

基于 Matlab/C 的 GPS 软件接收机跟踪算法

陈俊宇, 苟鹏飞, 赵文军, 王进祥

(哈尔滨工业大学先进 SoC 系统与集成研发中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对 GPS 软件接收机提出一种跟踪部分的实现算法, 该算法包括码跟踪和载波跟踪。在 PC 上用该算法进行模拟数据的 Matlab 仿真和真实数据 C 的实现, 在集成 ARCA3 嵌入式微处理器的 GT3000A 平台上运行该程序。实验证明, 该算法实现 C/A 码相位和载波频率的精确跟踪, 并得到导航数据。

关键词: GPS 软件接收机; 码跟踪; 载波跟踪; ARCA3 嵌入式微处理器

Matlab/C-based GPS Software Receiver Tracking Algorithm

CHEN Jun-yu, GOU Peng-fei, ZHAO Wen-jun, WANG Jin-xiang

(Research Center of Advanced SoC System and Integration, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

【Abstract】 Aiming at GPS software receiver, this paper proposes an implement algorithm for tracking part including code tracking and carrier tracking. The algorithm is simulated in Matlab based on simulation data and implemented in C based on real data in PC. The C program runs on GT3000A platform which integrates ARCA3 embedded microprocessor. Experiment proves that the algorithm carries out the tracking function of C/A code phase and carrier frequency, and decodes the navigation data.

【Key words】 GPS software receiver; code tracking; carrier tracking; ARCA3 embedded microprocessor

一般的 GPS 软件接收机由天线接收卫星信号通过射频 (R-F) 前端, 将接收到的信号下变频到合适的频率, 将模拟信号进行采样转变成数字信号, 由硬件完成。数字信号处理部分包括捕获、跟踪、导航数据解算和定位算法等, 由软件完成。本文研究重点是跟踪部分的算法, 实现对真实 GPS 信号的跟踪。

1 跟踪算法分析

1.1 总体框架

跟踪是为了实现 C/A 码和载波的精确同步, 它分为码相位跟踪和载波跟踪 2 个环路, 使用 2 个锁相环分别进行跟踪。2 个环路的跟踪部分总体框架^[1]如图 1 所示。

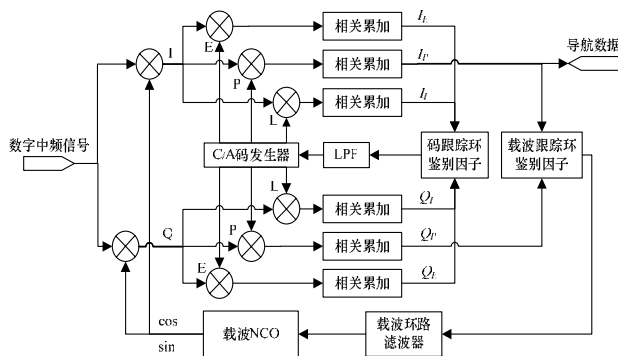


图 1 2 个环路的跟踪部分总体框架

在软件接收机中, 码相位跟踪环和载波跟踪环同时工作, 实时地调整本地码相位和载波的频率, 使误差逐渐减小直到实现跟踪, 输出导航数据。下文分别对上述 2 个环路做详细分析。

1.2 C/A 码跟踪环路

码跟踪是为了跟踪输入信号中码相位的变化。本结构采

用的码相位跟踪环路是传统的超前滞后锁相环, 分别用相差半个码片的超前码(E)、即时码(P)和滞后码(L)与数字中频信号相乘, 找出与数字中频信号相关结果最好的码, 并不断调整本地 C/A 码以实现码同步, 其具体算法如图 1 所示。超前和滞后的 C/A 码分别与 I 路和 Q 路的信号做相关运算, 得到 I_E, I_L 和 Q_E, Q_L , 根据鉴相因子的值不断调整本地 C/A 码发生器的初始码相位。使用的鉴相因子不同, 在计算过程中的计算量和产生的误差也不同, 通常使用的各种码环鉴相因子^[2]及其特点如表 1 所示。

表 1 各种码环鉴相因子及其特点

| 码环鉴相因子 | 特点 |
|---|---|
| $(I_E - I_L)I_P + (Q_E - Q_L)Q_P$ | 点积功率, 它是使用了 3 个相关器的 DLL 鉴相器, 具有最小的运算量。对于 1/2 码片间隔的相关器, 在 $\pm 1/2$ 码片的输入误差范围内, 有近似真实的误差输出 |
| $(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)$ | 超前减去滞后功率, 它具有中等运算量。在 $\pm 1/2$ 码片的输入误差范围内, 与超前减去滞后包络鉴相器有相似的 DLL 鉴相器误差性能 |
| $\sqrt{(I_E^2 + Q_E^2)} - \sqrt{(I_L^2 + Q_L^2)}$ | 超前减去滞后包络, 具有较大的运算量。对于 1/2 码片间隔的相关器, 在 $\pm 1/2$ 码片输入误差范围内, 产生良好的跟踪误差 |
| $\frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)}$ | 归一化的超前减去滞后功率, 它具有大运算量。与归一化的超前减去滞后包络检相器有相似的性能 |
| $\frac{\sqrt{(I_E^2 + Q_E^2)} - \sqrt{(I_L^2 + Q_L^2)}}{\sqrt{(I_E^2 + Q_E^2)} + \sqrt{(I_L^2 + Q_L^2)}}$ | 归一化的超前减去滞后包络, 它具有最大运算量, 可以去掉幅度敏感性。对于 1/2 码片间隔的相关器, 当输入误差在小于 ± 1.5 码片的范围内时能产生良好的跟踪误差 |

作者简介: 陈俊宇(1985 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 数字 IC 设计; 苟鹏飞, 硕士; 赵文军, 学士; 王进祥, 教授、博士

收稿日期: 2009-01-16 **E-mail:** chjyu_0508@163.com

选择合适的鉴相因子后，根据鉴相因子的值不断调节 C/A 码的相位，使之接近并最终达到实际的 C/A 码相位。

1.3 载波跟踪环路

载波跟踪是为了精确同步本地和输入信号的载波，由于在跟踪的过程中可能遇到导航数据改变而产生的 180° 相差，因此采用对 180° 相位翻转不敏感的 costas 锁相环。

下文解释载波跟踪环路的数学原理。

在经过下变频和 ADC 采样后的数字中频信号表示为：

$$S(n) = \sqrt{2P} \times D(n) \times CA(n) \times \cos(\omega_c n + \theta_1)$$

其中， $D(n)$ 表示导航数据； $CA(n)$ 表示 C/A 码； ω_c 表示载波的实际相位，它包括在传播过程中产生的多普勒频移； θ_1 表示初始相位。

输入信号与本地产生的载波进行混频，再与本地产生 C/A 码相乘，从而剥离 C/A 码，在此假设本地产生的 C/A 码和实际的 C/A 码相位已经匹配。相关累加的运算相当于一个低通滤波器，滤去高频成分，剩下部分表示为：

$$I_p = \sqrt{2P} \times \cos(\Delta\omega \times n + \Delta\theta) = A \times \cos(\Delta\phi + \Delta\theta)$$

$$Q_p = \sqrt{2P} \times \sin(\Delta\omega \times n + \Delta\theta) = A \times \sin(\Delta\phi + \Delta\theta)$$

由上述 2 个值可计算载波鉴相因子。采用不同的载波鉴相因子会有不同的计算量和效果，常用的载波鉴相因子^[2]及特点如表 2 所示。在选择合适的载波鉴相因子后，求出当前载波与实际载波的相位差，根据相位差值不断调节载波 NCO，使其实现同步。

表 2 各种载波鉴相因子及特点

| 载波鉴相因子 | 相位差输出 | 特点 |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| $\text{sign}(I_p) \times Q_p$ | $\sin(\Delta\phi + \Delta\theta)$ | 在高信噪比时性能接近最好，斜率与信号幅度呈正比，运算量较低 |
| $I_p \times Q_p$ | $\sin(2(\Delta\phi + \Delta\theta))$ | 在低信噪比时性能接近最好，斜率与信号幅度的平方呈正比，运算量中等 |
| Q_p / I_p | $\tan(\Delta\phi + \Delta\theta)$ | 在高低信噪比时性能良好。性能与幅度无关，运算量大。结果必须核对，以区分接近 ±90° 时的 0 误差 |
| $\arctan(Q_p / I_p)$ | $\Delta\phi + \Delta\theta$ | 在高低信噪比时性能最好。性能与幅度无关，运算量最大 |

2 跟踪环路仿真

2.1 基于模拟 GPS 信号的跟踪环路 Matlab 仿真

在仿真中，使用的信号源是仿照真实 GPS 信号模拟的，包括定值的 C/A 码偏、载波多普勒频移和及高斯白噪声。模拟的载波中频为 1.25 MHz，采样率为 5 MHz。一个 C/A 码周期为 1 ms，共有 1 023 个码片，在采样后有 5 000 个采样点，因此，每个码片有 5 000/1 023=4.888 个采样点，精度最多可达到 1 个采样点，即 0.204 6 个码片。由此可知，采样频率越高，理论可以达到的精度越高。模拟信号有 2.4 kHz 的多普勒频移，实际的载波频率变成 1.252 4 MHz，实际的码片初始相位为第 500 个采样点。由于捕获载频要达到 ±100 Hz 的精度，码相位要达到 ±1 个码片的精度，在此假设捕获的粗略载频为 1.252 31 MHz，与实际载频相差 90 Hz，粗略初始码相位为第 504 个采样点，与实际初始码相位相差 4 个采样点。

频率偏移量表示实际载波频率与捕获到的粗略载波频率之差。经过很短的一段时间(约几十毫秒)，载波频率能被跟踪到。载波频率在 ±2 Hz 范围内保持稳定波动，中心频率为 90 Hz，与上文假设的频差值相同，说明载波跟踪效果与实际相符。

在运行程序后输出的载波跟踪仿真如图 2 所示。

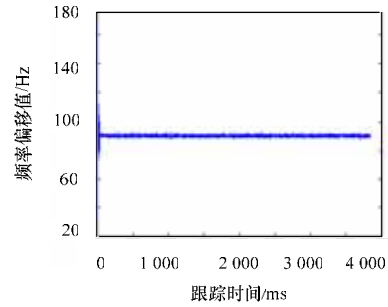


图 2 载波跟踪仿真

在运行程序后，输出的局部放大的 C/A 码相位载波跟踪仿真图如图 3 所示。

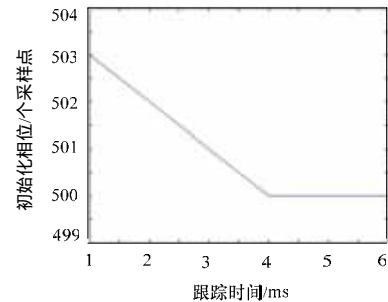


图 3 C/A 码相位跟踪仿真

其中，纵坐标表示所处的采样点，由此可知，经过 4 ms 的时间，码相位被跟踪到，初始相位稳定在第 500 个采样点，与之前假设的初始码相位的值相同，说明码相位跟踪的效果与实际相符。

由图 1 跟踪部分总体框架可知，在载波和码相位被精确跟踪后，可以将输入信号的载波和 C/A 码剔除，只留下导航数据，此时输出的导航数据如图 4 所示。

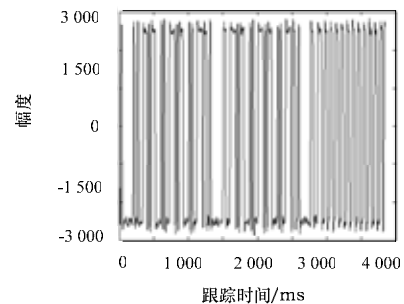


图 4 导航数据

在得到导航数据后，进行导航信息的提取和定位解算等工作。

在仿真过程中，对比上文提到的 9 种鉴相因子，基本与理论相符。考虑实际计算量和效果，采用的码环鉴相因子为归一化的超前减去滞后功率为 $\frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)}$ ；采用的载波跟踪环鉴相因子为 $\arctan(Q_p / I_p)$

在实际的仿真过程中，需要一个预跟踪的过程，将环路滤波器初始带宽设置为一个较大的值(如 150 Hz)，在经过十几毫秒过渡后，再将带宽设置得小一些(如 15 Hz)，其原因是捕获给出的粗略值与实际值相差较大(与在实现跟踪后的波

动相比较), 直接将带宽设置太小会导致跟踪失败。

上述是基于模拟数据的 Matlab 仿真, 仿真结果验证了此算法的正确性。

2.2 基于真实 GPS 信号跟踪环路 C 的实现

将已验证的跟踪算法用 C 实现, 并用真实的 GPS 信号代替模拟的 GPS 信号进行跟踪, 从而检验该算法对于真实信号跟踪的效果, 并与模拟信号的跟踪进行对比。用于该仿真输入的 GPS 数字中频信号由北京东方联星科技有限公司生产的 NewStar210A 数字回放式 GPS 中频信号采样器采集大气传播的真实 GPS 信号获得, 其表达式与模拟信号相同。真实 GPS 信号的采样频率 f_s 为 16.367 667 MHz, 中频载波中心频率 f_i 为 4.123 968 MHz。因为 1 ms 的采样点数约为 163 68 个点, 每个码片为 16 个采样点, 每次调整 4 个采样点, 所以码跟踪的精度可达到 1/4 个码片。

由捕获部分得到的初始多普勒频移为 -2 200 Hz, 初始 C/A 码相位为第 9 704 个采样点。在运行完跟踪程序后将载波频率偏移量和 C/A 码相位的数据保存成数据文件, 再用 Matlab 读取该文件画图得到, 载波频率跟踪如图 5 所示、C/A 码相位跟踪如图 6 所示。

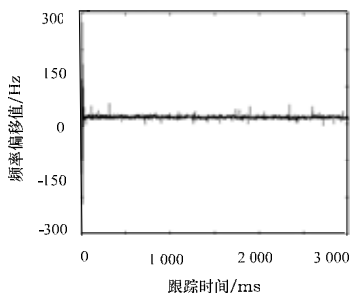


图 5 载波频率跟踪

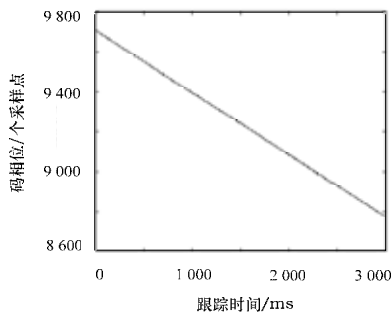


图 6 C/A 码相位跟踪

对比模拟数据和真实数据的跟踪结果, 载波频率跟踪的输出结果相似。由图 5 可知, 经过很短的时间, 载波频率被跟踪到, 与捕获给出的粗略载波频率的偏移值约为 15 Hz。但 C/A 码跟踪的结果有所不同, 因为真实信号的采样频率 f_s 为 16.367 667 MHz, 所以每毫秒取 16 368 个采样点有 0.333 个点的误差, 此误差和 C/A 码的多普勒频移会导致在 C/A 码跟踪时, 码偏随着时间的变化而变化。例如在第 1 000 ms 时, 考虑

采样点误差造成的码偏为 $0.333 \times 1\ 000 = 333$ 个采样点, 再考虑 C/A 码的多普勒频移, 因为在载波频率多普勒频移为 4.9 kHz 时, C/A 码的多普勒频移为 3.2 Hz^[3], 所以此处 C/A 码的多普勒频移为 1.44 Hz, 而每个码片的采样点数为 16 个, 其原因是 C/A 码的多普勒频移导致的码偏为 $16 \times 1.44 = 23$ 个采样点。简单的说, 采样点误差造成多取 333 个采样点, C/A 码多普勒频移造成丢失 23 个采样点。根据以上分析, 精确的 C/A 码初始相位为 $9\ 704 - 333 + 23 = 9\ 394$ 个采样点, 该值与跟踪实验图 6 中得出的 9 396 个采样点, 仅有 2 个采样点的误差。通过本实验说明该算法对于跟踪真实 GPS 信号是有效的, 同时经过对比分析, 找出了当真实信号跟踪时, C/A 码初始相位随时间变化而变化的原因。

2.3 实验平台

用于运行真实数据的跟踪环路 C 实现的实验平台是由方舟科技公司提供的 GT3000A 开发平台。它基于 ARCA3 嵌入式微处理器, 是由方舟科技公司开发的一款具有自主知识产权的通用终端系列嵌入式 SoC 产品。GT3000A 开发平台集成了主频为 450 MHz 的 ARCA3 CPU 核和 128 MB DRAM, 它具有低成本、高性能、低功耗的特点。该开发平台的 CPU 核 ARCA3 是一款 RISC 体系结构的嵌入式微处理器, 具有 RISC 体系结构的典型特征, 同时又是一套具有自主知识产权的全新、高性能、低功耗的指令体系结构, 采用 8 级流水线。此外, 方舟科技公司移植增强了 GNU 编译开发环境, 使其对方舟 CPU 体系结构提供全面的支持, 包括编译工具、调试工具、运行库、实用工具等。

为了使上述的算法在 GT3000A 平台上运行, 将跟踪部分的 C 代码用方舟科技公司提供的交叉编译工具进行交叉编译, 得到可执行程序, 然后在 GT3000A 平台上运行, 成功实现跟踪功能。

3 结束语

本文对 GPS 软件接收机跟踪部分的原理和算法进行研究。仿真过程中, 对比 9 种鉴相因子的功能, 选择较适合软件接收机的鉴相因子。比较模拟信号与真实信号在 C/A 码跟踪过程中的差别, 给出真实信号在跟踪过程中 C/A 码初始相位随时间变化而变化的原因和计算方法。下一步将对基于 ARCA3 嵌入式微处理器指令集的实时软件接收机算法进行研究。

参考文献

- [1] Ledvina B M, Powell S P, Kintner P M, et al. 12-Channel Real-Time GPS L1 Software Receiver[C]//Proc. of the Institute of Navigation National Technical Meeting. Anaheim, CA, USA: Institute of Navigation, 2003.
- [2] Rinder P, Bertelsen N. Design of A Single Frequency GPS Software Receiver[D]. Denmark: Alborg University, 2004.
- [3] Tsui J B Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers[M]. New York: Wiley J & Sons, Inc. Publication. 2005.

编辑 陆燕菲