

# 全球导航定位系统接收机的跟踪环路带宽设计

李文联<sup>1</sup>,雷玉洁<sup>1,2</sup>,金 璐<sup>2</sup>,章振保<sup>2</sup>

(1. 湖北文理学院物理与电子学院,湖北 襄阳 441053;

2. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为实现全球导航定位系统(GPS)软件接收机对卫星信号灵活稳定的跟踪,采用非相干延迟锁定环和科斯塔斯环来实现伪码跟踪和载波跟踪;选择环路的带宽,利用最优化的设计理念,设计了 GPS 软件接收机的最优环路带宽,并且根据所估计的信噪比来确定跟踪环路的最优带宽,以达到总的误差最小.采用 GPS 卫星中频信号采样器采集实际的 GPS 数据,并通过 Visual C 及 MATLAB 进行了仿真实验,结果表明,接收机成功地跟踪上了 7 路信号,并以通道 1 中的数据计算出了同相和正交相信号,所设计的搜索和跟踪方法灵活有效,为接收机能够快速地对 GPS 信号实现捕获和跟踪提供了一定的保障.同时也使得 GPS 软件接收机对信号处理改用软件来实现,拥有了极大的灵活性.

**关键词:**全球导航定位系统;软件接收机;信号捕获;信号跟踪

**中图分类号:**TN967.1

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.03.014

## 0 引 言

随着无线通信的发展,出现了多种模式的通信体制,为了满足互通性的问题,软件无线电的思想被提了出来.而软件接收机则以它的灵活性、可扩展性、经济等优点成为当前研究的热点问题,并在过去的十几年中,有很多的外国学者对软件接收机作过研究,取得了长足的进步.2000 年,James B Y T 写过一本书来介绍全球导航定位系统(Global Positioning System,以下简称:GPS)软件接收机的系统结构、信号的捕获及跟踪算法的细节,并且还提出了一种新的信号跟踪方法——同步信号块调整<sup>[1]</sup>(Block Adjustment of Synchronizing Signal,以下简称:BASS).随后,美国康奈尔大学的诸多学者在 CPU 为 ADM1.73G 的 PC 机上实现了实时多通道的单频 GPS 软件接收机;意大利的都灵理工大学的 Fabio Dovis 等人在以现场可编程门阵列(FPGA)及数字信号处理(DSP)为主要运算器件的平台上实现了 GPS 基带信号的实时处理等.

本文介绍了 GPS 软件接收机的基本结构,捕获及跟踪的基本原理及思路,采用了并行码相位搜索算法,实现了对 GPS 信号的捕获,并且利用最优化的设计理念,设计了接收机的最优环路带宽,最后做出了相应的仿真和验证.

## 1 GPS 软件接收机的结构

GPS 接收机主要包括了五个部分:天线、射频前端模块、模数转换模块、信号通道处理模块和定位解算模块.对于天线接收到的所有卫星射频信号,其中当然也混杂有一些干扰信号,首先要经过滤波和放大处理,当信号放大到合适的幅度后才送入到下变频器,继而在下变频器中与本机振荡器的信号进行多级混频,并把射频转换到合适的频率,变为中频信号,最后再由模数(A/D)转换器将输入信号数字化.接下来将采集到的各路数字中频信号传入通道作预处理,以实现最终的定位解算.GPS 软件接收机的结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示.

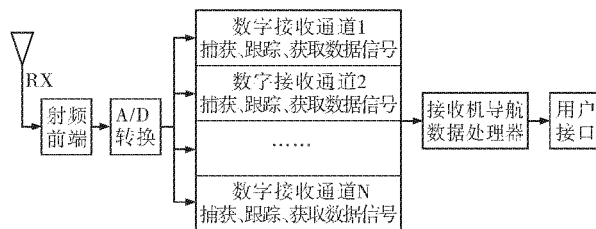


图 1 GPS 软件接收机结构图

Fig. 1 Structure of GPS software receiver

图 1 各个模块中,接收机的核心部分是若干并行的数字接收通道,每个通道对应一路卫星信号,并在其中对所有卫星信号进行具体的解调与解扩操作,实现载波同步与码同步、给出导航数据

等.同步的过程有两个:捕获和跟踪,信号的捕获实现的是对信号的载波频率和伪码相位的粗略估计,可以通过捕获电路对载波频率和码相位的二位搜索来完成,当达到捕获门限后,载波和伪码必须持续不断的动态调整,以达到精同步;信号跟踪的本质就是为实现对信号的稳定跟踪而采取的一种对环路参数的动态调整策略,最后得出导航数据.

## 2 GPS 信号的捕获及跟踪

GPS 接收机采集到的信号可能是来自所有码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)系统信号源的混合信号,从混合后的信号中分辨出视界范围内的各颗卫星,并对信号的载波频率和伪码相位做一个粗略估计才是信号捕获的目的.

串行捕获、并行频率空间捕获和并行码相位捕获是信号捕获常用算法.串行搜索算法存在两个不同的扫描过程,它涉及到对频率范围的搜索和 1 023 种不同码相位的搜索,因此搜索范围非常大且比较耗时;并行频率空间搜索算法则只是对 1 023 个不同的伪码相位进行搜索,但每一伪码相位都需要作频域的变换,存在较大的计算量;并行码相位搜索算法进行的是频率上的搜索,并行计算码相位,这样就将搜索空间消减为 41 个不同的载波频率,大大减小了计算量,故在设计中重点考虑并行码相位搜索算法.其原理<sup>[3]</sup>如下:

对于两个长度有限且均为  $N$ ,并且具有周期重复特性的序列  $x(n)$  和  $y(n)$ ,其循环互相关序列为

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

去掉比例因子  $1/N$ ,  $z(n)$  的  $N$  点离散傅里叶变换为

$$\begin{aligned} z(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m)y(m-n)e^{-j2\pi kn/N} = \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m)e^{j2\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(m+n)e^{-j2\pi k(m+n)/N} = \\ &= X^*(k)Y(k) \end{aligned} \quad (2)$$

公式(2)中:  $X^*(k)$  为  $X(k)$  的共轭形式.

根据公式(2),对 41 个频率的本地码分别作 2 次快速傅里叶变换(Fast Fourier Trnsform, 以下简称:FFT),1 次逐点相乘和 1 次快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Trnsform, 以下简称:IFFT)运算,可以较快的确定本地信号与原始的 GPS 信号相互间的关系,从而较快获得了多普勒

频率的初始值,以及 C/A 码(Coarse/Acquisition Code)的起始位置.这样运算量得到了大大的减小,搜索时间也缩短了,实现过程如图 2 所示.

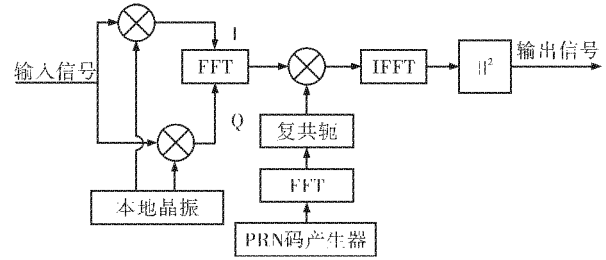


图 2 并行码相位搜索算法框图

Fig. 2 Chart of parallel code phase search acquisition

注: I—同相; Q—异相

信号跟踪的本质是为实现对信号的稳定跟踪而采取的一种对环路参数的动态调整策略,它具有两个目的:一是伪码分量的跟踪,解扩卫星信号,同时将伪距观测量从 C/A 码或 P 码(Precise Code)中提取出来,从而得到只有导航电文调制的载波信号,此过程中通常采用非相干延迟锁定环来实现;二是载波分量的跟踪,解调伪载波信号,对载波相位进行估计,获得导航电文信息,并将多普勒频移观测量提取出来,此过程中采用的是科斯塔斯环来实现的.载波跟踪环和码跟踪环都属于数字环路,它们的基本结构是相同的,只是环路鉴别器的算法以及环路的设计不一样.接收机的跟踪环路基本结构图<sup>[4]</sup>如图 3 所示.

## 3 GPS 跟踪环路带宽设计

对于 GPS 接收机跟踪环路的带宽选择,需要考虑以下两方面的因素:一是受到热噪声或干扰的影响,跟踪带宽要求要窄;二是考虑到载体动态性能的影响,跟踪环路带宽要求要宽.为兼顾两方面的影响,就需要折中考虑环路的带宽.最优带宽<sup>[5]</sup>是输入信噪比和载体动态性的函数,根据估计的信噪比来确定最优带宽以达到总的误差最小,延迟锁定跟踪环的误差  $\sigma_{DLL}$  为:

$$\sigma_{DLL} = \sqrt{\frac{B_n d}{2c/n_0} \left[ 1 + \frac{2}{c/n_0 \cdot T} \right] \lambda_c^2} + \frac{\alpha^n \tau^{(n)}}{3 B_n} \quad (3)$$

式(3)中:  $\tau^{(n)} = \frac{d^n \tau}{dt^n}$ ,  $\alpha = B_n / \omega_n$ . 依据信噪比,不断调整环路带宽,以达到误差最小、带宽最优的目的.

由方程(3)可知,带宽  $B_n$  对跟踪误差  $\sigma_{DLL}$  有成正比的影响,对方程(3)求导数得到:

$$\frac{1}{2c/n_0} \left( 1 + \frac{2}{Tc/n_0} \right) \lambda_c^2 - ((2n) \frac{\alpha^n}{3} - \tau^{(n)})^2 B_n^{-(2n+1)} = 0 \quad (4)$$

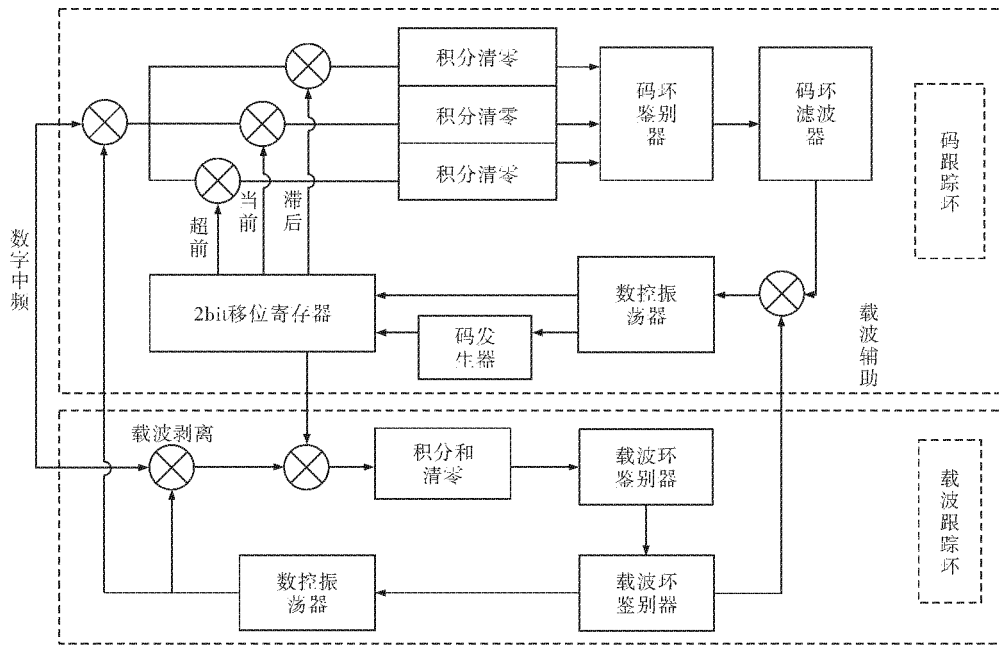


图 3 GPS 接收机跟踪环路结构图

Fig. 3 Design scheme for GPS tracking loop

则码环跟踪最优带宽为：

$$(B_n)_{\text{DLL}} = \sqrt[2n+1]{((2n)\frac{\alpha^n}{3} - \tau^{(n)})^2 / (\frac{1}{2c/n_0}(1 + \frac{2}{Tc/n_0})\lambda_c^2)} \quad (5)$$

同理,最优载波 PLL 环路带宽为：

$$\frac{1}{2c/n_0}(1 + \frac{1}{2Tc/n_0})(\frac{\lambda_L}{2\pi})^2 - ((2n)\frac{\alpha^n}{3}\Delta f^{(n-1)})^2 B_n^{-(2n+1)} = 0 \quad (6)$$

求其导数得：

$$(B_n)_{\text{PLL}} = \sqrt[2n+1]{((2n)\frac{\alpha^n}{3}\Delta f^{n-1})^2 / (\frac{1}{c/n_0}(1 + \frac{2}{Tc/n_0})(\frac{\lambda_L}{2\pi})^2)} \quad (7)$$

表 1 GPS 信号搜索结果

Table 1 The results of GPS signal acquisition

通道	卫星号	帧数/帧	码频率/Hz	载波多普勒值/Hz	伪距/m	同相输出频率/Hz	异相输出频率/Hz
0	7	343 464	1 023 000.805	-1 394.428	20 428 816.8	-1 670.0	259.0
1	8	343 464	1 022 999.019	1 308.111	21 314 229.6	1 212.0	147.0
2	24	343 464	1 023 001.811	-3 038.400	22 431 541.9	-766.0	112.0
3	26	343 464	1 023 000.000	-179.394	22 248 416.5	906.0	196.0
4	28	343 464	1 022 999.983	-183.616	21 283 246.3	-1 459.0	-291.0
5	29	343 464	1 022 999.789	133.147	22 200 497.3	-798.0	-106.0
6	31	343 464	1 022 999.849	73.736	20 112 259.0	1 706.0	-100.0

搜索出卫星 PRN 值、初始码相位和多普勒频移等参数后,进一步进行跟踪计算,通道 1 所接收到的卫星 (PRN=7) 同相与正交相的跟踪结果如

利用载波跟踪环辅助码跟踪环来实现跟踪,主要是由于载波跟踪环即便是在宽的带宽条件下,精度也相对很高,并且在这种情况下,载体动态引入的误差很小,几乎可以忽略不计。

## 4 仿真结果

对所提出的算法,进行了实验验证,搜索及跟踪算法的验证结果如表 1 和图 4 所示. 表 1 显示的是捕获跟踪状态,可以直观的看到软件接收机捕获跟踪各通道卫星的状态,包括通道卫星的通道号、卫星号、帧、码频率、载波多普勒值、伪距等. 由表 1 可以看出,有 7 颗卫星的信号被跟踪上了,从中以通道 1 的数据来说明情况。

图 4. 导航数据位信息包含在同相数据中,对其跟踪结果处理即可得到导航数据,而正交相中仅包含噪声。

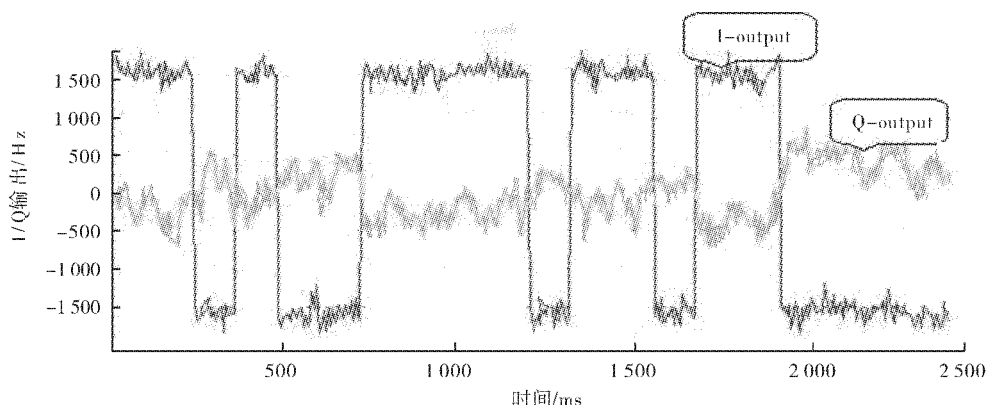


图4 GPS信号跟踪结果

Fig. 4 The result of GPS signal tracking

## 5 结 语

本文介绍了GPS软件接收机的基本结构,捕获及跟踪的基本原理及思路,通过实测数据对算法进行了仿真和验证.对于传统的GPS接收机,均是由专用定制的芯片来实现射频前端和信号处理部分的,虽然运算速度快,但是一旦定型,用户很难改变相应的参数或更换新的算法,且重新制版,不但周期长而且成本高.GPS软件接收机对信号处理功能改用软件来实现,拥有了极大的灵活性.

## 致谢

本文得到武汉苍穹数码电子有限公司的帮助,武汉工程大学的杨述斌教授给予了指导,在此致以衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] James B Y T. Fundamental of Global Positioning System Receivers: A Software Approach[M]. Hoboken, NJ, USA: A Wiley Interscience Publication, 2000.
- [2] 张玮. 高动态GPS接收机跟踪技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [3] Borre K, Akos D M, Jensen N B P R S H. 软件定义的GPS和伽利略接收机[M]. 杨东凯, 张飞舟, 张波, 译. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] 王建平. GNSS接收机跟踪环路的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [5] 唐康华. 基于射频前端的GPS软件接收机设计与验证[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 51-54.

## Design of tracking loop bandwidth of global positioning system receiver

LI Wen-lian<sup>1</sup>, LEI Yu-jie<sup>1,2</sup>, JIN Lu<sup>2</sup>, ZHANG Zhen-bao<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronics, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the principle of global positioning system(GPS) signal tracking, noncoherent delay-locked loop and costas loop were used for the realization of flexible and stable tracking to pseudo random noise code and carrier. Considering the thermal noise and dynamic stress error, the optimization method was adopted to design an optimal loop bandwidth for GPS software receiver. According to estimation of the signal to noise ratio, the optimal bandwidth was determined to achieve the minimum error. GPS intermediate frequency signal sampler was used for GPS data. Through the experiments of Visual C and MATLAB simulation, the results show that seven signals are successfully tracked, and the data of channel 1 in the calculated in-phase and quadrature phases are verified. The results proves that the method is flexible and effective. And a guarantee is provided for GPS software receiver to quickly realize the acquisition and tracking of GPS signal. At the same time, the function of using software to realize processing signal of GPS software receiver has great flexibility.

**Key words:** global positioning system; software receiver; signal acquisition; signal tracking

本文编辑: 苗 变