, 共计  $A*B$  个搜索单元, 如果二维搜索中的任何一维能被剔除, 那么信号搜索速度必将会大幅度提高<sup>[5]</sup>. 本文主要讨论在二维搜索中剔除一维的并行码相位搜索捕获算法, 并行码相位搜索捕获算法可将 B 次码相位搜索通过傅立叶变换一次性完成, 从而使搜索次数由时域二维搜索捕获算法的  $A*B$  次急剧的减少至只在频率一维内的 A 次搜索<sup>[6]</sup>. 并行码相位信号捕获流程图如下:

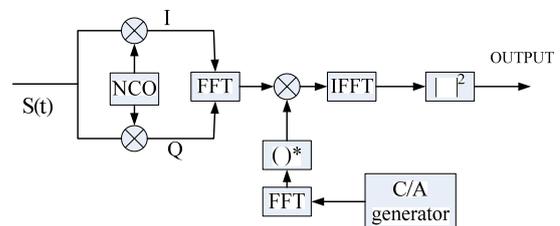


图 1 信号捕获流程图

按照上面的捕获算法流程, 对 1ms 的 GLONASS 数据用 MATLAB 对其进行了仿真. 本文采用中心频率为  $f_c=4.2\text{MHz}$ , 信号的多普勒频移为 1KHZ, 卫星 C/A 码频率为 511KHZ, 采样频率为 62MHz, 捕获时采用 1ms 的数据, 码元总数为 511, 数据点数有 62000 个点.

仿真结果如下:

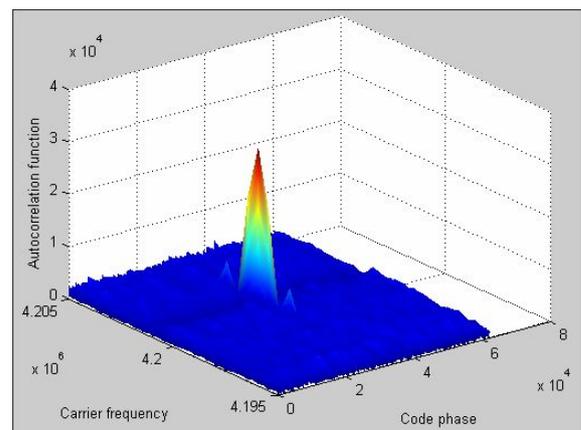


图 2 MATLAB 仿真结果

### 2 基于FPGA的伪码捕获电路

根据 MATLAB 下建立的仿真平台, GLONASS 伪

码捕获电路 FPGA 实现电路可由时钟模块, 内插模块, FFT-IFFT 模块, 累加模块等部分组成. 其基本框图如下所示:

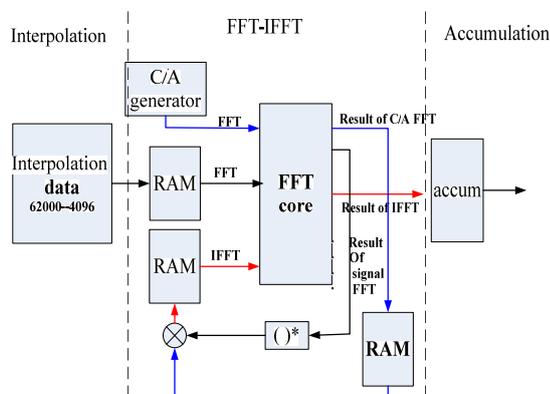


图 3 伪码捕获电路的 FPGA 实现

由图 3 所示的伪码捕获电路可知 FFT 核完成的工作如下: 本地 C/A 码的 FFT、信号内插后数据的 FFT、信号数据 FFT 结果的共轭与本地 C/A 码 FFT 结果的复数乘法结果的 IFFT 运算, 所以为了节省 FPGA 有限的资源, 同时又不影响系统的要求, 本文在使用 FFT 核时基本参数如下: 输入数据位宽为 16 位, 结构选用基-4 Burst 结构, FFT 运算点数为 4096 点. 下面将对 GLONASS 信号 FFT、本地 C/A 码 FFT 和复数乘法结果的 IFFT 运算在 FFT 核复用时候的几个关键问题进行研究及其实现.

### 2.1 信号 FFT 前的 Sinc 数据内插

首先由于系统采样频率是 62MHZ, 所以 1ms 的数据点数有 62000 点, 而 FFT 核采用的 FFT 点数为 4096 点, 为了满足 FFT 运算数据点数的要求, 通常有补零法、线性内插法、Sinc 内插法、平均相关法等. 本文采用的是 Sinc 内插法, 相比其他方法, Sinc 内插法的伪码失真很小, 在信噪比较低的情况下仍能工作.

根据 Sinc 内插法的原理定义: 首先信号采样值用一个截至频率为 1/2 采样频率的 Sinc 滤波器对输入数据进行内插, 恢复原始连续信号, 然后以新的采样频率进行重采样, 注意新的采样频率需为 2 的整数次幂, 可以用如下公式表示<sup>[7]</sup>:

$$x(kT_{resample}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_s) \frac{2\Omega_a}{\Omega_s} \cdot \frac{\sin(\Omega_a(kT_{resample} - nT_s))}{\Omega_o(kT_{resample} - nT_s)}$$

其中  $T_{resample}$  为重采样的采样周期, 则  $x(kT_{resample})$  为

重采样后的一个点, 也就是 4096 点中的一个点, 同样  $x(nT_s)$  为信号重采样前的 62000 点中的一个点,

$$\frac{2\Omega_a}{\Omega_s} \cdot \frac{\sin(\Omega_a(kT_{resample} - nT_s))}{\Omega_o(kT_{resample} - nT_s)}$$

为系数值,

$\Omega_a = 2\pi f_{resample}$ ,  $\Omega_s = 2\pi f_s$ , 因为此系数值有周期性, 并不需要把全部的值都计算出来, 本文在具体实现时, 取  $n=8$  点, 将各个需要计算的

$$\frac{2\Omega_a}{\Omega_s} \cdot \frac{\sin(\Omega_a(kT_{resample} - nT_s))}{\Omega_o(kT_{resample} - nT_s)}$$

系数函数通过 MATLAB

计算出值, 然后存储在 FPGA 的 ROM 核中. 系数 ROM 核深度为 4096, 因每个系数位宽为 16, 所以宽度为 128.

信号首先与载波 NCO 相乘, 完成信号的下变频, 接着把相乘的结果 I 路和 Q 路延时 8 个时钟, 分别与 8 个系数相乘, 由于  $62000/4096=15.13$ , 本文采用 MATLAB 算出 62000 点下采样到 4096 点时采样点的位置, 然后把这个数据当作上面 ROM 核存储系数的地址的使能, 也就是说 MATLAB 算出来采样点的位置的数据为 0 或者 1, 存储在 ROM 核中, 当为 0 的时候, 系数的地址不变, 当为 1 的时候系数的地址加 1, 地址总数为 4096, 完成系数与延时数据的乘法运算后, 根据上述公式的推导, 接着将 8 个数据进行累加, 最后将累加完的数据根据地址存入 RAM 中, 这样就成功完成数据内插的过程. 下图为内插过程分析图:

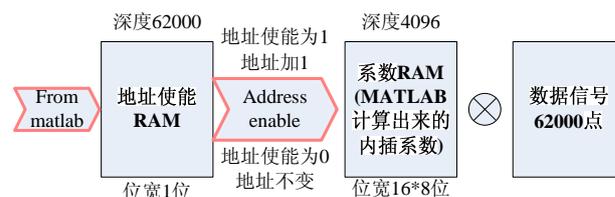


图 4 内插过程分析图

上述模块通过 Modelsim 仿真如图 7 所示, jump\_judge\_addr 即为 MATLAB 生成的存储在 ROM 中系数地址使能的地址, dpram\_we 为系数地址使能的输出, signal\_write\_addr 为将 insert 模块输出的结果存储在 RAM 中的地址信号, signal\_write\_data\_real 和 signal\_write\_data\_imag 分别为模块输出的实部和虚部; 由图可知, 当系数地址使能的输出 dpram\_we 为 0 的时

候, signal\_write\_addr 没有变化(一直为 4094), 当 dpram\_we 置 1 时, signal\_write\_addr 加 1(4095), 此时 jump\_judge\_addr 的地址为 61999, 1ms 数据点数内插结束, 存入 RAM 中。

### 2.2 本地 C/A 码 FFT 问题

信号与载波 NCO 通过乘法器完成信号下变频后, 经过内插模块处理后将处理完的 4096 点数据存在 RAM 核中, 接着送入 FFT 核中进行数据的 FFT 处理, 在此之前, 根据伪码捕获电路的 FPGA 实现, 本地 C/A 码同样需要经过 FFT 核进行 FFT 运算, 本地生成的 C/A 码速率为 0.511MHZ, 系统 62MHZ 的时钟采样, 1 个周期有 62000 点, 但是又不能运用内插处理, 一是 FPGA 资源有限, 这样处理会比较浪费资源, 第二个是操作也比较麻烦, 也不能实现; 本文运用了加快 C/A 码读取速度的方法。

在生成本地 C/A 码的时候, 采用查表法来生成 C/A 码数据, 首先用 MATLAB 产生 C/A 数据存储在 ROM 中, 然后 FPGA 通过相应的频率字来读取存储在 ROM 核中的数据, GLONASS 信号 C/A 的频率为 0.511MHZ, 如上所述, 如果采用此频率来读取 C/A 码, 1 个周期数据一共有 62000 点, 所以本文采用码频率为  $\frac{1}{2}$  来读取存储在 ROM 中的数据, 相应的码频率字为, 也就是说在通过频率字读取伪码频率的时候, 人为的加快读取速度, 这样用 62MHZ 时钟采样 1 个周期的数据点数仍为 4096 点, 即可满足 FFT4096 点运算点数的要求。

同时 ROM 核中存储的 C/A 码数据为 1 或者 0 的数据, 鉴于对 1 或者 0 进行 FFT 运算的话, 出来的结果非常的小, 在后续数据进行处理的时候不易看出其区别, 所以采用两个相差比较大的数代替原来的 1 和 0, 本文采用 32767 和 -32767 代替, 由于 MATLAB 自带 FFT 函数, 所以用 MATLAB 进行数据验证非常方便, 前 7 个数据的 MATLAB 计算结果和 Modelsim 仿真结果如下:

```
ans =
Columns 1 through 2
    -767.9766625          -3262.78507203293 - 11264.5375545289i
Columns 3 through 4
    -10645.6115714164 + 4362.94257219707i - 6395.17650126469 + 9597.99899505157i
Columns 5 through 6
    9628.30106493861 - 6442.18482199486i -11377.2725186129 - 2135.56845206358i
Columns 7 through 8
    -11079.7535566003 - 3059.89741401737i -8597.48162875074 + 8083.41793151922i
Columns 9 through 10
    5801.34633194745 - 9896.28183256873i -11373.9613151966 + 3030.66279770546i
```

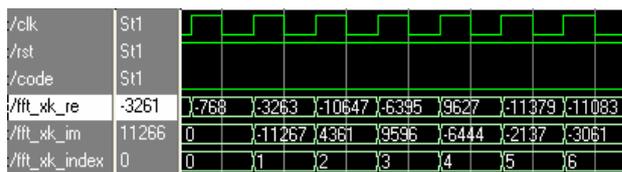


图 5 MATLAB 与 Modelsim 仿真结果对比

### 2.3 复数乘法后数据处理

复数乘法器 IP 核的输入的数据是: (1)C/A 码 FFT 结果从 RAM 中读出的实部和虚部数据; (2)信号 FFT 结果的实部和虚部数据; 所以要考虑到 RAM 的读延时时钟, 保证本地 C/A 码 FFT 后的数据和信号 FFT 后共轭的数据同时进入复数乘法器。

在进行数据的 IFFT 运算之前, 由于复数乘法输出结果为 18 位, 而复用 FFT 核进行 IFFT 时所需要的数据应该为 16 位, 所以本文采用状态机的状态值加在数据指数项的方法进行截位, 这种截位方法的好处即是保证了数据位数为 16 位, 方便复用 FFT 核将复数乘法结果进行 IFFT 运算, 又保证了数据的大小基本没有扩大或者缩小。具体流程如下状态机对每一个复数乘法出来的结果进行处理:

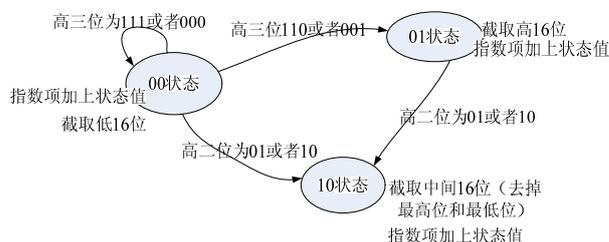


图 6 复数乘法结果处理状态图

在复数乘法器输出数据的时候, 对每一个数据进行判断, 当高三位为 111 或者 000 的时候, 表示数据高两位值无效, 所以截取数据低 16 位数据; 当高三位数据为 110 或者 001 的时候, 可得数据最高位为无效位, 截取数据中间 16 位, 即去掉最高位和最低位; 当高二位为 01 或者 10 时表示高位都为有效位, 截取高 16 位; 当为状态 00 的时候截位操作并没有缩小数据所以指数项还是保留原来的数; 当为状态 01 的时候, 数据相当右移 1 位, 缩小了一半, 所以在指数项加上状态值 01, 扩大一倍; 当在 10 状态的时候, 整个 18 位数据全为有效位, 所以在指数项加上状态值 10; 这样数据经过 IFFT 后, 将处理完的数据送入后续的累加模块, 由于论文篇幅有限, 在此不介绍累加模块的内容, 系统

仿真结果和参数如下所述。

### 3 系统仿真结果

在硬件测试之前,对 GLONASS 捕获系统进行仿真。图 8 就是系统伪码捕获 IFFT 结果经过 5 次非相干累加后 Modelsim 仿真结果,仿真的基本参数为:驱动时钟频率为 62MHZ, GLONASS 码速率为 511KHZ,信号加了高斯白噪声, SNR 为 -5DB, 码相位偏移为半周期码片位置。



图 7 内插模块仿真结果

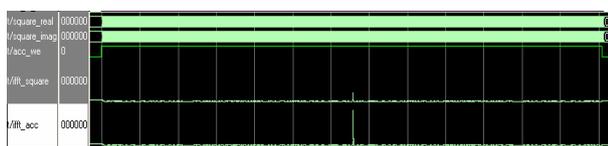


图 8 捕获结果仿真图

### 4 小结

基于 FFT 的 GLONASS 信号捕获系统的 FPGA 设

计过程清晰明了,各种参数的设置都很方便,只要做相应的修改,就能将此系统的对应模块应用于其他的卫星导航系统,同时由于 FPGA 本身的灵活性,可以很方便的扩展各种相应的辅助功能,例如 GIS 地图, GPRS 通信等. 因此该系统具有较大的应用价值。

### 参考文献

- 1 党亚民,秘金钟,成英燕.全球导航卫星系统原理与应用.北京:测绘出版社,2007.88-89.
- 2 Global Navigation Satellite System Interface Control Document.
- 3 谢钢.GPS 原理与接收机设计.北京:电子工业出版社,2009. 370-375.
- 4 杨俊,武奇生.GPS 基本原理及其 Matlab 仿真.西安:西安电子科技大学出版社,2006.126-163.
- 5 Van Nee R, Coenen A. New Fast Gps Code-Acquisition Technique Using FFT, Electronics Letters, 1991,27(2).
- 6 Tsui JBY. Fundamentals of Global Positioning System Receivers A Software Approach. USA: John Wiley & Sons, 2005.
- 7 金俊坤,吴嗣亮,李菊.基于基 2-FFT 的伪码快速捕获实现新算法.北京:北京理工大学,2005.

(上接第 151 页)

### 6 结论

本文设计的煤矿综采工作面监控系统由地面监控主站、井下主控制器、沿线现场层设备以及相应井上、井下通讯网络等几个部分组成,具有工作面各主要设备的启停监测、环境参数和设备工况监测、沿线闭锁、井上井下信息一体化等功能. 该系统满足煤矿综采工作面的数字化、智能化以及网络化的整体发展趋势,对于提高煤矿采集安全性、自动化水平,增强扩展性,缩短开发周期等方面都具有明显的效果。

### 参考文献

- 1 廖常初.S7-300/400PLC 应用技术.北京:机械工业出版社, 2005.
- 2 Siemens. SIMATIC S7 Configuring Hardware and Communication Connections STEP7 V5.4 Manual.
- 3 西门子有限公司自动化与驱动集团.深入浅出西门子 S7-300 PLC.北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- 4 西门子有限公司自动化与驱动集团.深入浅出西门子 WinCC V6.北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- 5 周美兰,周封,王岳宇.PLC 电气控制与组态设计.北京:科学出版社,2003.