

GPS 软件接收机信号的快速捕获与跟踪

刘 焱, 薄煜明, 赵高鹏

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘要: 根据 GPS 软件接收机对数据块进行信号处理的工作方式, 研究基于快速傅里叶变换的循环相关法伪码快速捕获与跟踪技术。基于实测 GPS 中频数据, 采用循环相关法在频域计算输入信号与本地信号的相关值, 由相位关系得到精细载频。仿真结果表明, 该技术能减少运算量, 缩短捕获时间。得到的载频能满足跟踪环对频率分辨率的要求。对跟踪结果进行子帧匹配和奇偶校验后, 可以获得导航电文信息。
关键词: GPS 软件接收机; 信号捕获; 精细载频; 快速傅里叶变换; 循环相关; 跟踪

Fast Acquisition and Tracking for Signal of GPS Software Receiver

LIU Di, BO Yu-ming, ZHAO Gao-peng

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

【Abstract】 According to the working mode of GPS software receiver to do signal process on data block, this paper studies fast acquisition and tracking technology for fake code of circular correlation method based on Fast Fourier Transform(FFT). Based on GPS intermediate frequency data getting by operational test, circular correlation method is used to calculate correlation value of input signal and local signal in frequency domain. Fine carrier frequency is obtained by phase relation. Simulation results show that this technology can reduce computation quantity and shorten acquisition time. The obtained carrier frequency can meet the tracking loop's demand about frequency resolution. Navigation information can be obtained through sub frame match and parity check of tracking result.

【Key words】 GPS software receiver; signal acquisition; fine carrier frequency; Fast Fourier Transform(FFT); circular correlation; tracking

1 概述

随着软件无线电技术的发展, 如何使用软件方式组建 GPS 接收机成为一个研究热点。软件无线电是以软件为核心的无线通信体系结构, 其核心思想是在接收机尽可能靠近天线的部分用模数转换器将输入信号转换为数字信号, 并通过数字信号处理得到必要信息。软件 GPS 接收机的射频前端仍然由硬件实现, 其软件平台可以是 DSP 或通用 PC 机^[1], 与传统的 GPS 接收机相比, 软件 GPS 接收机能在不改变硬件设备的前提下开发新的算法, 从而灵活地实现信号解算。

软件 GPS 接收机的信号捕获是对数据块进行的, 如果达不到理想的捕获速度, 传递给跟踪程序的信息将出现滞后, 无法满足实时性要求。目前常用的捕获方法有时域串行搜索捕获法^[2]、串并结合捕获法^[3]和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)快速捕获法等^[4-6]。串行搜索计算量大, 搜索时间太长, 难以满足接收机的实时性要求。串并结合的伪码快速捕获是在串行捕获的基础上、以牺牲硬件利用率为代价换取捕获速度的捕获方式, 可以分为多通道多普勒频移并行搜索和多通道伪码相位并行搜索 2 种方式, 它们在一定程度上提高了捕获速度, 但硬件利用率低, 增加了设备成本。本文采用基于 FFT 的循环相关法伪码捕获技术, 实现 GPS 软件接收机 C/A 码的快速捕获。

2 伪码快速捕获原理

GPS 信号捕获的基本思想是解扩输入信号并找出载波频率, 其捕获过程分为粗捕获与精对准。粗捕获得到输入信号的伪噪声码相位和载波频率的粗略估值, 为以后的精对准提供初始值。精对准使本地参考信号精确跟踪接收信号的相位

变化。卫星信号的快速捕获对接收机性能提高有重要意义。

2.1 GPS信号模型

进入软件部分的 GPS 信号是经下变频和采样后的数字中频信号, 一个导航数据位时长是 20 ms, 即 20 个 C/A 码长度, 若采用时长为 1 ms 的数据捕获伪码, 则能忽略导航数据位以简化信号模型。其信号结构可以表示为

$$S_m = AC_m \cos[(\omega_{IF} + \omega_d)t_m + \theta] + n_m \quad (1)$$

其中, A 为信号幅值; C_m 为第 m 颗卫星的 C/A 码; ω_{IF} 为数字中频; ω_d 为多普勒频移; θ 为载波初始相位; n_m 为噪声。

2.2 FFT快速捕获原理

信号 $x(n)$ 及 $y(n)$ 的相关关系可以表示为

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

对式(2)进行离散傅里叶变换可得

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m)y(n+m)e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{n=0}^{N-1} y(n+m) \left[\sum_{m=0}^{N-1} x(m)e^{j2\pi mk/N} \right] e^{-j2\pi(n+m)k/N} = X^{-1}(k) \sum_{n=0}^{N-1} y(n+m)e^{-j2\pi(n+m)k/N} = X^{-1}(k)Y(k) \quad (3)$$

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 刘 焱(1983—), 女, 博士研究生, 主研方向: 卫星导航, 组合导航; 薄煜明, 研究员、博士生导师; 赵高鹏, 博士研究生

收稿日期: 2009-06-19 **E-mail:** liudinust@163.com

式(3)描述了循环相关法的基本思想,其中, $X^{-1}(k)$ 表示 DFT 逆变换。先通过 FFT 变换将接收信号和本地信号转换至频域,然后对接收信号按多普勒频移间隔进行搜索,再通过 IFFT 得到时域相关运算结果。在一个步进频率单元内,由 2 次 N 点 FFT 运算和 1 次 N 点 IFFT 运算取代了串行搜索中接收码与本地码的 N 次滑动相关运算。

图 1 为基于 FFT 的循环相关法伪码快速捕获流程,本地信号为 C/A 码与一个射频信号的乘积,可以表示为 $y_i^m = \exp(j2\pi f_i t) \times C^m$, 其中, f_i 为附加了多普勒频移的本地信号频率; i 表示待搜索的频率分量,考虑到接收机的高速机动状态,假定多普勒频率搜索范围为 ± 10 kHz; m 为对应的卫星编号。捕获过程如下:

$$\begin{bmatrix} S(1) \\ S(2) \\ \vdots \\ S(k) \end{bmatrix} = FFT \begin{bmatrix} s(1) \\ s(2) \\ \vdots \\ s(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} Y_i^m(1) \\ Y_i^m(2) \\ \vdots \\ Y_i^m(k) \end{bmatrix} = FFT \begin{bmatrix} \exp(j2\pi f_i t) \times C^m(1) \\ \exp(j2\pi f_i t) \times C^m(2) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi f_i t) \times C^m(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$r_i^m(n) = IFFT[R_i^m(k)] = IFFT[S^*(k) \times Y_i^m(k)] = IFFT[\text{conj}(S(k) \times Y_i^m(k))] \quad (6)$$

其中, $n = k$ 为信号捕获周期内的信号采样点数。以上捕获过程是对搜索频率中的某个分量进行计算,完成一颗卫星的信号捕获需遍历搜索所有频率分量。

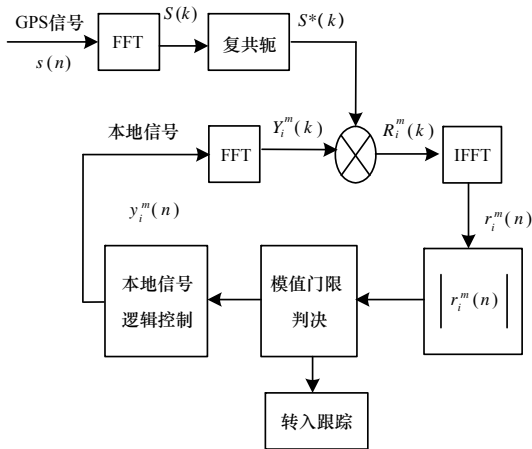


图 1 基于 FFT 的循环相关法伪码快速捕获流程

2.3 精频估计实现

上述信号捕获过程基于 1 ms 的输入数据实现,多普勒频移步进频率为 1 kHz,若相关峰值大于捕获门限则捕获完成。但 1 kHz 的频率分辨率太低,需要提高载频的频率分辨率以满足跟踪环路的需求。

本文根据相位关系获取精细频率,假设输入信号 S 在 p 时刻有最高频率分量,则其初始相位为

$$\theta_p = \tan^{-1}[\text{Im}(S_p)/\text{Re}(S_p)] \quad (7)$$

由于极短时间内输入信号载频变化不大,因此假设 p 时刻之后与 p 有极短间隔的 q 时刻也有最高频率分量,根据式(4)可以求得 θ_q 。利用相位角关系可得精细频率为

$$fr = (\theta_p - \theta_q)/2\pi(p - q) \quad (8)$$

3 跟踪实现

如图 2 所示,跟踪环节包括码跟踪环和载波跟踪环。码环输出超前码、瞬时码和滞后码。超前码及滞后码分别与剥离载波后的输入信号进行相关,相关输出经滤波后输入到码环鉴相器,从而产生控制信号,决定是否要改变瞬时码相位以跟踪输入信号。码环输出的瞬时码用于剥离输入信号中的 C/A 码。载波压控振荡器产生同相(I)及正交(Q)2 路信号,分别与经码剥离后的输入信号相关,相关输出经低通滤波器后送入载波环鉴相器,通过相位比较得出的控制信号再次滤波后送入载波压控振荡器,实现动态改变载波频率的大小并跟踪输入信号。

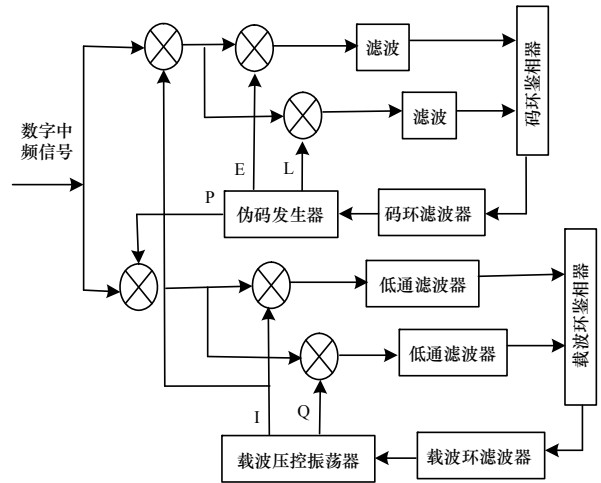


图 2 码跟踪环和载波跟踪环

4 数据采集及其仿真

4.1 数据采集系统

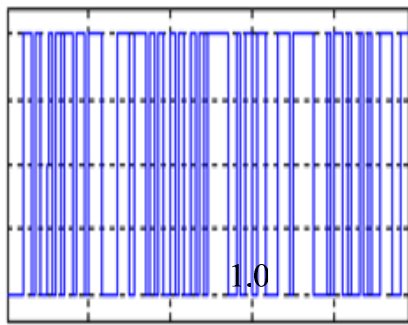
数据采集系统主要包括天线、射频前端、串并转换和数据采集卡。本文使用普通 L1 单频 GPS 天线接收卫星信号。射频前端实现信号下变频及信号采样,本文采用 GP2010 使用 3 级下变频将接收到的 L1 信号转换为 4.309 MHz 的中频信号,考虑 FFT 运算对采样数据点数的要求以及采样不能与 C/A 码速率同步的原则,用 4 MHz 的采样频率将中频信号重采样为 2 bit 数字输出。在 1 ms 的捕获周期内,输入数据被离散化为 4 000 个数据点。串并转换模块主要完成信号的串并转换并为数据采集卡提供时钟信号,为保证数据采集卡能在采样时钟上升沿正确采集到采样数据的实时电平,并考虑到 FPGA 的高效性,选择 Altera 公司生产的 Cyclone II 系列 FPGA 芯片实现其功能。数据采集卡实现 32 位并行信号至 PC 的传输,本文选用 NI 公司提供的 NI PCI-6534 数据采集卡。

4.2 仿真实验

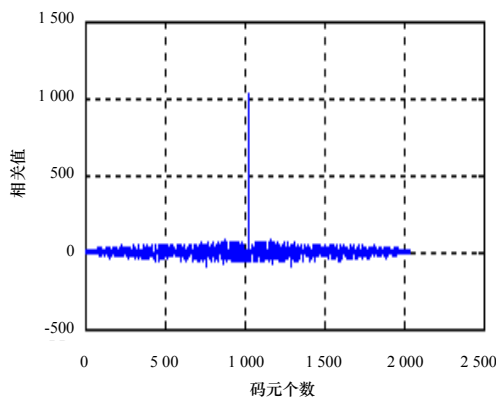
根据以上数据采集系统采集到的数字中频信号,用 1 ms 采样数据在 Matlab 环境下仿真实现卫星信号的捕获。图 3 是 9 号卫星的 C/A 码的二进制信号波形与自相关图,自相关峰值的最大值为 1 023,等于伪码自身的长度。

以 4 MHz 的速率数字化本地信号,在一个捕获周期内共有 4 000 个数据点,根据 FFT 快速捕获算法进行伪码捕获仿真,仿真结果如图 4 所示。其 C/A 码的起始位置在采样点的第 1 174 点处,最大频率分量出现在 -2 kHz 多普勒频移处,求得输入信号的载波频率为 998 kHz,此时得到的载频有较低的频率分辨率,利用相位角关系得精细载频为 997 944 Hz,满足跟踪环所需的频率分辨率在几十赫兹以内的要求。

图 5 为 9 号卫星的跟踪结果，图中纵坐标表示输出信号的幅度。



(a)9 号卫星 C/A 码的二进制信号波形



(b)9 号卫星 C/A 码自相关图

图 3 9 号卫星 C/A 码的二进制信号波形与自相关图

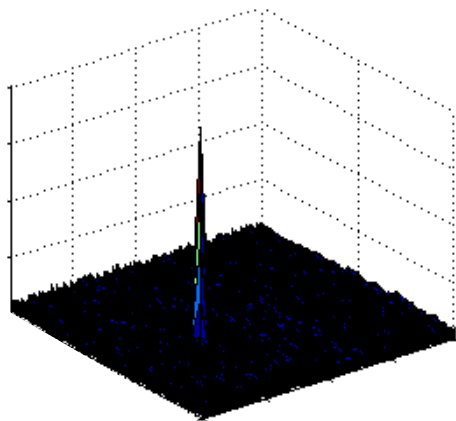


图 4 9 号卫星信号仿真结果

文中采样频率为 4 MHz，因此，进行 FFT 操作时需要对 1 ms 采样数据做补零处理，即进行 $N' = N + n = 4\ 000 + 96 = 4\ 096 = 2^{12}$ 点的 FFT 运算，所需乘法运算次数正比于 $N' \lg N' / 2$ ，加法运算次数正比于 $N' \lg N'$ 。若直接在时域进

行相关运算，所需乘法运算次数和加法运算次数均正比于 N^2 。因此，可以求得乘法和加法的频域运算次数相对于时域运算次数的百分比分别为

$$\frac{3N' \lg N' / 2 + N'}{N^2} = 0.486\ 4\% \quad (9)$$

$$\frac{3N' \lg N'}{N^2} = 0.921\ 6\% \quad (10)$$

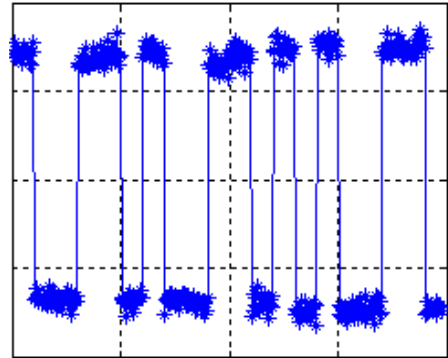


图 5 9 号卫星跟踪结果

5 结束语

本文采用基于 FFT 的循环相关法实现了伪码的快速捕获，得到了输入信号的 C/A 码初始位置和载波的精确载频，为跟踪环提供了有效的初始值。基于 FFT 的循环相关法将大量相关运算转换到频域进行，极大减少了计算量，能更好地满足高动态接收机的实时性要求。软件 GPS 接收机不同于传统的硬件方式，其灵活性、扩展性都是传统 GPS 接收机无法比拟的。

实现伪码的快速捕获是提高软件 GPS 接收机性能的关键，因此，本文的研究对软件 GPS 接收机的理论完善与工程应用有一定实际意义。

码元个数

参考文献

- [1] 孙希延, 纪元法, 施泮立. GPS 软件基带信号处理与定位实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5832-5836.
- [2] David M L, James B Y T. Acquisition Schemes for Software GPS Receiver[C]//Proceedings of IONGPS'98. Nashville, USA: [s. n.], 1998: 317-326.
- [3] Keshavarzian A, Salehi J A. Multiple-shift Code Acquisition of Optical Orthogonal Codes in Optical CDMA System[J]. IEEE Trans. on Communication, 2005, 53(4): 687-697.
- [4] Van-Nee D J R, Coenen A J R M. New Fast GPS Code Acquisition Technique Using FFT[J]. Electronics Letters, 1991, 27(2): 158-160.
- [5] Akopian D. Fast FFT Based GPS Satellite Acquisition Methods[J]. IEE Proceedings Radar Sonar & Navigation, 2005, 152(4): 277-286.
- [6] 张一, 张中兆, 沙学军. 高动态单频干扰环境下的 FFT 直扩捕获方案[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(9): 1431-1435.

编辑 陈 晖