

GPS 软件接收机信号捕获频率分辨率的研究

宁春林, 施浒立, 李圣明, 崔君霞, 胡超

NING Chun-lin, SHI Hu-li, LI Sheng-ming, CUI Jun-xia, HU Chao

中国科学院 国家天文台, 北京 100012

National Astronomical Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

E-mail: ningcl@126.com

NING Chun-lin, SHI Hu-li, LI Sheng-ming, et al. Study on frequency resolution of signal acquisition in GPS software receiver. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(6): 14-16.

Abstract: Frequency resolution can be advanced by adding the data length with parallel frequency space search acquisition method. In order to improve carrier frequency resolution of GPS software receiver, utilizing parallel frequency space search acquisition method and parallel code phase search acquisition method, a mix search acquisition method is put forward. Simulation results show that high carrier frequency resolution can be obtained with adding a little search acquisition time and the veracity and speed of next signal frequency tracking loop can be guaranteed.

Key words: GPS software receiver; acquisition; frequency resolution

摘要: 为了提高 GPS 软件接收机信号捕获的载波频率分辨率, 在频域并行频率空间搜索捕获方法中, 利用加大分析数据长度可以提高频率分辨率的优点, 结合频域并行码空间搜索捕获方法, 构成了一种混合搜索方法。仿真结果表明本方法在略微增加捕获时间的基础上提高了载波频率分辨率, 保证了后续信号频率跟踪环节的准确性和快速性。

关键词: GPS 软件接收机; 捕获; 频率分辨率

文章编号: 1002-8331(2008)06-0014-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP271.4

1 引言

利用 GPS 卫星信号定位、测速和授时, 首先要捕获 GPS 卫星信号。GPS 卫星信号捕获的目标是获得可视 GPS 卫星的 PRN 码、GPS 卫星信号的大致载波频率和 C/A 码的码相位, 为后续的信号跟踪提供初始条件。如果本地预先存有有效的星历信息, 就可以直接搜索预测的可视 GPS 卫星。这样对于每颗 GPS 卫星则需要完成二维搜索: GPS 信号的载波频率搜索和 C/A 码相位的搜索^[1]。按照捕获策略, 捕获可以分为串行、并行和混合型; 按照处理域的不同, 捕获又可分为时域和频域两种处理方式^[2]。本文介绍一种时域的串行搜索方式和两种频域的并行搜索方式, 分析各自的优缺点, 在此基础上构造了一种混合型的搜索方法, 计算机仿真结果表明该方法提高了载波频率分辨率, 有利于后续信号的跟踪处理。

2 信号搜索和捕获方法

2.1 时域串行搜索捕获方法^[3]

时域串行搜索的过程是首先将数字中频(数字中频是指天线接收到的 GPS 信号经下变频后由 A/D 转换成的信号)和本

地产生的数字化 C/A 码序列相乘, 然后再分别与本地振荡器产生的数字同相载波、90°相位位移后的数字正交载波相乘得到同相信号 I 和正交信号 Q , 接着对 I 、 Q 信号进行累加积分后求其平方和得到相关输出。当本地产生 C/A 码的码相位和本地产生的信号频率与数字中频的码相位和载波频率基本一致时, 上述相关过程输出会出现一个相关峰, 当该值超过捕获门限时, 即认为信号捕获完成, 并把此时的频率和码相位作为参数传递到后面的跟踪算法中去。如果输出值不超过捕获门限, 则认为信号没有捕获到, 依次串行改变 C/A 码产生器的码相位和本地振荡器的频率, 重复进行上述过程, 直到捕获到为止。图 1 为时域串行搜索方法的流程图示意图。

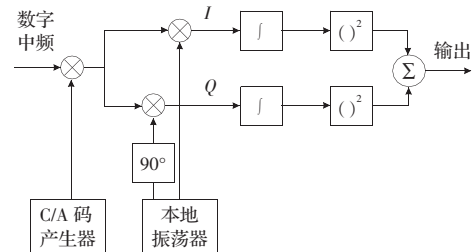


图 1 时域串行搜索捕获方法流程图

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)(the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2007CB815500)。

作者简介: 宁春林(1977-), 男, 博士生, 研究方向为卫星导航技术的研究; 施浒立(1944-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为射电天文方法与技术、天文导航; 李圣明(1976-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为无源探测、自动控制系统; 崔君霞(1981-), 女, 博士生, 研究方向: 天文技术与方法、卫星通信; 胡超(1980-), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为天文仪器设计、机电一体化。

收稿日期: 2007-10-10

修回日期: 2007-12-11

2.2 频域并行搜索捕获方法^[3]

时域串行搜索捕获方法对信号频率和相位两个参数的所有值进行串行搜索非常费时。如果对其中一个参数采取并行搜索,则整个过程的耗时将会得到极大地改善。

2.2.1 频域并行频率空间搜索捕获方法^[3]

频域并行频率空间搜索捕获方法是把频率并行搜索,该过程是由数字中频和本地产生的数字化 C/A 码序列相乘,相乘后的输出通过傅立叶变换转换到频域,对频域结果取模平方得到相关输出。当本地产生的 C/A 码的码相位与数字中频的码相位基本对齐时,上述相关过程的输出会出现一个相关峰,当该峰值超过捕获门限时,即认为信号捕获完成,并把此时峰值对应的频点和该次的码相位作为参数传递到后面的跟踪算法中去;如果输出值不超过捕获门限,则认为信号没有捕获到,改变 C/A 码产生器的码相位重复进行上述过程,直到捕获到为止。图 2 为频域并行频率空间搜索捕获方法的流程示意图。



图 2 频域并行频率空间搜索捕获方法流程图

2.2.2 频域并行码空间搜索捕获方法^[3]

频域并行码空间搜索捕获方法是对码相位进行并行搜索,首先通过傅立叶变换使处理过程由时域变为频域,使时域中的相关运算变换到频域中的乘法运算,然后再通过逆傅立叶变换得到时域的相关运算结果。此方法称之为循环相关法,下面介绍这种方法的原理。

长度都为 N 的有限长度序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的离散傅立叶变换如下式所示:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

长度都为 N 且周期性重复的有限长度序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的循环互相关序列如下式所示:

$$z(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) y(m+n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m) y(m-n) \quad (2)$$

$z(n)$ 的离散 N 点傅立叶变换如下式所示:

$$Z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m) y(n-m) e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j2\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n+m) e^{-j2\pi k(n+m)/N} = X^*(k) Y(k) \quad (3)$$

其中, $X^*(k)$ 是 $X(k)$ 的复共轭。

频域并行码空间搜索捕获的过程是数字中频分别和本地振荡器产生的数字同相载波、90° 相位位移后的数字正交载波相乘得到同相信号 I 和正交信号 Q , 同相信号 I 和正交信号 Q 组合成复信号输入到傅立叶变换中,输出记为信号 A ; 同时把本地产生的数字化 C/A 码序列进行傅立叶变换后进行共轭处理得到信号 B , 信号 A 和信号 B 相乘,相乘的结果再进行逆傅立叶变换,变换到时域,对变换结果取模平方得到相关输出。当本地振荡器产生的数字载波频率与数字中频的载波频率基本一致时,上述相关过程的输出会出现一个相关峰,当该峰值超

过捕获门限时,即认为信号捕获完成,并把此时峰值对应的码相位和该次的频率作为参数传递到后面的跟踪算法中去;如果输出值不超过捕获门限,则认为信号没有捕获到,改变本地振荡器产生的载波频率重复进行上述过程,直到捕获到为止。图 3 为频域并行码空间搜索捕获方法的流程示意图。

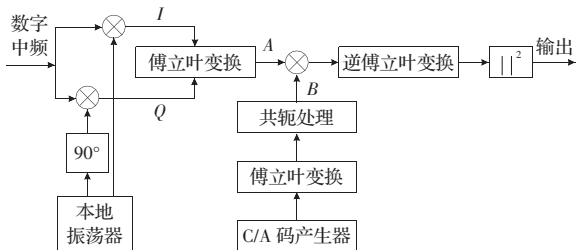


图 3 频域并行码空间搜索捕获方法流程图

3 搜索方法分析

3.1 搜索次数比较

时域串行搜索捕获方法在码相位上一般以 1 个码相位为步长,对所有的 1 023 个不同的码相位进行相位搜索,在频率上以小于等于 $2/(3T)$ 为步长(其中 T 取 1 ms 为积分时间,则频率选取 500 Hz)对数字中频 ± 10 kHz(多普勒效应)频率范围内的所有载波频率进行频率搜索,总的搜索次数为

$$1\ 023 \cdot (2 \frac{10\ 000}{500} + 1) = 1\ 023 \cdot 41 = 41\ 943 \quad (4)$$

频域并行频率空间搜索捕获方法中码相位步长与时域串行搜索捕获方法相同,为 1 个码相位,在频率上利用傅立叶变换进行并行捕获,搜索次数为码相位上的搜索次数 1 023 次。

频域并行码空间搜索捕获方法中频率步长与时域串行搜索捕获方法相同,为 500 Hz,在码相位上利用傅立叶变换和逆傅立叶变换进行并行捕获,搜索次数为频率搜索次数 41 次。

3.2 载波频率分辨率

时域串行搜索捕获方法和频域并行码空间搜索捕获方法中的载波频率分辨率均为步长 500 Hz。

频域并行频率空间搜索捕获方法中载波频率分辨率依赖于离散傅立叶变换的数据长度 T :

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

分别采用 1 ms、20 ms 和 40 ms 的数据长度得到的频率分辨率分别为

$$\Delta f = \frac{1}{1 \times 10^{-3}} = 1\ 000\ \text{Hz}$$

$$\Delta f = \frac{1}{20 \times 10^{-3}} = 50\ \text{Hz} \quad (6)$$

$$\Delta f = \frac{1}{40 \times 10^{-3}} = 25\ \text{Hz}$$

通过以上分析可知可以通过加大分析数据的长度来提高分辨率,但是 GPS 导航电文的发射速率为 50 b/s。这导致每 20 ms 可能存在数据位反转,数据长度越长存在数据位反转的可能性越大,使得捕获效果越差。

3.3 码相位分辨率

时域串行搜索捕获方法中码相位的步长和频域并行频率空间搜索捕获方法中码相位的步长一般为 1 码片,频域并行码空间搜索捕获方法中码相位分辨率取决于采集卡的采样频率,如果采样频率是 $f_s = 12$ MHz, C/A 码速率是 $f_c = 1.023$ MHz,则

$$\Delta c = \frac{f_c}{f_s} = \frac{1.023}{12} = 0.08525 \quad (7)$$

根据式(7),码相位分辨率与采样频率成正比,采样频率越高码相位分辨率越高。但是采样频率太高,需要处理的数据量太多,捕获时间变长,所以一般取 5 MHz~12 MHz。

以上三种方法作比较,频域并行码空间搜索捕获方法搜索次数最少,码相位分辨率最小,但是频率分辨率为 500 Hz,对于跟踪环节来说还是比较粗糙。并行频率空间搜索捕获方法虽然可以通过加大分析数据的长度来提高频率分辨率,但是存在数据位反转和码相位频率分辨率低等问题。综合以上情况,提出一种混合搜索捕获方法。

4 混合搜索捕获方法

4.1 混合搜索捕获方法

如图 4 所示,混合搜索捕获方法是两次捕获方法,第一次捕获采用频域并行码空间搜索捕获方法,从该方法中获得大致的载波频率和码相位,第二次捕获是采用频域并行频率空间搜索捕获方法,它在第一次捕获得到的码相位的基础上只做一次傅立叶变换,得到的峰值对应的频点就是载波频率,傅立叶变换的数据长度越长,得到的频率越精确。

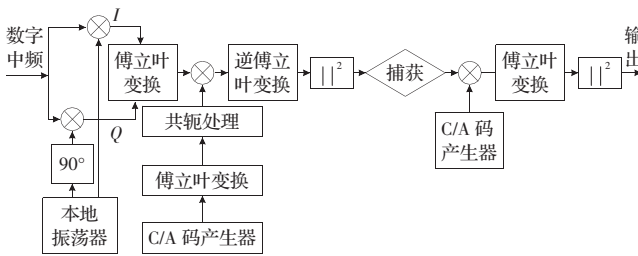


图 4 混合搜索捕获方法流程图

4.2 频率分辨率的极限分析

虽然上述傅立叶变换的数据长度越长得到的频率越精确,但是不能无限制增加。因为 GPS 导航电文的发射速率为 50 b/s。这导致每 20 ms 可能存在数据位反转。从第一次捕获方法中得到的码相位认为是 1 个数据位的开始,傅立叶变换的数据长度在 20 ms 内是不存在数据反转的,可以保证频率分辨率的准确性。如果数据长度超过 20 ms,频率分辨率得到提高,但准确性无法得到保证。总结如表 1 所示。

表 1 四种方法的比较

算法	搜索次数	频率分辨率/Hz
时域串行搜索捕获方法	41 943	500
频域并行频率空间搜索捕获方法	1 023	1 000
频域并行码空间搜索捕获方法	41	500
混合搜索捕获方法	41+1=42	50~1 000

5 仿真实验及结果分析

5.1 仿真实验

在实验中,数据来源于实际接收的 GPS 卫星信号,即 GPS 天线接收 1 575.42 MHz 的 GPS L1 射频信号,经过射频前端处理变频到 4.309 MHz 的模拟中频,然后数据采集卡使用 12 MHz 的采样频率对其进行数字化形成数字中频,该数字中频以文件的形式存于 PC 机内,用于后续的 Matlab 仿真。其中射频前端采用的是 Zarlink 公司的 GP2015^[9],数据卡采用的是凌华高速数据采集卡 PCI9820。

5.2 仿真实验结果

仿真所用信号为 2007 年 8 月 26 日 10 时左右 28 号卫星信号,用三种方法分别进行了仿真,仿真结果如图 5、图 6 和图 7 以及表 2 所示。

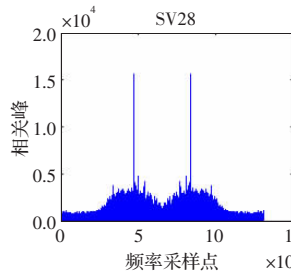


图 5 频域并行频率空间搜索捕获方法

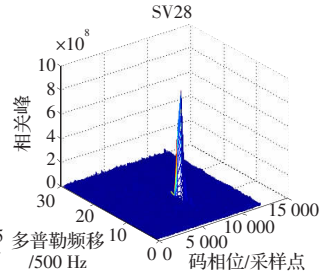


图 6 频域并行码空间搜索捕获方法

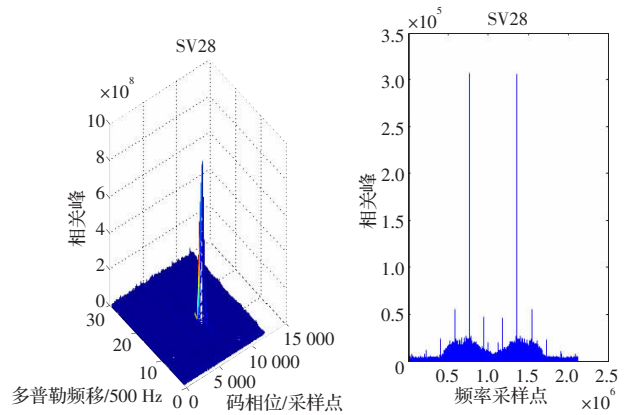


图 7 混合搜索捕获方法(20 ms)

表 2 仿真结果

算法	码相位	载波频率/Hz
频域并行频率空间搜索捕获方法	564 chip	4 306 732.177 734 38
频域并行码空间搜索捕获方法	第 6 617 采样点	4 307 000
混合搜索捕获方法(5 ms)	第 6 617 采样点	4 307 006.835 937 50
混合搜索捕获方法(10 ms)	第 6 617 采样点	4 307 064.056 396 48
混合搜索捕获方法(20 ms)	第 6 617 采样点	4 307 081.222 534 18

5.3 仿真实验结果分析

以频域并行码空间搜索捕获方法和混合搜索捕获方法(20 ms)为例,在 50 ms 时间内对跟踪系统的输出载波频率和频率鉴频器的输出进行跟踪,仿真结果如图 8 和图 9 所示。

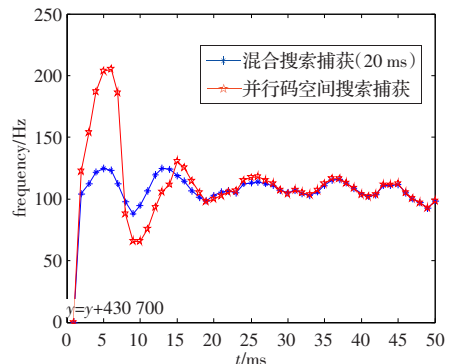


图 8 跟踪频率比较图

从图 8 可以看出混合搜索捕获方法(20 ms)的调节时间 t_r 比频域并行码空间搜索捕获方法短,很快就达到并保持在一定