

文章编号: 0255-8297(2009)02-0203-07

GPS软件接收机并行处理的实现

苗剑峰¹, 孙永荣¹, 陈武², 刘建业¹, 胡丛伟³

1. 南京航空航天大学 导航研究中心, 南京 210016

2. 香港理工大学 大地测量与资讯学系, 香港

3. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200129

摘要: 针对传统GPS软件接收机实时性差的问题, 深入研究了基于双核处理器的并行信号搜索、跟踪以及伪距定位等关键技术, 提出GPS软件接收机并行处理方法。在搜索过程中, 采取并行处理技术并实时优化搜索范围, 利用相位关系进行解算, 有效克服了相关法求解精度速度慢的缺点。在跟踪环路中, 研究载波/码相位跟踪环路并行独立处理技术, 通过深入分析二阶跟踪环路性能, 优化设计参数, 使接收机具备较好的动态性能的同时, 能够将噪声的影响降到最低。最后在Matlab环境下设计了算法应用程序, 将实测数据对算法进行验证。结果表明: 与传统的串行处理算法相比, 该方法可使信号处理效率提高30%以上, 各项输出指标均达到单点伪距定位要求。

关键词: 全球卫星定位系统; 软件接收机; CA码相关; 载波跟踪环

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A

Parallel Signal Processing for GPS Software Receiver

MIAO Jian-feng¹, SUN Yong-rong¹, CHEN Wu², LIU Jian-ye¹, HU Cong-wei³

1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Department of Land Surveying and Geo-informatics, Hongkong Polytechnic University, Hongkong, China

3. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200129, China

Abstract: In view of the inability of real time processing in conventional GPS software receivers, a GPS signal parallel processing algorithm is proposed based on dual core processors. Algorithmic modules in GPS software receivers including signal acquisition, tracking loop and pseudo-range position are analyzed. A parallel processing acquisition algorithm which includes a parallel processing and real-time optimization is studied. In the tracking loop, a separate carrier and CA code phase tracking loop are designed. An optimized bandwidth algorithm is described based on a mathematical analysis, which leads to better dynamic performance and less noise vulnerability of the receiver. The GPS software receiver is validated in computer simulation. Comparison with real testing data shows that the proposed method can improve processing ability at least by 30%, satisfying the requirements of the single point pseudo-range positioning approach.

Keywords: global positioning system, software receiver, CA code correlation, carrier tracking loop

全球定位系统(global positioning system, GPS)能在全球范围内向用户提供全天候、实时的三维定位, 因此被广泛应用。基于软件无线电技术的GPS软件接

收机(software-defined GPS receiver)是由Dennis Akos^[1]在1997首次提出的。GPS软件接收机的实质是创建一类低成本, 并且可以灵活应用、具有开放式结构的接收机。

收稿日期: 2008-04-08; 修订日期: 2008-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(No.40671155); 国家“863”高技术研究发展计划基金(No.2006AA12A108); 香港理工大学研究项目基金(No.G-U203); 香港理工大学联合培养博士生研究基金(No.G-U472)资助项目

作者简介: 苗剑峰, 博士生, 研究方向: GPS软件接收机, E-mail: dbqr@163.com; 陈武, 博士, 教授, 博导, 研究方向: GPS导航与智能交通, E-mail: lswuchen@polyu.edu.hk; 刘建业, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 惯性技术、卫星定位、组合导航系统, E-mail: ljyac@nuaa.edu.cn

其较高的灵活性和可编程性为研究人员提供了丰富的评估和验证平台,已成为近年来的研究热点. GPS软件接

收机的常规结构由射频前端硬件设备和PC中的GPS信号处理程序两部分组成,如图1所示.

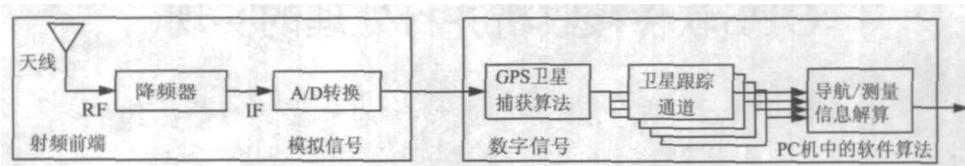


图1 传统GPS接收机系统结构图

Figure 1 Block diagram of traditional GPS software receiver

软件接收机传统的解算方法是: GPS天线首先接收GPS L1频段的射频信号,利用降频模块将其从1575.42 MHz降到数100 MHz以内的基带范围内,以便数字处理器进行解算.然后,PC机通过USB端口将AD转换后的基带数字信号进行采集、存储.最后,通过在PC端运行相应的解算程序,对已存储的GPS采样信号进行捕获、跟踪,实现对伪距和导航星历的解算输出,确定接收机的位置信息.

对GPS中频数字信号进行捕获和跟踪,其实质是对一系列庞大的数组进行FFT变换以及数字卷积和相关运算.这一系列运算给单一CPU处理器造成了极大的运行负担,以致于不得不降低采样频率来克服处理速度慢的缺点.因此,传统的设计方法对GPS软件接收机定位算法的运行速度、数据处理精度以及实时性方面存在一定的缺陷.

1 基于双核处理器的并行GPS软件接收机程序设计

本文针对传统GPS软件接收机存在的问题,提出一种基于双核处理器的GPS信号并行处理接收机.“双核”最早是由IBM, HP, Sun等支持RISC架构的高端服务器厂商提出的,即在一块处理器内具备2个物理上的运算内核.它们使用相同的系统请求接口,可以实现对任务的并行处理.本文以双运算核处理器为运行平台,设计并实现GPS信号的并行捕获、跟踪环路算法,大大减少了解算时间,提高了系统的工作效率.该系统实用性强、成本低,并能有效地提高系统的解算速度,充分发挥系统资源的优势.

基于双核处理器的GPS软件接收机由多个信号处理通道组成,结构设计如图2所示,相关算法已经申请国家发明专利^[2].

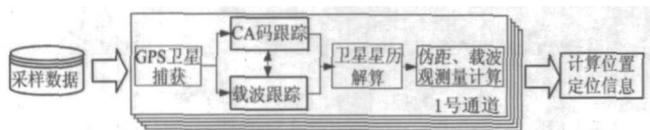


图2 GPS软件接收机设计流程

Figure 2 GPS software receiver's design block diagram

2 基于双核处理器GPS信号的并行捕获算法

GPS信号捕获算法的目的是获取接收信号中的有效可见星信号,并确定其载波多普勒频率和CA码初始相位的估计值,为后续的信号跟踪环路提供初始化条件.综合考虑相关算法的结构和实时性,本文采用并行码相位搜索捕获算法.

并行码相位搜索算法以离散傅里叶变换(DFT)技术为基础,将时域的串行操作转换为频域的并行计算,其原理如下:

在时域范围内,对于离散数字信号 $x(n)$, $y(n)$ 的相关运算可以写成

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

对 $z(n)$ 进行离散傅里叶变换(DFT)转换到频域后

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

式中, $X^*(k)$ 为 $X(k)$ 的共轭复数.由式(2)可以看出,对于计算量较大的信号,其相关运算可以在频域内通过简单的乘法实现.将式(2)的结果进行傅里叶反变换,可以高效率地搜索到接收信号与本地复现信号的相关峰值,从而得到CA码的初始相位以及多普勒频移的粗略估值^[3-5].

基于双核CPU的高效并行计算特点,本文设计了GPS软件接收机并行搜索捕获算法,其原理框图如图3所示.为了覆盖卫星与接收机信号传输的所有预期多普勒频率范围,一般设置搜索范围在 ± 10 kHz之内,搜索步长为500 Hz,CA码相位在1~1023码片之间变化.假设对GPS信号的搜索范围为1~32号卫星,其程序流程图如图4所示.在程序冷启动时,首先初始化分配搜索范围,即先将本地CA码发生器的搜索范围平均分为组合A和B,并将其分配到2个内核进行并行处理.于是,每个

单CPU的搜索计算量由32颗/核降为16颗/核. 然后, 双核独立地并行运算搜索算法, 依次遍历组合A和B的搜索范围. 为了进一步优化搜索顺序, 设置了星历相关优化模块. 当双核并行搜索算法成功搜索的卫星数大于等于4颗后, 将捕获卫星的编码与本地存储器中的GPS系统时间作为优化核块的2个参数输入到星历相关模块, 实时优化更新卫星搜索组合A和B, 优化搜索组合和顺序, 减少遍历次数. 这样每个单核的搜索组合A和B被反馈数据实时动态更新, 优化整个搜索过程. 如图3所示, 每次搜索结束后, 相关峰值被输入到门限比较器中进行实时比较. 如果其值大于门限, 则捕获成功^[6].

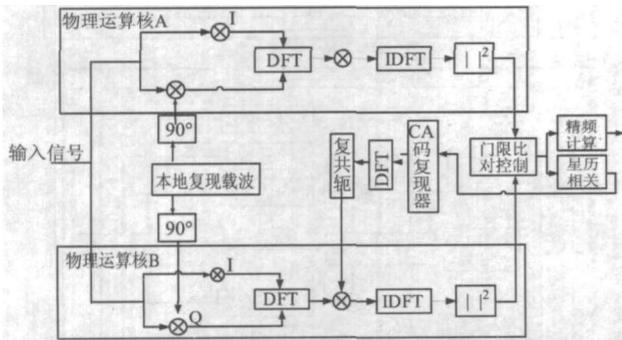


图 3 基于双核处理器的并行码相位搜索捕获算法原理图

Figure 3 Methodology of dual core processors-based parallel code phase acquisition

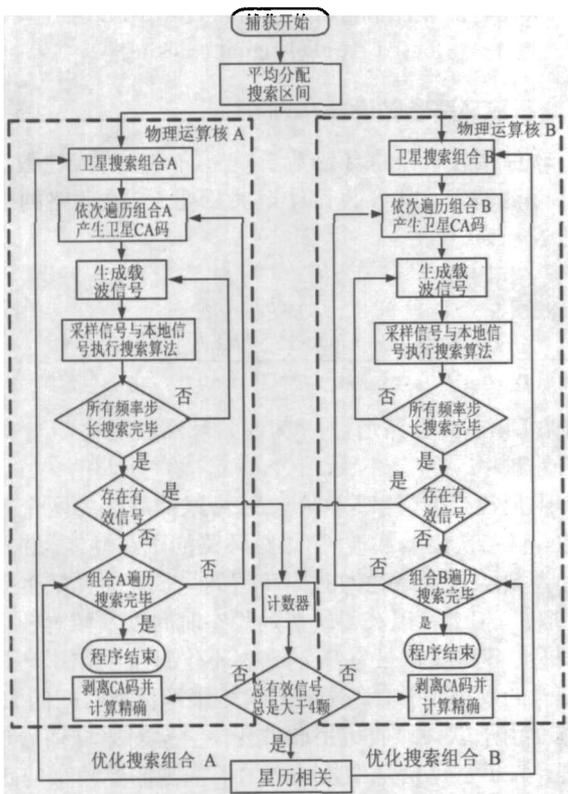


图 4 基于双核处理器的并行码相位搜索捕获算法流程图

Figure 4 Processing steps of dual core processors-based parallel code phase acquisition algorithm

传统的GPS软件接收机用DFT方法求取精频. 为了取得10Hz级的分辨率, 需要对100ms的信号进行搜索, 耗时极其严重.

本文进一步提出最优的精细频率分辨率(fine frequency resolution)解决方法, 即通过相位关系进行解算. 输入信号在剥离了CA码后就转换为连续的波形. 如果在 m 时刻, 1ms输入信号中最高频率分量是 $X_m(k)$ (k 表示输入信号的频率分量), 则可由DFT变换得到初始相位 $\theta_m(k)$ 为

$$\theta_m(k) = \arctan \left(\frac{\text{Im}(X_m(k))}{\text{Re}(X_m(k))} \right) \quad (3)$$

式中, Im 和 Re 分别表示 $X_m(k)$ 的实部和虚部. 假定在距 m 时刻很短时间之后的 n 时刻, 1ms输入信号的DFT分量也是其最高频率分量, 则 n 时刻输入信号的初始相位为 $\theta_n(k)$ 为

$$\theta_n(k) = \arctan \left(\frac{\text{Im}(X_n(k))}{\text{Re}(X_n(k))} \right) \quad (4)$$

$\theta_m(k)$ 和 $\theta_n(k)$ 可以用式(5)来计算精频

$$f = \frac{\theta_n(k) - \theta_m(k)}{2\pi(n - m)} \quad (5)$$

3 基于双核处理器GPS信号的跟踪环路

由于卫星的连续运动以及相关噪声的影响, 多普勒频移和码相位时时发生变化. 跟踪环路的目的是让本地复现信号与接收信号精确同步, 从而得到星历中的导航数据以及伪距等观测量信息. 跟踪环路由载波频率跟踪和码跟踪两部分组成.

3.1 载波跟踪环路原理

载波跟踪采用了典型的科斯塔锁相环(Costas phase lock loop, PLL). 输入信号剥离CA码之后与本地产生的载波信号相乘, 生成同相I和正交Q信号. 环路鉴相器用来检测本地产生的载波信号和接收到的信号之间的相位误差. 经过环路滤波后相位误差作为环路反馈输出到NCO载波发生器, 后者根据误差大小实时调节产生载波的频率, 使本地复现载波与接收信号时刻保持同步^[1,7].

剥离了伪随机码之后, 信号中仍然保留着50Hz二进制调制的导航电文数据. 当导航电文发生反转时, I和Q信号会产生相位反转. 和普通的锁相环以及锁频环相比, 科斯塔环具备对存在相移进行相位跟踪的特性. 为了提高软件接收机对噪声的抗干扰性, 充分发挥其运算优势, 载波环路使用了在高、低信噪比下均具备最佳效果的正切鉴相器(最大似然估计器). 其算法表示为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{I^k}{Q^k} \right) \quad (6)$$

当科斯塔跟踪环在锁定跟踪的情况下，本地的复现载波基本与输入信号相位一致，鉴相器输出的相位误差 φ 非常小。同相 I 通道信号能量达到最大，正交 Q 信号趋近最小。而且反正切鉴相器对 180° 相移不敏感，当输入信号发生导航电文相移时仍然能够对输入载波进行有效跟踪。

3.2 CA码跟踪环路原理

码跟踪环路采用超前滞后码跟踪算法，输入信号剥离载波后，将含有CA码的基带信号分别与本地CA码超前 E、实时 P、滞后 L 分量相乘并进行积分累加。经码鉴相器处理后输出码相位误差，相位误差则通过控制本地CA码发生器构成码跟踪环的反馈回路，实现对码相位的实时跟踪。

由于在跟踪的初始阶段，本地产生的载波信号与接收信号之间存在着频率和相位误差，因此信号功率并非完全集中在同向通道，而是随着载波跟踪的漂移在同向和正交通道之间转换。如果只是对同向通道进行码相关积分累加，则会影响跟踪的稳定性。所以在设计跟踪环路的时候，CA码发生器产生相位差为 $1/2$ 码片的超前 E、实时 P、滞后 L 分量，同时对同向和正交通道进行积分累加，然后将同向和正交通道的 6 个运算结果输入到鉴相器。码跟踪鉴相器选择传统的超前滞后包络所归一化算法，其原理见式(7)

$$D = \frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)} \quad (7)$$

从式(6)可以看出，选择该鉴相器可使码跟踪环路不受载波跟踪环路的影响而单独运行，实现对CA码相位的实时跟踪^[5,8]。

3.3 载波/CA码并行跟踪环路设计

在GPS信号跟踪处理中，对载波相位进行跟踪的前提是输入信号进行CA码剥离，而对码相位进行跟踪同样需要对载波进行精确剥离。载波跟踪环路和码跟踪环路是相辅相成、相互制约的。在传统的软件接收机跟踪算法中，若将载波/码跟踪串行处理，大量的卷积相关运算会严重影响程序的实时性处理。为简化算法结构，提高对GPS信号处理的计算效率，本文对载波和码相位跟踪环路进行了并行优化设计，优化的跟踪环路结构如图5所示。从图5中可以看出，载波相位跟踪环路由双核处理器的核A运算处理，CA码跟踪环路则由核B运算处理，两者并行运算。通过在两跟踪环路间设置共享开关量，解决两环路间同步的问题。当CA码跟踪环路的实时码信号 P 经计算输出后，该共享开关量为有效，实时码信号 P 被用作剔除载波跟踪环路中的CA码。同理，当载波跟踪环路产生的载波信号计算输出后，相应的共享开

量为有效，载波信号用来辅助剔除CA码跟踪环路中的载波分量。按如图5设计，两个跟踪环路的CA码输出信号 I_P, Q_P 和载波信号，通过共享开关量相互访问，实现分体并行设计，优化了程序结构，有效地提高了信号的处理速度。

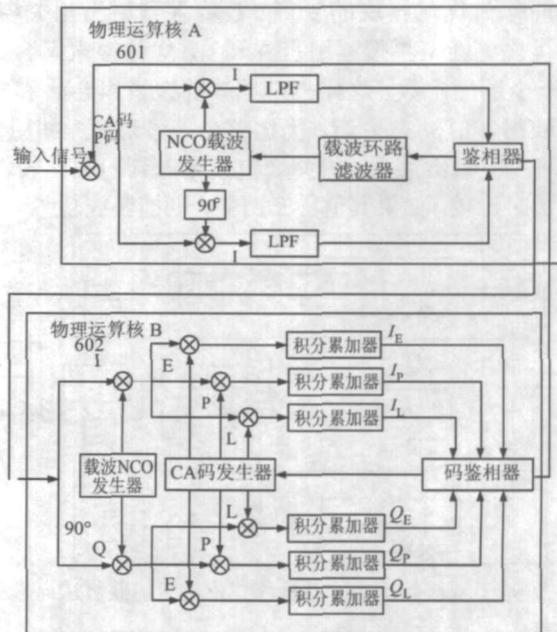


图5 基于双核处理器的GPS信号跟踪环路算法原理图

Figure 5 Methodology of dual core processors-based parallel signal tracking

3.4 跟踪环路参数设计

软件接收机跟踪环路数学模型的实质为线性数字二阶环路滤波器，其参数设计至关重要。二阶环路的传递函数表示为^[1,9-10]

$$H(z) = \frac{K_0 K_d (C_1 + C_2) z^{-1} - K_0 K_d C_1 z^{-2}}{1 + (K_0 K_d (C_1 + C_2) - 2) z^{-1} + (1 - K_0 K_d C_1) z^{-2}} \quad (8)$$

式中， $K_0 K_d$ 为环路增益， ζ 为二阶环路阻尼比， ω_n 为环路自然频率。

阻尼比 ζ 和环路噪声带宽 B_L 为跟踪环路的两个重要参数，直接决定着载波/码跟踪环路的跟踪性能。选择阻尼比需要综合考虑稳态时间和超调量，通过大量实验证明，取 $\zeta = 0.7$ 可以获得较快的稳态时间以及相对较小的超调量。环路噪声带宽 B_L 的选择不仅直接决定了环路处理信号的噪声误差，还影响到信号跟踪稳态时间的大小。一方面由于软件接收机用软件程序直接对采样信号进行处理，为了避免信号中热噪声的干扰则需要较窄的跟踪带宽。另一方面为了缩短信号跟踪的稳态时间，提高接收机的动态性能则需要较宽的噪声带宽，在设计时需要在这两方面进行综合考虑。跟踪环路需要在最大限度适

应动态性能的情况下, 尽量减小环路内的热噪声影响^[10].

首先来分析载波跟踪环路的带宽设计. GPS软件接收机锁相环路的误差源 σ_{PLL} 主要由热噪声误差以及动态应力误差 θ_e 两部分组成, 对于二阶环路其可表示为^[1]

$$\sigma_{PLL} = \sigma_{tPLL} + \theta_e = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0}\right) + \frac{dR^2}{dt^2} \cdot \frac{(4\zeta^2 + 1)^2}{64\zeta^2 B_L^2}} \quad (9)$$

式中, T 为采样时间, B_L 为环路的噪声带宽. 从式(9)可以看出, 载波跟踪环路误差 σ_{PLL} 是以环路噪声带宽 B_L 为参数的函数, 对其求导 $\partial\sigma/\partial B_L = 0$ 之后, 可以求出载波跟踪环最优环路带宽为

$$B_{op,PLL} = \sqrt[5]{a^2 / \frac{\lambda_L^2}{\pi C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0}\right)} \quad (10)$$

$$a = \frac{dR^2}{dt^2} \cdot \frac{(4\zeta^2 + 1)^2}{8\zeta^2}$$

用同样的方法可以对基于二阶滤波反馈环路模型的CA码跟踪环路最优噪声带宽进行推导, 二阶码相位跟踪环路的误差 σ_{DLL} 表示为^[1,10]

$$\sigma_{DLL} = \lambda_e \sqrt{\frac{4F_1 d^2 B_L}{C/N_0} \left[2(1-d) + \frac{4F_2 d}{TC/N_0}\right] + \frac{dR^2}{dt^2} \cdot \frac{(4\zeta^2 + 1)^2}{64\zeta^2 B_L^2}} \quad (11)$$

式中, F_1 为DLL鉴别器相关因子, d 为本地复现CA码超前、即时和滞后码之间的码片间隔, F_2 表示DLL鉴别器类别因子. 对于基于二阶滤波反馈环路, 选择标准的超前、滞后环路鉴相器, 对其求导 $\partial\sigma/\partial B_L = 0$ 后, 得到基于二阶滤波反馈环路模型的码相位跟踪环最优环路带宽为

$$B_{op,PLL} = \sqrt[5]{a^2 / \frac{\lambda_L^2}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{TC/N_0}\right)} \quad (12)$$

3.5 跟踪环路实验验证

在对跟踪环路算法的验证中, 数据来源于SiGe微型射频前端GPS数据采样器. 其数字中频为 4.1304 MHz, 采样频率 16.3676 MHz, 信号载噪比约为 45 dB-Hz. 滤波环路参数设计为: 阻尼比 0.707, 载波环路带宽为 25 Hz, 码环路跟踪带宽为 2 Hz, 超前滞后码片为 0.5 码片, 预检测积分时间为 1 ms.

以通道 1 捕获的 3 号卫星为例, 核 A 运行的载波跟

踪环路结果如图 6 所示. 图(a)为载波相位鉴相器输出与时间的关系图, 图(b)为跟踪状态下多普勒频移效果图. 可以看出, 在稳态时载波跟踪鉴相器的波动范围可以有效控制在 $\pm 0.03 \times 2\pi = \pm 0.06\pi$ 之间. 对多普勒频率的跟踪波动范围在 30~40 Hz 之间. 图 7 是核 B 运行的码跟踪环路效果图, 图(a)为码鉴相器输出图, 图(b)为码片误差效果图. 从图 7 中可以看出, 在锁定跟踪状态下CA码频率波动在 2.5 Hz 范围内. 图 8 为整个跟踪环路对GPS信号的跟踪效果图, 图(a)中的横轴为同相实时信号 I prompt, 纵轴为正交实时信号 Q prompt. 从图 8 中可以看出, 当信号实现锁定跟踪后, 信号能量集中于 I prompt 通道, 其输出是正负变化的导航电文, 而 Q prompt 则只剩下能量接近于 0 的噪声信号, 图(c)为最终解调出的导航电文. 图 8 中的(b)显示了码跟踪环路鉴相式(8)的各项指标输出. 从图 8 中可以清晰地看出, 当信号锁定跟踪后, 实时通道 P 的功率能量为超前和滞后通道的 2 倍, 与理论推导值相符. 由此可知, 通过最优设计跟踪环路的参数, 有效地提高了跟踪环路的精度和稳定性, 实现了对载波、CA码的精确跟踪.

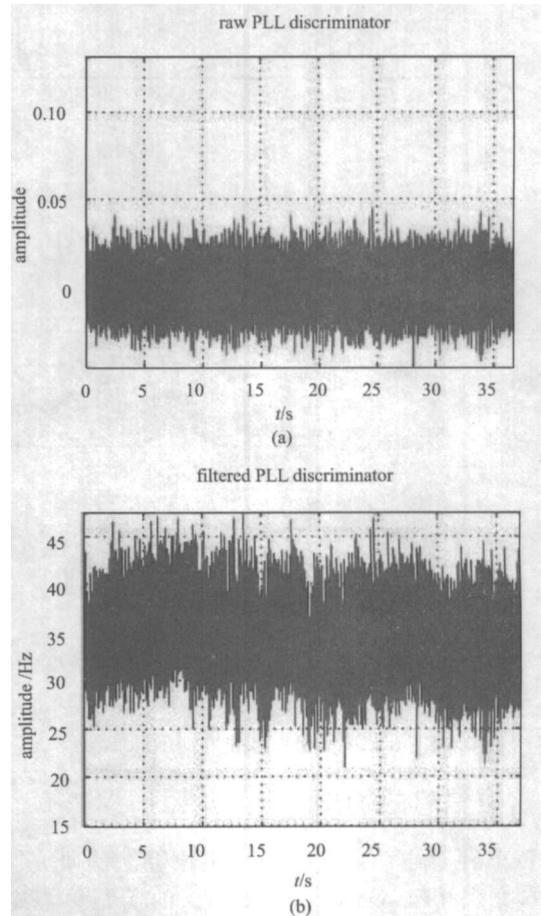


图 6 并行处理GPS软件接收机载波跟踪环路效果图

Figure 6 Outputs of parallel carrier tracking loop processing

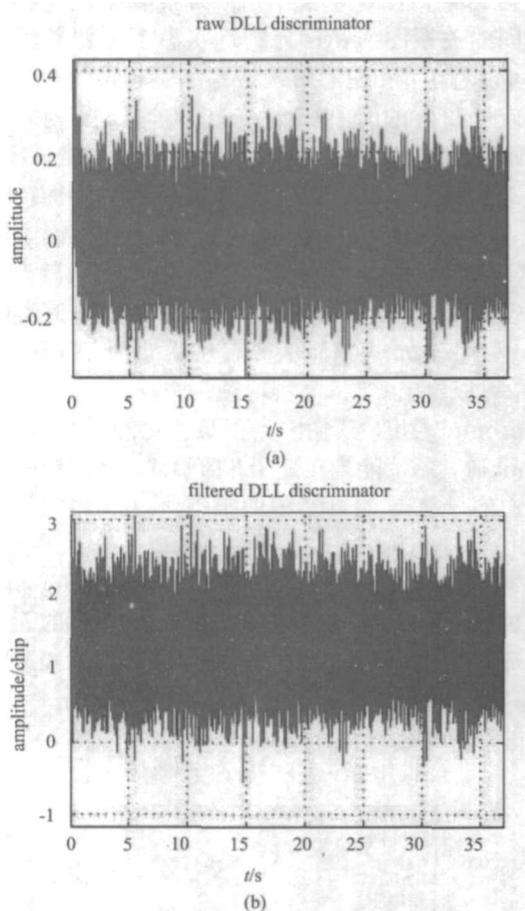


图7 并行处理GPS软件接收机CA码跟踪环路效果图

Figure 7 Outputs of parallel CA code tracking loop processing

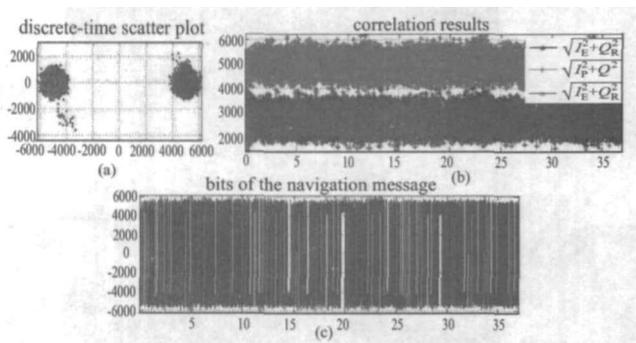


图8 GPS软件接收机并行跟踪算法跟踪效果图

Figure 8 Results of the GPS software receiver's parallel tracking loop processing

4 定位信息的输出

目前针对由伪距进行单点定位算法的研究比较成熟. 本文采用OpenSourceGPS提供的伪距单点定位算法^[11-14], 实现对导航定位信息的解算并验证GPS软件接收机的整个系统效果.

算法的验证采取静态实验的方式, 天线位于香港理

工大学教学楼FG天台, 数字中频4.1304 MHz, 采样频率16.3676 MHz, 信号信噪比约为45 dB-Hz. 采集时间为40s, 存盘数据文件大小为600 M. 应用基于Matlab环境下的解算程序处理数据.

信号的跟踪环路首先根据信号捕获结果进行初始化并计算相应的环路参数, 然后在多普勒频率以及码相位范围内对信号进行实时跟踪, 解算出导航电文与伪距. 程序以500 ms为周期提取伪距信息, 并通过单点定位算法计算定位结果. GPS软件接收机的解算结果在UTM坐标系中, 东向和北向的值可以有效地控制在 ± 10 m左右, 达到伪距单点定位的性能要求. 最后对40s内的80个定位数据作综合处理, 给出最佳经纬度信息: Lat: $22^{\circ}18'10.4769''$, Lng: $114^{\circ}10'46.128''$, 高度: 159.3 m. 将程序的运行时间进行比较, 参与测试的采样数据时间长度为40s, 文件大小600 M, 解算中用到的PC配置为CPU: Core duo 2.4 G, RAM: 2 G, 仿真环境为Matlab 7.1 R14版本. 采集参数不变, 在单通道处理条件下对传统算法与并行处理算法的时间进行比较, 结果如表1所示.

表1 程序运行时间统计

Table 1 Comparison of the processing time				s
项目	捕获时间	跟踪时间	导航信息输出	合计
传统算法	2.6	497	0.01	499.61
并行算法	1.7	265	0.01	266.71

5 结语

本文阐述了基于双核处理器GPS软件接收机的实现过程, 并对其中关键技术进行了深入讨论. 针对传统算法的缺陷, 提出一种GPS信号的并行处理算法, 通过码相位关系解算搜索环路的精频, 设计实现了独立并行运算的载波/码相位跟踪环路, 给出了跟踪环路带宽优化算法, 通过实测数据验证: 单点定位精度达到 ± 10 m, 满足设计要求. 从程序运行的时间统计结果可以看出, 并行处理算法有效地改善了GPS软件接收机的实时性. 伴随着Matlab对支持双核运算的仿真环境的推出以及科研的进步, 新型高效算法在不断涌现, 实时性问题也将逐步得到解决.

参考文献:

- [1] ELLIOTT K. Understanding GPS: principles and applications[M]. Norwood: Artech House, 1996: 75-131.
- [2] 苗剑峰, 孙永荣, 陈武, 刘建业. 一种GPS定位方法及基于双核处理器的GPS软件接收机: 中国, 200810024488.6[P]. 2008-03-24.
MIAO Jianfeng, SUN Yongrong, CHEN Wu, LIU Jianye.

- A method of GPS position and a GPS software receiver based on the dual core processors: China, 200810024488.6 [P]. 2008-03-24. (in Chinese)
- [3] 唐斌, 董绪荣, 刘舒蔚, 唐卫涛. 动态环境下GPS软件接收机研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1807-1810.
TANG Bin, DONG Xurong, LIU Shushi, TANG Weitao. Research of software GPS receiver in dynamic environments[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1807-1810. (in Chinese)
- [4] CARPENTER F, SRIKANTESWARA S, BROWN A. Software defined radio test bed for integrated communications and navigation applications[C]//Proceedings of 2004 Software Defined Radio Technical Conference. Phoenix: Arizona, 2004: 1575-1586.
- [5] GEREIN N, BROWN A. Modular GPS software radio architecture[C]//Proceedings of ION GPS 2001. Salt Lake City: [s.n.], 2001: 2048-2058.
- [6] BORRE K, AKOS D M, BERTELSEN N, RINDER P, JENSEN S H. A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach[M]. Boston: Birkhäuser, c2007.
- [7] BORRE K. A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach [M]. Boston: Birkhäuser, c2007: 87-134.
- [8] HU Congwei, XU Li. Acquisition and tracking schemes for GPS software receive [C]// Proceedings of International Society for Optical Engineering, Nanjing, 2007: 622-626.
- [9] GOLD K, BROWN A. A software GPS receiver application for embedding in software definable radios[C]// Proceedings of ION GPS/GNSS 2003. Portland: [s.n.], 2003: 2524-2531.
- [10] BERTELSEN N, BORRE K, RINDER P. The GPS code software receiver at Aalborg university [C]// 2nd European Space Agency Workshop on Satellite Navigation, Navitech, 2004: 373-380.
- [11] 唐康华, 吴美平, 胡小平. 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.
TANG Kanghua, WU Meiping, HU Xiaoping. Design and validation of GPS software receiver based on RF front-end [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 51-54. (in Chinese)
- [12] JOHN S, TSUI J. Real-time software GPS receiver [C]//ION GPS 2002: 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland: [s.n.], 2002: 2561-2565.
- [13] OpenSource GPS Documentation [R/OL]. (2005-10-12) [2007-11-05]. <http://www.home.earthlink.net/cwkelley/>.
- [14] BROWN A, MARVIN MAY M, TANJU B. Benefits of software GPS receivers for enhanced signal processing[J]. GPS Solutions, 2000, 4(1): 56-66.

(编辑: 秦 巍)