软件 GPS 接收机架构与捕获算法实现

赵 昀 张其善

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了将软件无线电技术应用于全球定位系统 GPS (Global Positioning System)接收机,提出了一种符合目前硬件技术水平的软件 GPS 接收机设计架构;分析了软件 GPS 接收机信号捕获方法的要求;采用循环相关算法作为软件 GPS 接收机的信号捕获算法,在 Matlab 仿真环境下实现了相应的捕获程序,并使用 GPS 卫星 C/A 码信号采集数据进行了初步验证;初步验证结果表明这种捕获算法能够为软件 GPS 接收机提供快速捕获能力,同时不损失信号搜索的灵敏度,是一种适用而高效的软件 GPS 接收机捕获方法.

关 键 词: 全球定位系统; 软件接收机; 捕获算法; 循环相关; Matlab

中图分类号: TN 927

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)01-0053-04

Architecture of software GPS receiver and implementation of its acquisition algorithm

Zhao Yun Zhang Qishan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The design architecture of the software GPS (global positioning system) receiver in accordance with the current development level of the involved hardware technology was proposed, in order to develop the software radio technology application to designing and performing the GPS receiver. The requirements of the signal acquisition algorithm for the software GPS receiver were analyzed. The circular correlation algorithm was presented and employed as the signal acquisition algorithm, which was more suitable for the software GPS receiver compared to the conventional approaches for the traditional GPS receivers. The corresponding signal acquisition program was implemented in the Matlab simulation environment. The GPS satellite C/A-code signal collected data was used to test the implemented acquisition algorithm. The primary test results show that this acquisition algorithm can provide the software GPS receiver with fast signal acquisition performance without sacrificing signal detection sensitivity; i. e. it is a suitable and efficient acquisition algorithm for the software GPS receiver.

Key words: GPS(global positioning system); software receiver; acquisition algorithm; circular correlation; Matlab

近年来,伴随电子制造业的飞速发展,硬件所取得的进步非常惊人,同时带给软件技术巨大的成长空间. 作为一个特定领域的体现,软件全球定位系统 GPS(Global Positioning System)接收机正在成为一个活跃的技术发展方向. 尽管目前仍很难界定这种软件接收机,但普遍认为它融入了软件无线电(software radio)的设计概念. 软件无线电的关键思想可以归结为:将 A/D 尽可能靠近天线;用软件来完成尽可能多的无线电功能[1]. 具体而言,软件 GPS 接收机强调软件实现模式,即

收稿日期: 2004-11-12

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2004AA133020)

作者简介: 赵 昀(1971-),女,北京人,博士后, yunzhao@buaa.edu.cn.

在必要、通用的基础硬件平台上,将接收机功能最大限度地软件化.

本文将首先讨论软件 GPS 接收机的架构,以及与传统 GPS 接收机相比,软件接收机的主要优势.以此为基础,探讨并描述适合软件 GPS 接收机的信号捕获方法——循环相关算法,及其在 Matlab 仿真环境下的实现.

1 软件接收机的架构

限于目前的硬件技术水平,在软件 GPS 接收机中,射频(RF)前端芯片仍是必需的,这种接收机的架构,如图 1 所示.

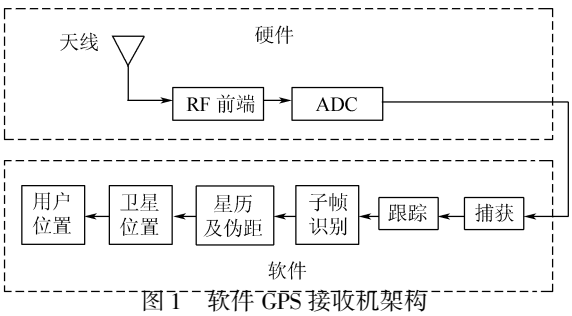


图 1 软件 GPS 接收机架构

天线接收 GPS 卫星信号,经过 RF 前端,输入信号的幅值被适度放大,频率转换为期望的输出频率;ADC(A/D 转换器)将上述输出信号数字化;天线、RF 前端和 ADC 仍由硬件实现.

在信号数字化以后,全部处理交由软件实现.信号捕获的目的是发现某一卫星的信号,信号跟踪则是找出导航数据的相位转换.在传统接收机中,捕获和跟踪由硬件实现.根据导航数据的相位转换,可以获取导航数据的子帧,进而得到星历数据和伪距,从星历数据可确知卫星位置.最终,用户位置可通过卫星位置和伪距计算得出.至于软件平台,它可以是数字信号处理 DSP(Digital Signal Processing)芯片,也可以是通用 PC.目前,实现软件 GPS 接收机的主要难点是实时性问题[2].

在接收机中尽可能接近天线的位置,使用 ADC 将输入信号转换为数字信号.一旦信号被数字化,由软件实现的数字信号处理将用于获取需要的信息.软件无线电的主要目的是硬件使用与变化最小化.理论上,通过软件可以调整、甚至改变无线电的功能,从而可以实现极大的灵活性.

与传统 GPS 接收机相比,软件实现赋予接收机一些新的优越特性,如:数字处理模块更靠近接收机天线,导致定位或测量精度的提高;软件实现带来的灵活性、扩展性强和易升级维护性,有力支持引入新的设计,并最小化实现代价;硬件组件得以简化及其通用性,导致设备成本及功耗降低等.

2 软件接收机的捕获算法与实现

2.1 GPS 信号捕获

为了跟踪并解码 GPS 信号,必须使用捕获算法来搜索信号的出现.一旦信号被搜索到,可以获取必要的参数并转入跟踪程序.有两个重要参数必须被测量:即 C/A 码周期的起始,以及输入信号的载波频率[3].一个采集到的数据集通常包括几颗卫星的信号.每个信号包含具有不同起始时间的不同 C/A 码,以及不同的 Doppler 频率.捕获方法是发现 C/A 码的起始点,并使用这一信息解扩频谱.一旦频谱被解扩,输出将成为连续波信号,它的载波频率也因此可以找到.

2.2 软件接收机的捕获方法

常规的信号捕获方法是通过硬件实现的,对输入数据连续执行捕获,一旦信号被搜索到,将立即传给用于跟踪的硬件.在许多接收机中,捕获是对多颗卫星并行执行的.

对于软件接收机,捕获通常是对一个数据块执行的.如果接收机是实时工作的,跟踪程序将作用于接收机当前采集到的数据.因此,用于捕获的数据与被跟踪的数据之间存在一个时间间隔.如果捕获过程较慢,这种时间间隔较长,传入跟踪程序的数据可能是过时的;换言之,接收机可能跟踪不到信号.由于期望建立一种实时的接收机,所以捕获速度十分重要.

由于捕获速度至关重要,一般而言,则应尽可能地缩短用于捕获的数据长度,10 ms 数据应被视为用于捕获的最长数据[4].捕获算法必须在 -10 ~ +10 kHz 的频率范围内搜索,以覆盖全部预期的 Doppler 频率范围[2].同时,搜索的频率带宽不能过窄(可取 1 kHz 步长),否则会影响捕获速度.尽管这将导致较差的灵敏度,但跟踪算法具有非常窄的带宽,可以实现相对高的灵敏度.此外,运算量的大小也取决于具体的捕获算法.

2.3 循环相关算法

循环相关算法[2,5]适用于软件接收机.由于输入数据并非是连续的,而这种算法十分适合数据块.有关循环相关算法,描述如下.

在离散时间域,输入信号 $x(n)$ 与本地生成信号 $l_{si}(n)$ 之间的互相关,可以记作

$$r(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) l_{si}(n+m) \qquad (1)$$

如果 $x(n)$ 是实数,则 $x(n)^* = x(n)$,其中 * 表示复共轭.取 $r(n)$ 的离散傅里叶变换(DFT),其结

果为

$$R(k)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{N-1}x(m)l_{si}(n+m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi kn/N}=\sum_{m=0}^{N-1}x(m)\left[\sum_{n=0}^{N-1}l_{si}(n+m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(n+m)k/N}\right]\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi mk/N}=L_{si}(k)\sum_{m=0}^{N-1}x(m)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi mk/N}=L_{si}(k)X^{*}(k)\quad(2)$$

上式又可写作

$$R(k)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{N-1}x(n+m)l_{si}(m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi kn/N}=L_{si}^{*}(k)X(k)\quad(3)$$

由此,$R(k)$的幅值,可以记作

$$|R(k)|=|L_{si}^{*}(k)X(k)|=|L_{si}(k)X^{*}(k)|\quad(4)$$

上述关系可用于找到输入信号和本地生成信号的相关.

在这里,本地生成信号被认为包含 C/A 码和 RF 信号,RF 信号为复数. 本地信号由复数 RF 与 C/A 码的乘积得到,因此,也是复数量. 假设 L_1 载频(1 575.42 MHz)信号经过 RF 前端,转换为 21.25 MHz,再以 5 MHzADC 采样,数字中频输出频率为 1.25 MHz. 输入数据被视为实数量(并非复数),在经过下变频及数字化后,被首先保存在存储器中. 此外,假设捕获程序以 1 kHz 的步长搜索 1 250−10 ~ 1 250+10 kHz 的频率范围,则共有 21 个频率分量. 本地生成信号 l_{si}可表示为

$$l_{si}=C_s\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_i t}\quad(5)$$

其中,下标 s 表示卫星编号;下标 $i=1,2,3,\cdots,21$;C_s 是卫星 s 的 C/A 码;$f_i=1\ 250-10$, $1\ 250-9$, $1\ 250-8$, …, $1\ 250+10$ kHz;t 表示时间. 这个信号与输入 GPS 信号进行相关,如果它包含正确的 C/A 码和正确的频率分量,当达到正确的码相位时,输出将形成峰值.

循环相关算法只涉及如上所述的 21 个频率分量. 以 1 ms 数据的捕获为例,如果以 5 MHz 采样,则包含 5 000 个数据点. 从而,这种算法将产生 105 000(21×5 000)个输出. 而传统 GPS 接收机中由硬件实现的常用快速傅里叶变换(FFT)捕获算法,是将本地生成的 C/A 码与输入信号依采样点逐点相乘,在同样的前提条件下,需要 5 000 次运算,每次运算包含 5 000 点相乘和 5 000 点 FFT. 输出为 5 000 个数据帧,每一帧包含 2 500 个频率分量(由于只有 2 500 个频率分量提供有效信息,另 2 500 个分量为冗余信息). 从而,将在频域产生1.25×10^{7}(5 000×2 500)个输出. 由此可见,采用循环相关算法可显著抑制运算开销.

每一次的循环相关只使用 1 ms 输入数据. 对输入数据执行这种捕获程序,需要采取以下步骤:

1) 对 1 ms 输入数据 $x(n)$执行 FFT,将输入转换到频域,得到 $X(k)$,其中 $n=k=0\sim4\ 999$;

2) 取 $X(k)$的共轭,则输出为 $X(k)^{*}$;

3) 使用方程(5),生成 21 个本地信号 $l_{si}(n)$,其中 $i=1,2,\cdots,21$. 本地信号也必须以 5 MHz 采样. 本地信号频率 f_i 的间隔为 1 kHz;

4) 对 $l_{si}(n)$执行 FFT,将其转换到频域,得到 $L_{si}(k)$;

5) 将 $X(k)^{*}$ 与 $L_{si}(k)$逐点相乘,结果为 $R_{si}(k)$;

6) 取 $R_{si}(k)$的逆 FFT,将结果转换到时域,得到 $r_{si}(n)$,并求出绝对值$|r_{si}(n)|$,$|r_{si}(n)|$的总数为 105 000(21×5 000);

7) 处于第 n 个位置及第 i 个频率分量上的$|r_{si}(n)|$最大值(需要超过设定的阈值),以 200 ns 分辨率给出了输入数据中 C/A 码的起始点,载波频率的分辨率为 1 kHz.

2.4　算法实现及仿真结果

根据上述算法,一个在 Matlab 仿真环境下实现的捕获程序,用于获取 GPS 输入信号的 C/A 码起始点和载波频率. 输入信号包含来自多颗卫星(含第 6 号卫星)的信号,信号经过了放大、下变频、5 MHz 频率采样等处理. 对于较强的卫星信号,通常仅对 1 ms 输入数据执行捕获程序,即可实现捕获. 对于较弱的卫星信号,则需要对几个 ms 的输入数据进行操作.

在时域中,输入信号的一个片段如图 2 所示. 这些数据与噪声相似. 通过循环相关算法,获取到第 6 号卫星的 C/A 码起始点,如图 3 所示. 起始点位于第 2 884 个数据点,即这 1 ms 的 0.576 8 ms 时刻. 1 kHz 间隔的 21 个频率分量的相关输出如图 4 所示. 最高分量位于 $i=7$,频率为 1 246 kHz,这是数字中频频率,对应到载波 Doppler 频率,应为 1 575.416 MHz (即 1 575.42 MHz− 4

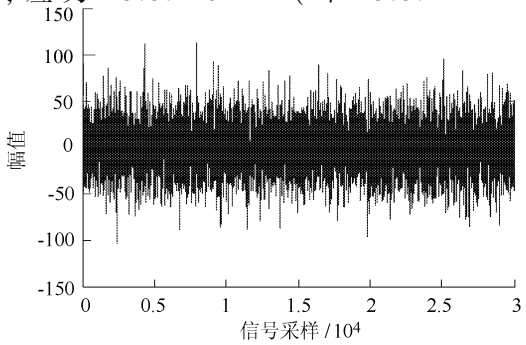


图 2　输入数据片段(含 30 000 个数据点)

kHz). 图3和4清晰地显示出通过捕获程序获得的关于第6号卫星输入信号的两个重要参数,C/A码起始点和载波频率. 图5则更直观地表示了这个捕获结果.

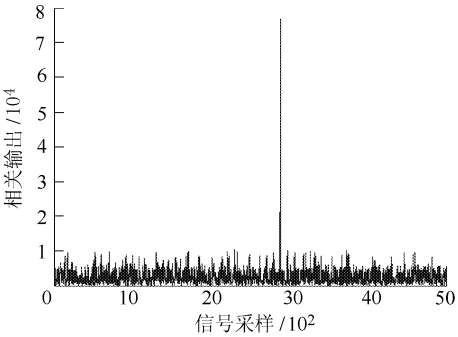


图3 第6号卫星的C/A码起始点

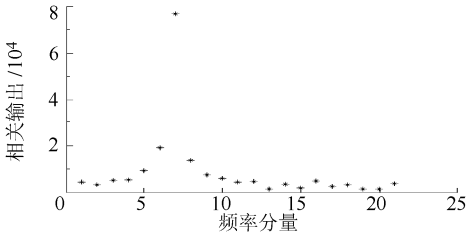


图4 第6号卫星扩频信号的频率分量

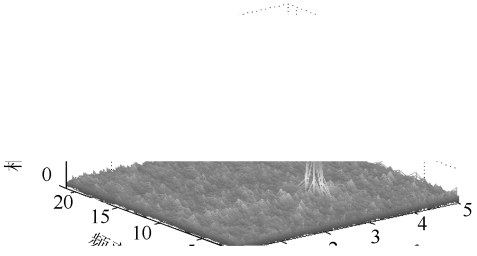


图5 第6号卫星的捕获结果

3 结束语

本文首先讨论了软件GPS接收机的基本架构,并阐述了软件接收机的主要优点. 此后,就软件GPS接收机的实现技术,着重研究了适合软件接收机的信号捕获方法——循环相关算法及其在Matlab环境下的实现.

伴随有关技术的进步,软件GPS接收机彻底摆脱传统硬件方法的进程正逐步加快. 在软件接收机新的设计概念下,有关软件方法的研究已引起许多研究者的关注,许多实时化方法正在开发.

循环相关算法能够为软件GPS接收机提供快速捕获能力,同时不损失搜索到信号的灵敏度. 初步的研究表明,对于多数卫星信号,循环相关算法仅使用1 ms数据即可实现捕获,从而为软件GPS接收机,提供了一种适用而高效的捕获方法.

参考文献 (**References**)

[1] 钮心忻,杨义先. 软件无线电技术与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000. 1~9
Niu Xinxin, Yang Yixian. Software radio technology and applications[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2000. 1~9 (in Chinese)

[2] Tsui J B. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. New York: Wiley, 2000. 133~164

[3] Kaplan E D. Understanding GPS: principles and applications [M]. Boston: Artech House, 1996. 75~132

[4] Spilker, Jr J J. GPS signal structure and performance characteristics [J]. Navigation, 1978, 25(2): 121~146

[5] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2000. 123~132
Zheng Junli, Ying Qihang, Yang Weili. Signals and systems [M]. Second Edition. Beijing: High Education Press, 2000. 123~132 (in Chinese)