

GPS 软件接收机系统设计及仿真实验研究

李作虎^①, 郝金明^①, 李建文^{①②}, 张之孔^③

(^①解放军信息工程大学测绘学院, 郑州 450052; ^②武汉大学, 武汉 430072; ^③68029 部队, 兰州 730020)

【摘要】 软件接收机通道模块设计体现着软件算法的核心, 接收机运行控制设计决定着整个软件系统的循环。在接收机通道状态分析的基础上设计实现了 GPS 单频软件接收机, 并对自行开发的 C/A 码信号仿真器产生的数字中频信号进行了实验, 分析了捕获和跟踪状态中通道重要参数的时间序列关系, 验证了时域串行搜索捕获策略、超前一滞后非相干码跟踪环路以及直方图位同步算法的正确性和通道模块结构设计的合理性。

【关键词】 GPS; 软件无线电; 搜索; 捕获; 跟踪

【中图分类号】 TP311, TN96

【文献标识码】 A

【文章编号】 1009-2307(2008)02-0050-03

DOI: 10. 3771/j. issn. 1009-2307. 2008. 02. 018

1 引言

随着当前无线电通信技术以及电子技术的迅猛发展, 尤其是软件无线电技术以及高性能 DSP 和 FPGA 芯片的出现, 使得传统基于硬件的 GPS 接收机的软件化得以实现, 并出现了新一代的基于软件的 GPS 接收机。相对传统的基于硬件的 GPS 接收机而言, 软件 GPS 接收机具有更好的灵活性、扩展性和经济性^[1]。本文通过对软件 GPS 接收机系统设计分析的基础上, 用 C 语言自主研发了软件 GPS 单频接收机系统和 C/A 码信号模拟器, 并进行了仿真实验和分析, 为进一步的软件 GPS 接收机工程实现奠定了一定的技术实验基础。

2 软件接收机系统设计

2.1 GPS 软件接收机的整体架构

本文主要从软件设计的角度进行 A/D 采样之后中频数字信号处理系统模块的设计。图 1 左图是系统的功能描述, 右图是系统主循环与通道处理状态之间的关系图, 其中 Ch 是通道标示。相应的 4 个状态(搜索、确认、捕获和跟踪)具体功能分析见下文。

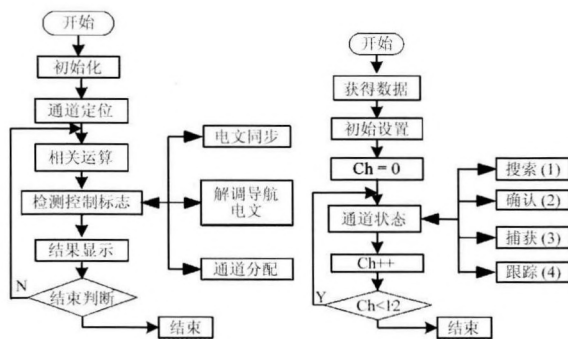


图 1 系统整体流程图



作者简介: 李作虎 (1982-), 男, 甘肃武威人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

E-mail: ahu. 1981@163. com

收稿日期: 2007-07-16

2.2 接收机通道模块设计

系统设计了 12 个通道, 每个通道提供 4 个相关器。从图 2 可得, 由伪码 DCO (数控振荡器) 控制的本地伪码产生器产生的即时码 P 和早晚码 E_L (与即时信号相比超前或滞后半个码片) 信号分别与同相 I 和正交 Q 信号在相关器内进行相关运算。该通道模块设计融合了载波跟踪环和伪码跟踪环^[2]。

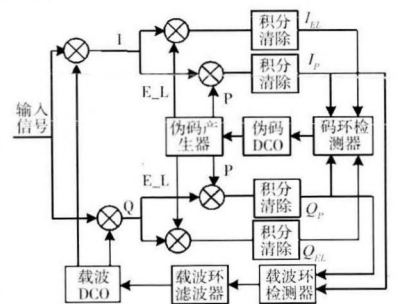


图 2 通道模块图

相关器内 I、Q 信号的抽样函数将被频繁调用, 故采用了 $f(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$ 的泰勒展开一阶项, 以便在保证精度的基础上减小运算量, 提高运算速度。具体抽样函数如下:

$$RSS(I, Q) = \begin{cases} I & (I = 0) \\ Q & (Q = 0) \\ Q + I^2/2Q & (0 < I \leq Q) \\ I + Q^2/2I & (0 < Q \leq I) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 系统运行控制设计

接收机通道相关器的操作采用了 PC 机的计时系统^[3], 但软件系统却采用了自己的服务中断程序, 即设置中断时间为 512μs。中断一旦发生, 通道数据寄存器将检测哪个通道已经清除了用于相关运算的数据。相关器将在特定的时间标志发生时读取数据并进行检测, 以确定是否存储测量数据。主中断程序检核相关和测量数据, 获得这些数据后分别送给每个通道所处状态对应的程序模块处理。图 3 表示了主程序与 PC 时钟控制下的中断服务程序的关系:

2.4 接收机通道状态分析

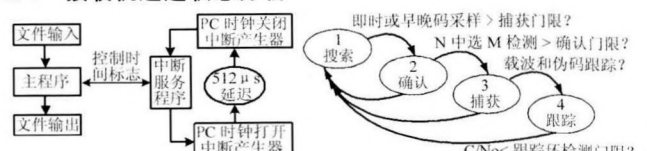


图 3 主程序与中断服务程序关系图

图 4 接收机通道状态图

1) 搜索状态

该状态通过对码和多普勒频移的搜索寻找相关峰。如果即时码相关器或者是早晚延迟码相关器的输出峰值(通过RSS函数抽样)超过了所设门限,控制将转向状态2。在接收机温启动或冷启动模式下多普勒被置于一个估计值,搜索是通过两个环进行的:进行码搜索的内环和频率搜索的外环。频率搜索采用跳跃扫描的方法,搜索范围是以设定的估计值为中心,以200Hz为搜索单位,在估计频率中心的两侧展开的,即为 \pm 。搜索范围的最大值取决于接收机所处的状态:温启动模式采用标称值,冷启动所需值将比标称值要大,如果有导航电文信息辅助时这个值将会小一点。两个环的搜索是同时进行的,这将是一个二维搜索。

2) 确认状态

状态2是确认状态:确认状态将停止搜索,本振信号将停留在状态1中搜索到的最大相关峰所对应的码相位和多普勒频移值上,以确认某一颗卫星信号的存在,目的是减小虚警概率。如果搜索检测器中采样M次,并将其与门限作比较,如果其中有M个或更多的值超过了门限,则表示信号存在,并转向状态3。该搜索算法被称为N中取M的固定时间段搜索检测器^[4]。

3) 捕获状态

在上一状态中某一卫星的信号被确认了,但是频率的范围仍可能达到500Hz。捕获状态是要通过跟踪卫星信号使本振频率变化范围足够小,以至于能够跟踪载波相位。这个状态一般将持续1500ms,在最后的500ms内,相关的信噪比C/No和相位误差会被检测到,数据位边界的同步信息也能获得。如果确认了载波和伪码的跟踪,系统将转向状态4。因为频率变化的可能范围较大,采用锁频环(FLL)辅助锁相环(PLL)的方案^[1]使频率能尽快稳定。随着该状态内时间的推进,锁频环的影响逐渐减弱,在状态结束时锁相环将起主要作用。

4) 跟踪状态

状态4是跟踪状态:伪码和载波跟踪环都将处于同步闭合状态,通过20ms(一个数据位周期)的积分累加跟踪伪码,通过1ms的积分累加跟踪载波相位。在这个过程中将在位同步的基础上寻找导航信号完成子帧同步并解调导航电文,并将时间同步于导航电文中的TOW(GPS周内秒)。

3 软件接收机关键算法设计

1) 卫星信号全软件搜索捕获算法

卫星信号的搜索采用时域串行搜索捕获的策略。该策略是在载波频率和码相位两个方向搜索,对载波和码相位的可能取值进行遍历搜索。当本地信号和接收信号中的码相位、载波频率基本一致时,根据相关峰进行捕获判决。

2) 卫星信号全软件跟踪算法

卫星信号一旦被捕获,并通过虚警检查确认后,就可以利用载波和伪码环路进行跟踪,实现本地参考信号与输入信号的准确同步,使相关输出始终处于最大状态。载波同步环路采用科斯塔斯(Costas)锁相环,伪码同步采用超前一滞后非相干跟踪环路。两个环路中鉴相因子的计算可参考文献[2],两个环路的具体实现可参考图2通道模块图。

3) 数据位同步算法

数据位同步采用直方图法进行^[5]。这种方法把每一个数据位周期20ms分割为20个1ms的C/A码周期,检测每个C/A码周期内数据符号的变化,并累计变化的次数作为该周期对应的直方图单元的值;同时在每个数据位周期内累加20个直方图小单元的值,统计该数据位周期内20个直方图单元的最大值,并记录该单元对应的序号;最后进

行判断同步与否:如果最大值的2倍大于20个直方图小单元的累加和,则表示同步成功,并返回最大值单元所对应的序号,作为重设伪码DCO时钟脉冲的输入;否则,同步失败,控制将转入搜索状态。

4 仿真实验及结果分析

4.1 C/A码中频信号模拟器

GPS C/A码是由2组10位线性移位寄存器G1、G2的模2和组成,不同卫星的C/A码通过G2不同的时延确定,生成的C/A码存储在数组CACode中^[3]。

为了验证接收机解调的功能,需要由ASCII格式的导航电文通过分帧编码^[6]、非归零转换获得二进制格式的数据码并保存在数组Navbit中。

中频载波信号的合成采用载波DCO控制频率累加,根据实时相位查找sin映射表,将相位转换为幅度值。同相sin映射表采用4级量化8相输出,对应的幅度序列为:-1, +1, +2, +2, +1, -1, -2, -2。

C/A码和数据码准备好就可以和载波合成,完成整个扩频调制。信道仿真采用广泛应用于通信系统中的加性高斯白噪声信道模型。信号合成的整个框图如图5:

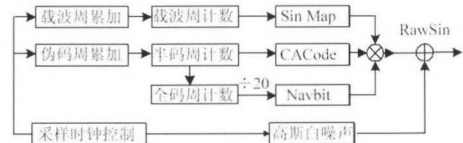


图5 信号合成图

整个信号合成都是在采样时钟的控制下进行的。该信号仿真器采用的采样频率是(40/7) MHz,约为5.714MHz,采用12通道结构设计;调制的导航电文采用基本帧结构,即一共1500bit,叠加的高斯白噪声的均值为0,方差为1,噪声功率为18.0 dB,等效的噪声放大系数为7.94;叠加噪声后的量化门限为8.5,产生的信号最终量化为(-3, -1, +1, +3)。信号仿真时间设为45s。产生的中频信号采样的时域分析满足量化范围,频域分析采用FFT处理后的频谱包络基本上反映了伪码扩频的包络特征。

4.2 接收机系统参数设置及软件描述

为了真正体现软件接收机系统配置的灵活性,系统所有可配置参数均采用文件的形式从外部获得;在没有外部参数文件的情况下内部的缺省值也能保证系统的正常运行。系统在初始化时读入了接收机的预设参数,包括接收机状态参数(正常启动、冷启动或者热启动)及对应的辅助信息、捕获门限、确认门限、多普勒搜索步长、捕获和跟踪环路所需的带宽、增益等参数。用户可以方便地在相应的文件中修改参数,进行各种环境和状态下的算法验证。

4.3 信号搜索与捕获仿真试验结果分析

基于以上方案设计的GPS单频软件接收机系统,对C/A码信号产生器产生的信号进行了系统仿真实验,以验证系统搜索、确认、捕获和同步解调的功能。

中频信号首先进入搜索状态,但停留时间很短,这有两方面的原因。一是因为仿真的信号仅仅调制了两颗卫星的导航电文数据,需要处理的通道数为两个;二是由于采用了温启动模式,利用了系统的辅助预报功能。捕获确认采用了N中选M的检测算法,在这里N=8, M=10。

捕获状态中系统将在设定的捕获时间内根据即时信号的同相和正交分量计算相位并判断符号,根据带符号的即时信号I、Q支路累加和获得载波DCO的频偏,并重设载波DCO频率。图6反映了通道1处于捕获状态载波DCO中载波频率的变化。由于噪声的影响,载波跟踪环在前

200ms 内对频率的影响较大, 在锁频环的作用下噪声对频率的影响逐步减小, 最后锁频环将逐步被居于主导地位锁相环所取代, 400ms 后载波 DCO 频率趋于稳定。图 7 为捕获状态中伪码 DCO 频率的变化。

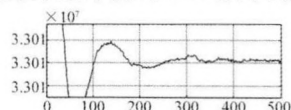


图 6 捕获状态中载波 DCO 频率变化

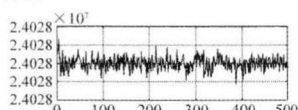


图 7 捕获状态中伪码 DCO 频率变化

对卫星捕获的判定是通过对相关器 I、Q 支路的即时信号 RSS 采样与捕获门限进行比较来确认的。图 8 是 1 号卫星采用时域串行搜索策略获得的二维相关峰捕获图。

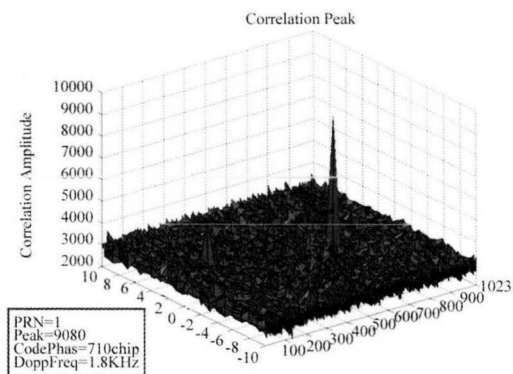


图 8 1 号卫星二维相关峰捕获图

伪码捕获环路采用的锁定检测器随时间的变化如图 9, 检测门限设定为 0.5, 如果低于该门限, 进程控制将退回搜索状态。

图 10 是通道 1 捕获 1 号卫星后位同步中直方图值的时序情况。由于噪声影响因素小, 20 个单元中第 17 个单元的值很容易达到了 2 倍最大值大于累加和的同步要求, 即达到位同步状态, 并返回最大值单元对应的序号, 用来重置通道的毫秒计数器。该计数器的值将用来获得导频信号, 这是子帧同步所必需的。

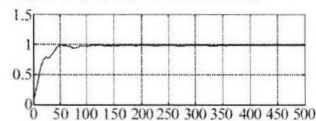


图 9 伪码环路锁定检测器时序值

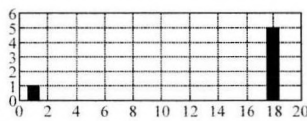


图 10 位同步直方图

由于载波同步采用了科斯塔斯锁相环, 其输出为相干载波, 存在相位模糊问题, 相差可能为 0, 也可能为 π 。如

图 12, 采用 PSK 进行载波解调, 即根据 $ATAN2(Q, I)$ 计算 I 和 Q 的瞬时相差, 通过鉴相因子和判决门限(该实验中取为 0.25)进行载波相位恢复。载波恢复之后, 就可以根据二进制相移键控 BPSK 调制原理, 根据相差即可获得每个数据位 bit 对应的值: 相差为 π 时为 1, 相差为 0 时为 0。获得每个 bit 位的值后, 根据位同步信息寻找导频信号, 进一步完成子帧同步。

子帧同步的结果就是导航电文数据码的解调^[5]。图 11 是 1 号卫星的数据码 1500bit 中的前 100bit, 与调制前的数据码完全吻合。这说明该系统基本具备了卫星信号的搜索捕获和跟踪解调的功能。

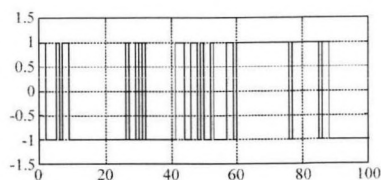


图 11 解调出的部分导航数据码

5 结束语

给出了基于 PC 机的一种 GPS 软件接收机系统设计方案, 重点研究了接收机通道模块设计和系统运行控制设计, 进行了通道状态分析, 并对关键算法进行了说明。在此基础上用 C 语言开发了 C/A 码单频软件接收机系统和 C/A 码信号仿真器, 最后在正常模式下进行了卫星信号的处理流程实验, 包括信号的搜索确认、捕获同步和跟踪解调, 分析了搜索捕获和跟踪解调状态中重要参数的时间序列关系, 较好地验证了系统的各项功能以及核心算法的正确性。

参考文献

- [1] 杨小牛, 邹少丞等译. 软件无线电技术与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 4-9.
- [2] Krunvieda et al. A complete IF software GPS receiver: a tutorial about the detail [R]. Data Fusion Corporation, 2003: 799-810.
- [3] 黄智伟. 接收机电路设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 281-290.
- [4] Kaplan E. Understanding GPS: Principles and Applications, Norwood [M]: MA, Artech House Publishers, 1990: 82-130.
- [5] Lei Dong. IF GPS Signal Simulator Development and Verification [J]. University of CALGARY, 2003: 96-98.
- [6] GPS Joint Program Office. ICD-GPS-200 [S]: GPS Interface Control Document, 1997.
- [7] 赵珞成. GPS 接收机时钟控制方法 [J]. 测绘科学, 2006, 31(1).

Study on system design and simulation of GPS software receiver

Abstract: The design of software receiver channel module embodies the kernel of the software algorithm, and the design of the performance control determines the overall cycle in the system. Based on the analysis of the states of the channel, a GPS signal-frequency software receiver is realized. A test on the software receiver is made with the digital IF signal produced by a C/A signal simulator developed by authors. The time sequence information of the important parameters in the acquisition and track states is analyzed. The analysis result indicates the exactness of the algorithms, which includes the method of serial searching in time domain, the method of tracking with early-late non coherent code tracking loop and the bit synchronization way with histogram, and the rationality of the channel module design.

Key words: GPS; software definition radio; search; acquisition; track

LI Zuo-hu^①, HAO Jin-ming^①, LI Jian-wen^{①②}, ZHANG Zhi-kong^③ (①Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; ②Wuhan University, Wuhan 430072, China; ③68029 Troops, Lanzhou 730020, China)