

GNSS 双频兼容互操作接收机信号捕获方法

袁进, 刘云飞

(南京林业大学 信息科学技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 随着我国北斗导航系统“全球组网”序幕的拉开, 设计实现接收机的兼容互操作功能已变成接收机设计领域的一个研究热点。文中针对 GNSS 双频兼容互操作接收机信号捕获环节设计中遇到的处理时间长、捕获精度低、硬件资源消耗大、兼容性差等问题, 设计一种基于频域处理的信号捕获算法。该算法在传统频域捕获的基础上, 优化频域转换资源利用与遍历方式, 在能量累加方面加入相干与非相干累加方式, 达到微弱信号捕获。借助 Xilinx 软件 Vivado 及其仿真工具, 对整个捕获系统进行了仿真实现, 验证了算法设计的准确性, 本算法可以捕获信号功率-135 dB 以上的信号, 可捕获的载波多普勒频率范围满足实际工程需求。在实际工程验证中, 本算法能较好地满足工程应用性能要求。

关键词: GNSS; 兼容互操作; 捕获; FFT

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2018)04-0019-05

0 引言

全球卫星导航系统(GNSS)主要包括 GPS、GLONASS、Galileo 和我国的北斗卫星导航系统(BDS), 可以为全球用户提供高性能的定位、导航与授时服务, 在军事、社会和科研领域都有广泛的应用并在全球范围内形成了一个高新技术产业。导航信号的接收技术是导航系统的核心技术之一, 是所有应用的基础。GNSS 信号接收涉及信号的捕获、跟踪和解算等关键技术, 其中捕获是接收机的第一步, 是首要解决的关键技术^[1-2]。

针对现有的信号捕获算法中出现的硬件资源消耗大、捕获精度低、捕获速度慢、兼容性差等问题, 本文针对 GNSS 系统兼容互操作方面, 研究设计了一种适用于多种导航系统的信号捕获算法, 并进行了仿真验证及工程应用测试, 证明了系统的有效性及其精确性。由测试结果可知, 在资源利用较少的情况下, 本算法可在较短时间内精确捕获 B1C、B1I、B2a、L1C、L5、E5a、E1OS 等信号。

1 算法分析

在 GNSS 系统中, 信号捕获是指对接收信号

码型、多普勒频移和码起止时刻的估计。捕获成功是指使估计的码型正确, 码相位差小于二分之一码片的宽度, 并初步估计出载波频偏^[3]。捕获的实质就是利用导航信号中 PN 码强自相关的特点从噪声之中分解出导航信号的过程, 为了避免不同卫星系统在接收机处理时出现相互干扰的问题, GNSS 信号之间存在着许多的差异, 如调制方式、载波频率 PN 码的长度与速度等^[4-5]。

总结相关捕获算法的文章, 目前捕获原理大致包含四类: 基于序列检测原理、基于相关性原理、基于信息迭代传递技术、基于现代信号检测原理。在捕获算法方面, 大致分类为: 能量累加方式(差分累加等)、捕获策略(检测策略、搜索策略)、相关算法: 时域(滑动相关、匹配滤波)、频域快速傅里叶变换(FFT)捕获算法。

随着技术的发展与变革, 目前信号捕获算法大多采用频域处理, 即将信号从时域转换到频域中进行处理。在时域中, 信号数据循环卷积的过程可以表示为

$$R(m) = \sum_{i=1}^L S(i)PN((i+m)N),$$
$$m = 0, 1, \dots, L-1, \quad (1)$$

式中： L 为伪码序列长度； $PN((i + m))N$ 为 $PN(i + m)$ 以 N 为周期循环移位。

如果直接计算式(1)，计算量正比于 L^2 ，当 L 非常大时计算量过大，捕获时间太长。但如果利用时域的循环卷积等价于频域相乘这一特性，将相关运算转化到频域上，利用快速傅里叶变换来计算，将会大幅度缩短运算时间。本文所讨论的算法就是基于这种思想提出的，算法分别对样点和伪码进行傅里叶变换，接着将变换后的伪码和样点共轭相乘，再对相乘结果进行傅里叶逆变换，完成时域中的卷积过程。过程的数学表达如式(2)。最后对式(2)的结果进行后续的能量累积处理，能量峰值超过阈值，则表明捕获成功。

$$\begin{aligned}
 R(m) &= \sum_{i=1}^L S(i)PN((i + m))N \\
 &= S(i) \otimes PN(i) \\
 &= IFFT(FFT(S(i))) \cdot FFT^* \\
 &\quad (PN(i)) \tag{2}
 \end{aligned}$$

2 算法总体设计

根据上一节所述，捕获算法总体设计框图如图 1 所示。在无先验值的条件下，当接收机射频前端接收到卫星导航信号时，首先将信号进行下变频操作，其目的是使信号频率从中频转换为便于处理的零频。接着对信号进行下抽采样，将采样数据存储于在相应的存储模块中，并进行合并操作。

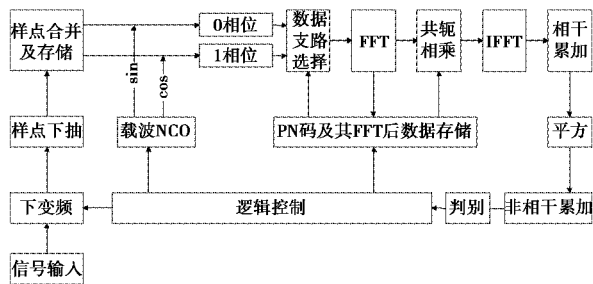


图 1 算法设计总体框图

在捕获过程中，若捕获到的多普勒偏移与真实的多普勒偏移的差值在整个周期的三分之二范围内，则表明捕获成功。由此，将多普勒频移范围以 667 Hz 为单位分为多个子单元。开始捕获时，将本地载波 NCO 对准初始频率估计值，使产生的信号对准一个频率搜索单元。将采样信号按 0 和 1 相位分为两路，两相位相差二分之一码片，保证了捕获精度。在启动 FFT 捕获环路之前，设置数据

支路选择模块，通过时序控制，将数据按 PN 码、0 相位支路、1 相位支路的顺序依次传输。其中 PN 码进行 FFT 处理后，结果数据保存在 PN 码存储模块，待 0 相位支路进行 FFT 后，再将 PN 码的 FFT 结果输出到共轭相乘模块进行下一步骤的运算。

因为在兼容互操作接收机中，捕获的信号无法判断是否有周期性的比特翻转现象。故首先在相干累加模块中对其进行同符号的累加，而且在信号累加的过程中，噪声信号的能量将以根号二分之一速度减弱。待相干累加模块完成后，加入平方模块，消除正负符号的影响，最后将平方后的值进行非相干累加处理。通过比较相干累加处理后的相关峰值找出其最大值。若最大值大于设定的检测门限，则表明捕获到信号，给出信号所在位置的码相位和多普勒频率。如果小于门限，则信号未捕获，通过控制逻辑改变多普勒搜索单元，重复上述过程直到捕获成功。

3 主要模块设计

3.1 片选模块设计

三通道数据传输顺序如图 2 所示，在 PN 码输入脉冲为高时，将 PN 码数据传入 FFT 模块，待处理完成后将 PN 码完成脉冲置高。只有在 PN 码输出脉冲为高时，才能传输 0 相位支路数据。同样 0 相位支路数据处理完成后，才能继续对 1 相位支路数据进行传输处理。待处理完成后，才能进行下一轮的传输，即从 PN 码开始传输。

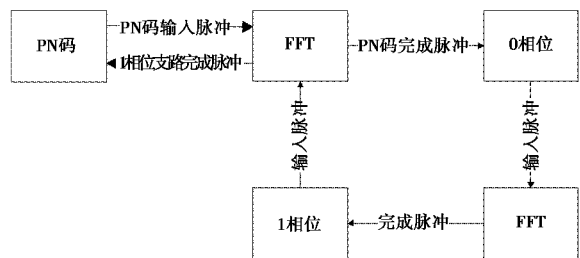


图 2 片选模块框图

3.2 FFT 模块设计

分析各卫星系统兼容捕获结构，由于卫星的 PN 码的长度不同，周期不同，由此导致捕获算法中 FFT 变换的点数也不相同。结合实际工程要求，本文捕获算法适用的信号分量信息如表 1 所示。综合考虑处理速度及资源使用情况等因素，在

进行 FFT 模块设计时,本文采用基 2-2048 点按频率抽取(DIF)的 FFT 算法模块,以解决双频兼容互操作接收机对不同主码长信号的兼容与遍历要求。

表 1 接收机捕获的信号信息

信号分量	调制方式	主码长
B1C_pilot	TMBOC(6,1,4/33)	10230
B1C_data	BOC(1,1)	10230
B1I	BPSK(2)	2046
L1C/A	BPSK(1)	1023
L1C_pilot	TMBOC(6,1,4/33)	10230
L1C_data	BOC(1,1)	10230
E1OS_C	CBOC(6,1,1/11)	4092
E1OS_B	CBOC(6,1,1/11)	4092
B2a_pilot	TDDM-BPSK(10)	5115
B2a_data		5115
L5_pilot	BPSK(10)	10230
L5_data	BPSK(10)	10230
E5a_pilot	BPSK(10)	10230
E5a_data	BPSK(10)	10230

由于各蝶形运算的输入与输出互不重复,任何一个蝶形的两个输入量经蝶形运算后可以实现同址运算。这种原位运算方式节省了大量的存储单元,降低了硬件资源的使用成本^[6]。该方法较传统方法的优点在于,以最小点数的 FFT 设计及双通道传输节约了大量硬件资源。其次,遍历各种不同主码长的信号,对 10230 主码长的信号进行处理时,在资源节约的前提下,只牺牲了少量的时间。

本文参照 CORDIC 算法对蝶形运算单元进行设计,目的是充分利用 FPGA 的流水线结构,提高蝶形运算单元的处理速度^[7]。另外,考虑到数据在频域转换后主要对频谱能量信息进行处理分析,故在蝶形运算单元中加入了抛位运算,在资源消耗及处理速度上进一步得到优化。

基 2-FFT 设计主要由存储单元、 $M(\log_2 N, N$ 为 FFT 输入序列的长度)级蝶形运算单元、倒位序转为顺序单元等部分组成,总体结构如图 3 所示。在模块输入时序的控制下,将待处理的数据流输入到模块中,通过数据流水线模块的控制,将有效数据按设定时钟依次输入到 $(M-1)$ 级蝶形运算单元

中,直到完成最后一级的蝶形运算后(最后一级无乘法器),经过顺序排序单元,即可将输出的倒位序数据按自然顺序输出到存储单元中。其中,为了保证资源的有效利用,且不影响算法有效性的情况下,在顺序排序单元的设计中,本文设置了两个存储单元,既能保证数据流水线输入,又能避免在顺序排序单元的工作过程中出现数据交叉读取的问题。

在算法设计中,FFT 与 IFFT 模块为同一个模块,在进行 IFFT 模块处理时,只需对旋转因子做稍许处理。FFT 模块框图如图 3 所示。

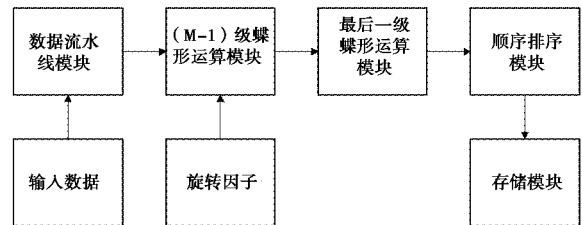


图 3 FFT 模块框图

3.3 相干累加模块设计

考虑到兼容互操作接收机接收信号种类不同,加入相干累加模块,一方面是为了使有用信号得到聚集、干扰信号得到减弱。另一方面,由于有些信号呈现正负交替的形式传输,故需选取合适的累加段数,以达到能量累积的效果。如图 4 所示,将信号峰值在相干累加后得到进一步的提高。如果设置不当,则会出现图 5 所示的结果,信号能量没有得到聚集,与预期的设计思路相违背。

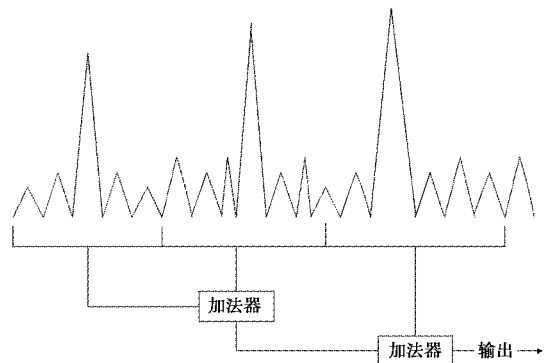


图 4 无比特翻转

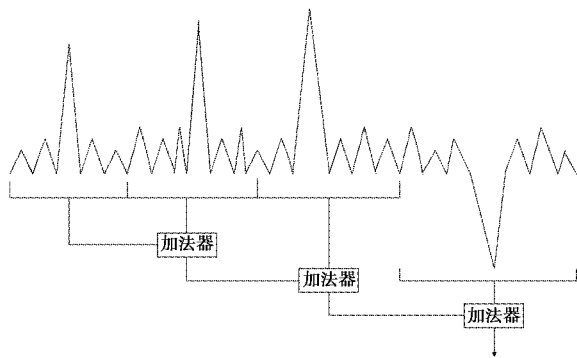


图 5 有比特翻转

4 仿真分析

借助 Xilinx 仿真工具,编写相应的 Testbench 文件,对整个算法设计进行系统的仿真分析。在时序控制下,将数据进行变频、下抽和存储操作。下抽模块的仿真如图 6 所示。样点传输的速率为抽样速率的四十倍,故在清零脉冲 iClrEp 为高时,传输 40 个码片时,下抽脉冲 oDsSplEp 置高,将 40 个码片的样点数值相加后下抽一个数据。接着将数据分为 0 相位和 1 相位支路,如图 7 所示,处理完毕后,存储在相应存储模块。启动片选模块工作脉冲,按照设定的传输顺序进行传输,仿真结果如图 8 所示。iX0Cz、iX1Cz、iX2Cz 分别为 PN 码、0 相位支路、1 相位支路输入数据,当输出使能为高时,在输出脉冲的控制下,依次输出 PN 码、0 相位支路、1 相位支路数据给 FFT 模块。



图 6 样点下抽

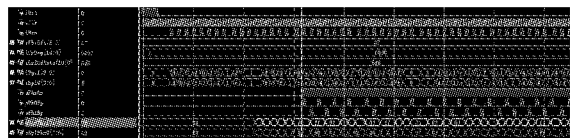


图 7 样点合并



图 8 片选模块仿真结果

为了直观地分析 FFT 模块的仿真结果,将正弦信号数据作为模块的输入数据。当输入使能为高时,在输入脉冲的控制下,将数据输入 FFT 模块。当输出使能为高时,同样在输出脉冲的控制下,输出 FFT 处理后的数据。从仿真结果图 9 可知,FFT 处理结果较为准确。

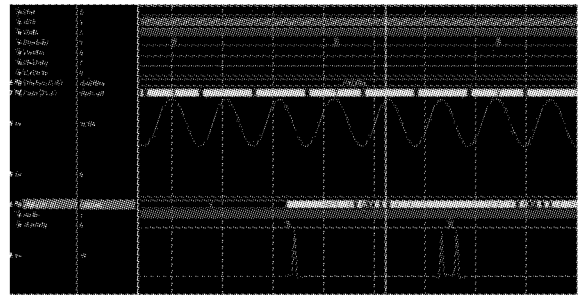


图 9 FFT 模块仿真结果

FFT 输出数据进行后面的共轭相乘、IFFT 及相干累加模块处理后,对相干累加结果进行平方处理,接着将结果输入到非相干累加模块,再次进行累加处理,最终将图 10 中的 iPowValue 变量所呈现的结果输入到判别模块,设定相应阈值,如果峰值超过阈值,即可捕获成功。由仿真结果可知,本次捕获成功,样点偏移为 8 个比特,载波多普勒偏移为 6×667 Hz。

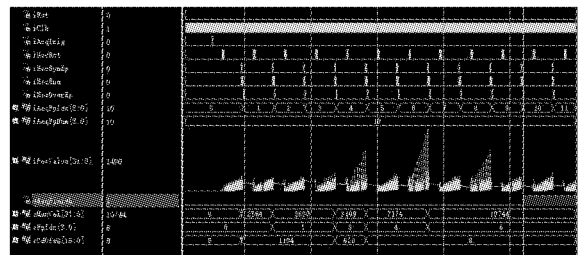


图 10 信号捕获模块仿真结果

5 结束语

本文主要围绕双频兼容互操作接收机的信号捕获算法这一关键技术进行研究与设计。结合接收机捕获的要求与所遇到的问题,提出一种基于 FFT 伪码相位捕获算法的改进方法。算法主要对 FFT 处理模块及相干累加、非相干累加模块做了改进。在 FFT 模块设计中加入截位算法和流水线设计,使其符合兼容互操作接收机的捕获信号特点。本文完成了捕获算法的整体模块设计,并借助仿真工具完成了对捕获系统的仿真、调试与分析。

由仿真结果可知,本算法在捕获精度、处理速度及兼容性方面较传统方法有了较大的提高。从实际工程应用中发现,本算法配合后续的跟踪和解算模块,达到了双频兼容互操作接收机的性能指标。综上所述可得,本算法有较好的理论价值及使用价值。

参考文献

- [1] 程亚文,郭承军,张鑫鑫,等.可配置多模GNSS信号捕获技术研究[J].全球定位系统,2017,42(1):39-43.
- [2] 李先强,郭承军.高灵敏度GPS和Galileo信号联合捕获方法[J].测绘科学,2017,42(4):119-122.
- [3] 郑伦贵,尤政,张高飞,等.GNSS接收机的一种快速捕获方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(4):807-813.
- [4] 魏敬法.GNSS软件接收机算法验证平台设计与实现[J].通信技术,2013,46(3):110-114.
- [5] 盖世豪,刘应刚,孟海涛,等.基于预检测通道的新体制GNSS信号捕获方法[J].无线电工程,2017,47(12):38-42.
- [6] 高亚军.基于FPGA的数字信号处理[M].2版.北京:电子工业出版社,2015.
- [7] 杨军,于艳艳,陈成,等.基于FPGA的二维FFT处理器的研究与设计[J].云南大学学报(自然科学版),2013,35(6):750-755.

作者简介

袁进 (1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为信号处理。

刘云飞 (1962—),男,博士,教授,主要研究方向为信号处理。

GNSS Dual Frequency Compatible Interoperation Receiver Signal Acquisition Method

YUAN Jin, LIU Yunfei

(Institute of information science and technology, Nanjing Forestry University,
Nanjing 210037, China)

Abstract: With the opening of the "global network" of the BeiDou navigation and positioning system, the design and implementation of the compatible interoperability of the receiver has become a hot spot in the field of the receiver design. In this paper, aiming at the problems of long processing time, low acquisition precision, large hardware resource consumption and poor compatibility in the design of signal acquisition link of GNSS dual frequency compatible interoperable receiver, a signal capture that can capture GPS, Galileo, GLONASS, BDS signals at the same time, and can capture Doppler frequency offset and code offset quickly, is designed. With the help of Xilinx simulation tool Vivado and its simulation software, the whole capture system is simulated, and the accuracy of the algorithm is verified. In actual engineering verification, this algorithm can better meet the engineering application requirements.

Keywords: GNSS; compatible interoperability; capture; FFT