

基于 GPS 软件接收机的 C/A 码捕获算法*

全 鹏¹, 朱桂斌¹, 叶久志¹, 魏光伟²

(1. 重庆通信学院, 重庆 400035; 2. 解放军 91683 部队, 浙江 温州 325012)

摘要: 为了尽量减少导航电文数据比特跳变带来的影响, 在基于 FFT 的并行码相位搜索算法的基础上, 采用两相邻毫秒数据进行捕获, 再利用 DFT 细化频率估计, 得到 C/A 码相位和较精确的载波频率。利用实际采集的数据进行实验, 结果证实了该方法能快速有效地对 C/A 码进行捕获, 为后续跟踪环路提供了良好的初始条件。

关键词: GPS 软件接收机; C/A 码捕获; 导航数据跳变; 精频估计

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)06-0066-04

Acquisition algorithm of C/A code based on GPS software receiver

Quan Peng¹, Zhu Guibin¹, Ye Jiuzhi¹, Wei Guangwei²

(1. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

2. Unit 91683 of PLA, Wenzhou 325012, China)

Abstract: This paper presented an acquisition method, using the two adjacent millisecond data to acquire the initial phase of the C/A code and the carrier Doppler frequency, then the frequency resolution is improved by using DFT. The experimental results show that the proposed method can acquire the GPS signal correctly and quickly, in addition, a good initial condition is provided to the tracking loop.

Key words: GPS software receiver; C/A code acquisition; navigation data bit transition; fine frequency estimation

近年来, 随着软件无线电技术的飞速发展, GPS 软件接收机已经成为卫星导航定位系统一个新的研究热点。它将卫星中频信号输入到 PC 机中, 然后对该信号进行捕获、跟踪、解调、测量和 PVT 解算, 整个信号处理过程通过软件来完成, 这样就使得软件接收机较传统的接收机有更好的灵活性, 研究人员可以做较小改动, 而不需要改变硬件设计, 就可以适应不同信号, 能够迅速分析、仿真、实现各类算法, 设置捕获、跟踪的各种参数和门限, 达到研究新的信号处理算法的目的^[1-7]。

为了跟踪 GPS 信号并进行信息解码, 就必须先用捕获程序来检测信号的存在。一旦发现信号, 必须测出 C/A 码相位和载波频率, 以协助启动信号跟踪。因此, 提高捕获有效性和捕获速度就显得尤为重要。

1 C/A 码捕获

1.1 导航数据跳变的处理

在普通强度 GPS 信号的捕获中, 剥离 C/A 码后, 输

入信号变为连续波, 可用快速傅里叶变换得到载波频率, 这个操作称为相干积分。在所有对 GPS 信号的捕获方法中, 相干积分都是第一步。

相干积分的长度受导航数据的限制, 导航数据每 20 ms 会出现一次相位跳变。如果用于捕获的数据段里含有导航数据跳变, 就会扩展信号的频谱, 使得载波频率处应有的峰值扩散到周边的频率中, 而产生信噪比损失, 使捕获结果变差。

为了保证在数据段中不包含导航数据跳变, 采用两段连续的 1 ms 的数据进行捕获, 分别计算捕获相关值, 并比较结果的信噪比, 信噪比较大一段数据中肯定没有导航数据跳变, 取此相关值作为最后结果。

1.2 周期信号的相干积分

针对 C/A 码的周期性, 采用 10 ms 的数据来进行相干积分。

10 ms 的信号下变频到基带, 然后分成 10 组, 每组

* 基金项目: 重庆市科技攻关计划项目 (CSTC, 2009AC032)

网络与通信 Network and Communication

包含 1 ms 的数据。由于 C/A 码的周期是 1 ms，每 1 ms 数据可以与同一个本地 C/A 码进行相关。如此，对于分辨率为 1 kHz 的多普勒频移区间内的载波频率而言，每 1 ms 都有 N 个相关结果 (N 为每 1 ms 的采样点数)。这 10 ms 的数据组成 10 组 N 点输出的结果阵。将矩阵的每一列的 10 个点都分别执行 FFT，即可得到 N 列的频域结果。矩阵中幅度最大的列序号和行序号分别表示 C/A 码的初始相位和分辨率为 100 Hz 的载波频率。

要遍历 m 个多普勒频移的区间，上述过程就要执行 m 次，最终的输出结果为 $10m \times N$ 的矩阵。这种方法的好处是，在进行捕获的同时，频率分辨率也有所提高，不需要进行额外的精频确定处理，从而简化了部分运算。

1.3 并行码相位搜索捕获算法

并行码相位搜索捕获算法是利用 FFT 来替代数字相关器的相关运算，将码相位搜索并行^[8]，减少了搜索次数，提高了整体速度。将需要搜索的频率范围等分成若干个频率段，在待搜索的每段频率上只需要搜索一次就可以确定 C/A 码初始相位，即将二维搜索转化为一维搜索，其实现方框图如图 1 所示。

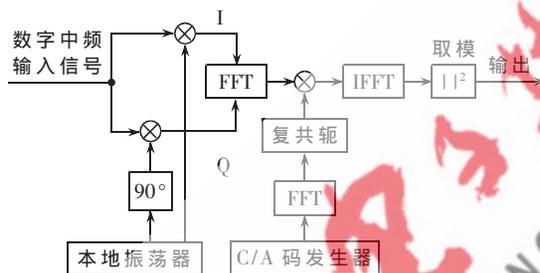


图 1 并行码相位搜索捕获算法

2 算法分析与实现步骤

2.1 算法分析

捕获函数每隔 500 Hz 搜索一次 GPS 信号，在每个频率搜索阶段，同时搜索码相位。每次搜索之后保存相关结果并进入下一频率单元，由此函数遍历所有的频段，接下来寻找函数最大相关值。之后，寻找同一频率单元中的第二大相关值，然后计算其比值并作为信号检测的规则，该比值用于与接收机中预设的门限值的比较。

需要注意的是，在判断第二峰值时必须排除峰值左右各一个码片以便除去峰值对周边值的影响，从而获得可靠的第二峰值。

如果第一峰值与第二峰值的比值超过门限值，则利用 FFT 方法找到精确的载波频率，以协助跟踪环中的 PLL 启动信号跟踪^[9]。

捕获程序流程图如图 2 所示。

2.2 实现步骤

从射频前端采集到的数据中读取 11 ms 的信号记为 $longSignal$ ，从 $longSignal$ 里截取两相邻毫秒的数据，分别记为 s_1, s_2 。

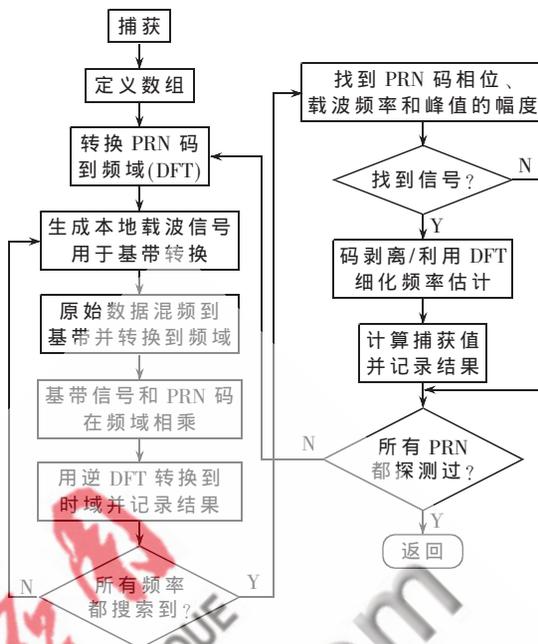


图 2 C/A 码捕获程序流程图

频率步长为 500 Hz，多普勒效应对信号载波的影响是 ± 10 kHz^[10]。所以给定的捕获频率区间 $acqSearchBand$ 内划分的小区间的个数为：

$$numberOfFreqBins = acqSearchBand \times 2 + 1$$

各个可能的频率分量记为 f_i ：

$$f_i = IF - (acqSearchBand/2) \times 1000 + 500 \times (i - 1)$$

其中 IF 表示中频， $i = 1, 2, \dots, numberOfFreqBins$ 。

(1) 生成本地 C/A 码

对于待捕获卫星，按照一定的码频率基准和预定的采样频率，生成本地 C/A 码序列，记为矩阵 Ca ，为 $n \times samplesPerCode$ 阶。

$$samplesPerCode = \frac{f_s}{f_c/L}$$

$samplesPerCode$ 为一周 C/A 码 (1 023 个码元) 的采样点数。其中 f_s 为采样频率， $f_c = 1.023$ MHz 为 C/A 码频率， $L = 1 023$ 为码长。

(2) 生成本地正、余弦载波：

$$\sin Carr = \sin(f_i \times \phi); \cos Carr = \cos(f_i \times \phi)$$

$$\phi = [0, 1 \times 2\pi t_s, 2 \times 2\pi t_s, \dots, (samplesPerCode - 1) \times 2\pi t_s]$$

其中， ϕ 为本地载波各个采样点的相位值， $t_s = 1/f_s$ 表示采样间隔。

(3) 将本地正、余弦载波与输入信号 s_1 和 s_2 对应点相乘，以剥离信号中的载波：

$$I_1 = \sin Carr \cdot s_1; Q_1 = \cos Carr \cdot s_1$$

$$I_2 = \sin Carr \cdot s_2; Q_2 = \cos Carr \cdot s_2$$

其中，“ \cdot ”表示对应元素相乘。

(4) 对采集到的信号进行傅里叶变换：

$$F_{I01} = FFT(I_1 + jQ_1); F_{I02} = FFT(I_2 + jQ_2)$$

(5) 计算本地码的傅里叶变换，并取其共轭复数

网络与通信 Network and Communication

$$F_{ca} = FFT^*(Ca_{PRNIndex})$$

(6) 基带信号和 PRN 码在频域相乘:

$$F_{com1} = F_{IQ1} \cdot F_{ca}; F_{com2} = F_{IQ2} \cdot F_{ca}$$

(7) 用逆 DFT 转换到时域, 并对结果取绝对值的平方, 即得相关系数:

$$acqRes_1 = |IFFT(F_{com1})|^2; acqRes_2 = |IFFT(F_{com2})|^2$$

比较 $acqRes_1$ 与 $acqRes_2$ 的大小, 将大的一个记入相关结果阵中 result 的行号为 i 的一行。最大值较大的一个对接收到的数据段中不含导航数据跳变的一个。

(8) 重复第(2)~(7)步, 直到多普勒频移区间全部遍历为止。

通过此步计算, 从理论上讲即对某一颗卫星的捕获操作完毕, 求得所有可能的相关系数, 如果有明显的峰值, 且此峰值超过给定的阈值, 则说明, 接收到的信号中包含此颗卫星, 且峰值出现的横向坐标为码的初相位, f_i 的第 i 个值为载波频率。将此初相位和载波频率的值记入捕获结果中。

在上面进行的捕获过程中, 载波的频率只能在多普勒频移带来的可能频率范围中固定步长的各个值中选择, 分辨率只有 1 kHz, 这对于后面的跟踪来说是不够的。跟踪环路需要更高的频率分辨率, 通常要求频率精确到几十赫兹。如果通过加长的数据段得到较大的频率分辨率, 捕获是相当费时的。

可以利用捕获到的码及其相位对载波频率进行更精确的确定。实现过程如下:

① 根据捕获到的卫星 PRN 号生成本地码 $caCode$;

② 计算码值索引:

$$codeValueIndex = \left\lfloor \frac{(1:10 \times samplesPerCode)}{samplesPerCodeChip} \right\rfloor$$

其中, $samplesPerCodeChip = \frac{f_s}{f_c}$, 表示每个码元的采样点数, “ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示对数值进行向下取整。

③ 由码值索引生成 10 ms 长的 C/A 码采样点序列:

$$longCaCode = caCode[(codeValueIndex \setminus 1023) + 1]$$

其中, “ \setminus ”表示求余。

④ 将采集到的信号中心化:

$$s_0 = longSignal - \overline{longSignal}$$

⑤ 根据捕获到的 C/A 码相位, 去除采集信号里的 C/A 码调制:

在 s_0 中选取从捕获到的 C/A 码相位开始的 $10 \times samplesPerCode$ 长的信号, 记为 s_{0DC} 。则去除 C/A 码后的载波表示为:

$$x_{Carrier} = s_{0DC} \cdot longCaCode$$

⑥ 对载波进行 N 点的快速傅里叶变换, 得到各个谐波频谱幅值并取绝对值, 得 $fftxc$ 。

⑦ 因为频谱图右侧是左侧的复共轭, 为冗余信息, 所以在 N 点中只取左半边:

$$uniqFftPts = \lceil (N+1)/2 \rceil$$

其中, “ $\lceil \cdot \rceil$ ”表示向上取整。根据 $fftxc$ 的值在 $uniqFftPts$ 索引区间中寻找最大值 $fftMax$ 及其索引 $fftMaxIndex$ 。

⑧ 求得频率区间为:

$$fftFreqBins = [0, (uniqFftPts - 1) \times samplingFreq / N]$$

⑨ 得到精确频率值并综合前述码相位结果给出捕获的最终结果: $fftFreqBins(fftMaxIndex)$ 和 $codePhase$ 。

(9) 改变 C/A 码, 用不同的卫星进行捕获, 重复第(1)~(8)步, 直到所有可能包含的卫星搜索完毕。

3 算法实验验证

本实验所用的数据由美国科罗拉多大学利用射频前端采集获得, 其参数如下: 采样频率为 38.192 MHz, 中频为 9.548 MHz, 采样格式为 8 位有符号字符型。

3.1 单颗卫星捕获结果图

图 3 和图 4 是判断采集到信号中是否含有某颗卫星信号的直观显示。图 3 是对 21 号卫星进行捕获的相关结果图。

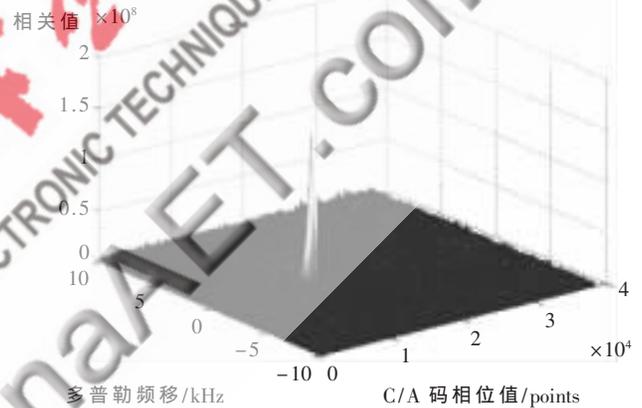


图 3 21 号卫星捕获结果图

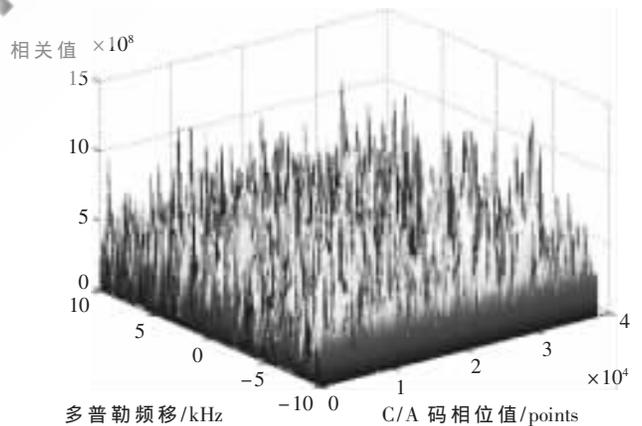


图 4 8 号卫星捕获结果图

从图 3 中可以看出明显的峰值, 且比较此颗卫星的相关峰值与第二峰值比率 14.617 与初始值设定时的阈值 2.5, 可以判断采集到的信号中含有此颗卫星的信号。峰值点出现的位置所对应的码相位轴相应位置, 即捕获所得到的码相位的位置; 峰值点出现位置对应频率成分轴相应位置, 即捕获所得到的频率成分值。

网络与通信 Network and Communication

图4是对8号卫星进行捕获的相关结果图。图中看不到明显的峰值,运行相应语句知此颗卫星峰值比率1.12小于初始设定的阈值2.5,所以判定采集到的信号中不含有此颗卫星的信号。

3.2 卫星列表中卫星捕获情况

图5从直观上反映了初始值设定时选定的32颗卫星列表中被捕获到的卫星PRN号及其峰值比率等信息。

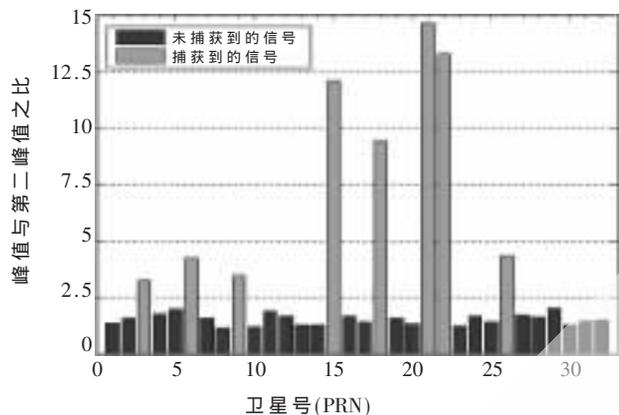


图5 卫星捕获情况图

表1详细给出了所捕获卫星的PRN、载波频率、多普勒频移和码相位。捕获后按照载噪比由高到低进行排列。

本文在并行码相位搜索算法的基础上设计了利用两相邻毫秒的数据进行捕获的算法,有效避免了导航数据跳变带来的影响。针对C/A码的周期性,进行分组相干积分,进行捕获的同时,载波的频率分辨率也得到提高,并且减少了部分运算量。理论和实验结果证实了该算法能实现对C/A码有效快速地捕获。

参考文献

- [1] AGARWAL N, BASCH J, BECKMANN P, et al. Algorithms for GPS operation indoors and downtown[J]. GPS Solutions, 2000(6): 149-160.
- [2] LIN D, TSUI J. Comparison of acquisition methods for soft-

表1 卫星捕获参数图

卫星序号PRN	多普勒频移/Hz	码相位(采样点)
21	-574	13 404
22	1 694	6 288
15	1 921	36 321
18	246	20 724
26	-2 987	26 827
6	-3 688	28 202
9	2 832	4 696
3	1 903	34 212

ware GPS receiver[C]. ION GPS 2000, Salt Lake City, UT, 2000.

[3] KELLEY C, BARNES J, CHENG J. Open source GPS: open source software for learning about GPS[C]. ION GPS 2002, Portland, OR, USA, 2002.

[4] LACHAPPELLE G. GNSS indoor location technologies[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2004, 3(1/2): 2-11.

[5] MA C, JEE G, MAC G G, et al. GPS signal degradation modeling[C]. ION GPS 2001, Salt Lake City, UT, 2001.

[6] MA C, LACHAPPELLE G, CANNON M E. Implementation of a software GPS receiver[C]. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2004.

[7] TSUI J. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

[8] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[9] BORRE K, AKOS D M, BERTELSEN N, et al. A software-defined GPS and galileo receiver[M]. National Defense Industry Press, 2009.

(收稿日期: 2010-10-27)

作者简介:

全鹏,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:GPS软件接收机。