

引用格式:季凯源,张博雅,蒋长辉.利用支持向量机的卫星导航载波跟踪算法[J].电光与控制,2019,26(9):42-44,83. JI K Y, ZHANG B Y, JIANG C H. A GNSS carrier tracking algorithm utilizing support vector machine[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):42-44, 83.

利用支持向量机的卫星导航载波跟踪算法

季凯源¹, 张博雅², 蒋长辉²

(1. 中国船舶重工集团公司第七二三研究所,江苏 扬州 225101; 2. 南京理工大学,南京 210094)

摘要:常用的卫星导航接收机载波跟踪环路在高动态环境下易失锁,导致接收机无法提供精确的导航信息。针对此问题,提出一种利用支持向量机的锁频环辅助锁相环的新的载波跟踪算法。首先,引入一种判决因子描述环路当前的运行情况,然后,根据输入的判决因子的大小实时调节载波跟踪环路中锁相环和锁频环对环路更新参数计算的贡献大小,利用支持向量机算法建立起判决因子和环路融合权值之间的非线性关系。仿真结果表明,该方法能极大地减小锁相环在高动态环境下的鉴相误差,一定程度上提高载波跟踪环路在高动态环境下的跟踪性能。

关键词:卫星导航;载波跟踪环路;支持向量机;判决因子;高动态

中图分类号:O213.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.010

A GNSS Carrier Tracking Algorithm Utilizing Support Vector Machine

JI Kai-yuan¹, ZHANG Bo-ya², JIANG Chang-hui²

(1. The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225101, China; 2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the conventional GNSS receiver, the carrier tracking loop is prone to lose lock in high dynamic environment. Under this condition, the receiver cannot work properly and provide accurate navigation information. To improve the performance of the carrier tracking loop under high dynamic circumstance, this paper proposes a new carrier tracking algorithm combining Phase-Lock-Loop (PLL) with Frequency-Lock-Loop (FLL) based on the support vector machine. A judge factor is introduced to define the state of the carrier tracking loop. The weights of the PLL and FLL are adjusted in real time according to the value of the judge factor. The support vector machine algorithm is employed to establish the nonlinear function of the judge factor and fusion weights of the loops. The simulation results show that this method can greatly improve the performance of the tracking loop in high dynamic environment.

Key words: GNSS; carrier tracking loop; support vector machine; judge factor; high dynamic

0 引言

1991年美国的全球定位系统(GPS)在海湾战争中表现优异,展示其在军事应用方面的巨大潜在价值^[1],从此卫星导航在军事和民用领域得到了广泛应用^[2]。然而在高动态、弱信号、强干扰的环境下,普通的卫星导航接收机无法提供稳定、连续的高精度位置、速度信息^[3],严重制约卫星导航系统更加广泛的应用。为更深度挖掘卫星导航的巨大价值,有必要进一步提高卫星导航接收机的性能,尤其是卫星导航载波跟踪性能。

在一般的卫星导航接收机跟踪环路中,跟踪环路由载波跟踪环路和码跟踪环路组成^[4]。载波跟踪环路一般采用锁相环(Phase Lock Loop, PLL),而基于锁相环的载波跟踪环对高动态环境比较敏感。LIAN设计了一种自适应带宽算法来提高环路高动态性能^[5],同时针对在锁相环带宽较大时热噪声过大的问题引入小波降噪算法,一定程度上提高基于锁相环载波跟踪环路的高动态性能。在高动态环境下,由于载波信号多普勒频移较大,采用锁相环技术的载波跟踪环路容易失锁^[5-6]。国内外学者针对此问题进行了大量研究,在传统的锁相环基础上引入动态性能更好的锁频环(FLL)辅助锁相环。锁相环和锁频环协同工作提高环路的跟踪性能。通常,锁相环与锁频环有两种协同工作方法:第一种,锁频环负责将载波跟踪误差牵引到一

收稿日期:2018-11-14

修回日期:2019-06-19

基金项目:中国博士后科学基金(2015M580434)

作者简介:季凯源(1985—),男,江苏南通人,硕士,工程师,研究方向为自动控制。

定范围内,当跟踪误差小于设定的阈值时,将载波环路跟踪移交给锁相环,由锁相环独立跟踪卫星信号^[7];第二种是利用锁频环辅助锁相环^[8-10],利用锁频环提高环路动态性能,两者一起使用,而不是单独使用锁相环进行跟踪。第一种方法中环路的跟踪在锁相环和锁频环之间来回切换,会造成滤波值不连续和环路不稳定,具体表现为当跟踪误差变大时,载波跟踪交给锁频环,当误差变小时,交给锁相环,如此切换;第二种方法避免了两者之间的切换,是第一种方法的改进,在一定程度上提高了环路的高动态性能,但是通常情况下,环路参数固定,动态适应性不强。

本文提出一种利用判决因子的值调节锁频环和锁相环相对作用的高动态载波跟踪算法,利用支持向量机算法建立起判决因子和调节参数之间的自适应关系,提高接收机载波跟踪性能。本文以GPS为例,在基于Matlab的软件接收机平台上进行仿真实验,实验数据来自卫星信号硬件模拟器,仿真表明,该方法能有效提高环路跟踪性能。

1 载波跟踪环路原理

对于卫星导航接收机而言,跟踪环路是整个接收机的关键部分。首先是捕获模块搜索卫星信号,捕获信号之后给接收机跟踪模块提供粗略的载波频率和码相位,然后跟踪环路对载波频率和码相位进行精确的跟踪,并保持对卫星信号的锁定,最后解调出导航电文,并对位置和速度进行解算。

跟踪环路的基本原理如下:1) 经射频模块处理的信号变成中频信号和本地产生的信号进行相关运算输出超前支路、滞后支路和即时支路信号,然后锁相环鉴别器和锁频环鉴别器根据这些信号鉴别出输入信号和本地信号之间的差异,即时支路用于载波跟踪,滞后和超前支路用于伪码跟踪;2) 将比较结果输入到相应的环路滤波器,控制本地信号发生器生成相应的本地信号。这样形成的一个闭环系统可以稳定地跟踪实际卫星信号。本文工作主要是针对载波跟踪环路,图1是载波跟踪环路结构图。

本地载波发生器产生正弦信号和余弦信号,解扩后的卫星数字中频信号与正弦信号进入混频器进行混频处理,经过积分清除之后得到正交信号 I_p ,解扩后的GPS数字中频信号与余弦信号进入混频器进行混频处理,经过积分清除之后得到正交信号 Q_p 。PLL鉴别器通过计算得到本地载波相位误差鉴别结果,即

$$\Delta\phi = \arctan(Q_p/I_p) \quad (1)$$

式中, $\Delta\phi$ 为鉴别器输出,表示本地信号和实际信号之间的相位误差,取值范围为 $(-\pi, \pi)$ 。

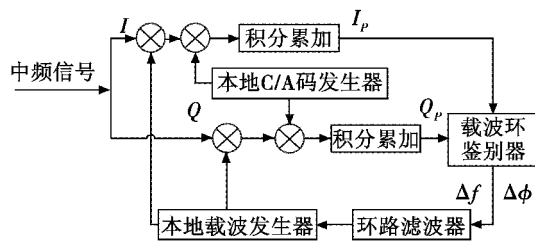


图1 载波跟踪环路结构图

Fig.1 Structure of carrier tracking loop

锁频环和锁相环一起完成载波信号的跟踪,锁频环的鉴频器计算模型为

$$\Delta f = \frac{A \cdot \text{sgn} B}{2\pi(t_2 - t_1)(I_{p_2}^2 + Q_{p_2}^2)} \quad (2)$$

$$A = I_{p_1} \cdot Q_{p_2} - I_{p_2} \cdot Q_{p_1} \quad (3)$$

$$B = I_{p_1} \cdot I_{p_2} + Q_{p_1} \cdot Q_{p_2} \quad (4)$$

式中: I_{p_1} 和 Q_{p_1} 分别为 I 通道和 Q 通道即时支路 t_1 时刻的采样值; I_{p_2} 和 Q_{p_2} 分别为 I 通道和 Q 通道即时支路紧接着 t_1 时刻之后的 t_2 时刻的采样值; t_1 为 $k-1$ 时刻的时间; t_2 为 k 时刻的时间; $\text{sgn} x$ 为符号函数,取值为: $\text{sgn} x = \begin{cases} +1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ 。

2 新的锁频环辅助锁相环载波跟踪环路

锁相环和锁频环自适应融合载波跟踪环路结构如图2所示,其中, λ 为判决因子, α 为支持向量机输出的环路调节参数。

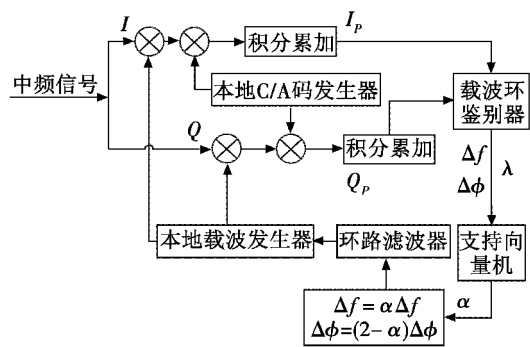


图2 新的锁相环和锁频环结构图

Fig.2 Structure of a new phase locked loop and frequency locked loop

由于锁频环动态性能优于锁相环,锁相环跟踪精度优于锁频环,自适应地改变融合权值的大小,充分利用两个环路自身的优势,通过支持向量机算法建立起判决因子和权值之间的非线性映射,从而提高环路动态适应性,充分发挥环路性能。

2.1 判决因子

基于PLL鉴别器输出建立判决因子,具体计算过程为

$$\lambda = \cos(2\Delta\phi) = \frac{I_p^2 - Q_p^2}{I_p^2 + Q_p^2} \leq 1 \quad (5)$$

2.2 支持向量机

支持向量机^[11]是一种基于统计学习理论的机器学习方法,是由CORTES和VAPNIK于1995年首次提出的,在解决小样本、非线性模式识别中有许多优势,被广泛应用于分类、回归分析、函数拟合。支持向量机的基本思想是通过寻找结构化风险最小来学习和提高泛化能力,本质上可以转化成凸二次优化问题^[11]。

假设数据集

$$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \quad (6)$$

式中: n 为样本数量; x_i 为输入; y_i 为输出。

利用非线性函数将输入数据映射到高维空间并在该空间进行函数拟合

$$f(x) = w \cdot \phi(x) + b \quad (7)$$

式中: w 为权值矢量; b 为偏差; $\phi(x)$ 为非线性映射函数。

根据SVM理论,上述公式可以转化成如下目标函数的优化^[10-11],即

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i + \xi_i^* \quad (8)$$

式中: $\|w\|^2$ 为结构风险; C 为惩罚系数; ξ_i 为松弛变量。

约束条件

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

综合优化目标函数和约束条件可求得分类超平面。支持向量机输入为判决因子的值,输出为环路调整参数。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真平台

仿真平台分为软件部分和硬件部分,软件部分即基于Matlab软件接收机,硬件部分即硬件卫星信号模拟器和中频信号采集器,首先向硬件信号模拟器注入轨迹,然后信号模拟器产生信号,中频信号采集器采集卫星信号模拟器发出的信号供软件接收机使用。具体平台结构如图3所示。其中,中频信号频率为3.996 MHz,中频信号采集器采样频率为16.369 MHz,量化位数为2。

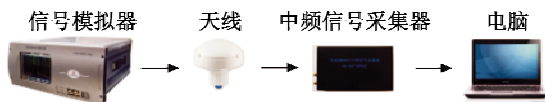


图3 仿真系统平台

Fig.3 Simulation system platform

3.2 仿真平台

轨迹设置:前60s静止,第60~70s为高动态部分,最大加速度60g,最大加加速度为每秒25g,仿真时间共计140s。三维轨迹和动态如图4所示,加加速度和加速度变化分别如图5、图6所示。

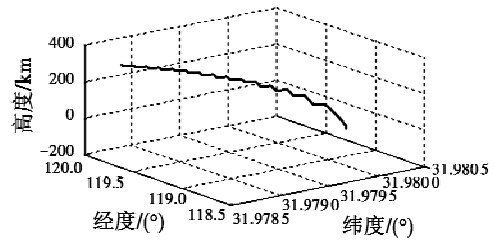


图4 三维轨迹图

Fig.4 3D trajectory diagram

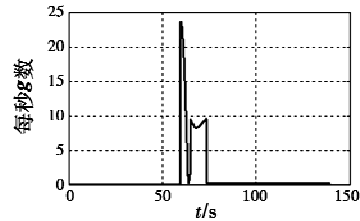


图5 加加速度

Fig.5 Jerk

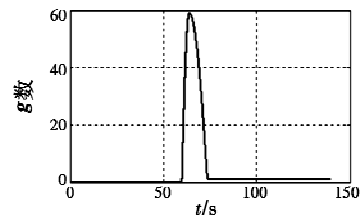


图6 加速度

Fig.6 Acceleration

3.3 仿真结果

图7给出了其中3个不同通道的不同卫星高动态部分(10s)的跟踪结果,分别是通道3/卫星号5,通道5/卫星号8,通道7/卫星号26。

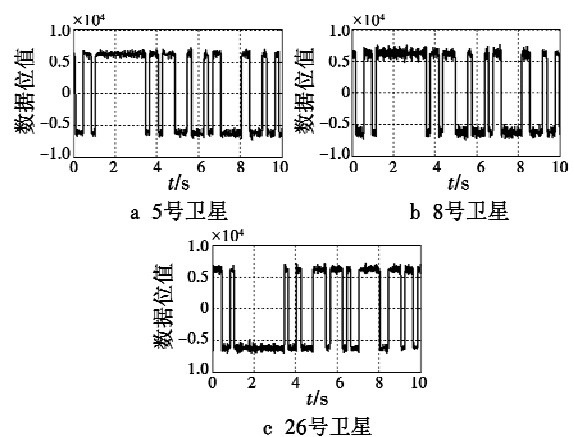


图7 不同卫星的解调数据位值(高动态)

Fig.7 Demodulation bits for different satellites (high dynamic)

由图7可知,环路能够正常地跟踪卫星信号,解调出导航电文,而普通的环路在这种动态下,无法稳定地跟踪卫星信号,造成信号失锁,无法解调导航电文,导致

(下转第83页)

参考文献

- [1] MCNAB I R, FISH S, STEFANI F. Parameters for an electromagnetic naval railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 37(1):223-228.
- [2] MORRISON P H, AMBERNTSON D S. Guidance and control of a cannon-launched guided projectile[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1977, 14(6):328-334.
- [3] 张相炎. 现代火炮技术概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
- [4] 郭锡福. 远程火炮武器系统射击精度分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [5] 黄义,汪德虎,汪汇川,等. 舰炮发射一维修正弹多发同时弹着研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5):127-129.
- [6] 李陆军,吕金建,丁建江,等. 基于时频分布的导弹目标识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6):45-50.
- [7] 黄义,黄景德,由佳. 一维弹道修正弹多发同时弹着火控新算法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5):6-7.
- [8] 石章松,傅冰,胡献君,等. 基于增程修正弹的同时弹着火控机理[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(3):7-12.
- [9] 刘剑威,王海川. 增程修正弹单炮多发同时弹着火控

技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(1):70-72.

- [10] 程恭,石章松,王航宇. 基于瞄准点排布模型的多发同时弹着射击诸元解算[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11):29-32.
- [11] 李开龙,石章松,龚驰,等. 大口径舰炮多发同时弹着射击效力分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(9):31-33.
- [12] 卢发兴,贾正荣,吴威. 舰炮对岸区域射击最优表尺分配模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3):571-576.
- [13] 程李东,姜毅,牛钰森. 单炮多发同时弹着的局部插值算法与并行加速[J]. 弹道学报, 2018, 30(2):19-25.
- [14] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2016.
- [15] HE S M, LEE C H. Gravity-turn-assisted optimal guidance law[J]. Journal of Guidances, Control & Dynamics, 2017, 41(1):1-13.
- [16] CHO H, RYOO C K, TSOURDOS A, et al. Optimal impact angle control guidance law based on linearization about collision triangle[J]. Journal of Guidance, Control & Dynamics, 2014, 37(3):958-964.

(上接第44页)

无法定位,实验结果证明了算法的有效性。

4 结论

本文提出了一种利用支持向量机的载波跟踪算法,采用支持向量机算法建立起判决因子和权值之间的非线性关系,根据跟踪环路运行情况调节锁相环和锁频环相对作用大小,有效地提高了载波环高动态跟踪性能。但本文只是进行了基于软件接收机的仿真,而在实际情况下,可能要考虑电离层干扰和电路系统带来的热噪声等其他因素,未来工作将考虑在实际情况下进一步提升跟踪环路的性能。

参考文献

- [1] 谢刚. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [2] JIANG C H, CHEN S, CHEN Y W, et al. Research on a chip scale atomic clock driven GNSS/SINS deeply coupled navigation system for augmented performance[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 13(2):326-331.
- [3] KIESEL S, ASCHER C, GRAMM D, et al. GNSS receiver with vector based FLL-assisted PLL carrier tracking loop [C]//ION GNSS, Proceedings of the Institute of Navigation, 2008:197-203.

- [4] 唐小妹,徐鹏程,王飞雪. 两种相位鉴别器下的导航接收机跟踪环路性能分析及比较[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2):85-90.
- [5] LIAN P. Improving tracking performance of PLL in high dynamic applications [D]. Calgary:University of Calgary, 2004.
- [6] 吴琼,寇艳红,郑兴平. 高动态 GPS 接收机环路跟踪技术研究[J]. 无线电工程, 2008, 38(12):32-36.
- [7] GAO G J. INS-assisted high sensitivity GPS receivers for degraded signal navigation [D]. Calgary: University of Calgary, 2007.
- [8] 匡鸿博,茅旭初,王永凯. 一种用于高动态环境的 GPS 信号跟踪方法 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(6):854-858, 864.
- [9] JIANG C H, CHEN S, BO Y M, et al. An adaptive tuning method of GNSS carrier tracking loop for high dynamic application [J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2016, 48(4):271-278.
- [10] JIANG C H, CHEN S, BO Y M, et al. Implementation and performance evaluation of a fast relocation method in a GPS/SINS/CSAC integrated navigation system hardware prototype[J]. IEICE Electronics Express, 2017, 14(6). doi: 10.1587/eie.14.20170121.
- [11] DIETRICH R, OPPER M, SOMPOLINSKY H. Statistical mechanics of support vector networks [J]. Physical Review Letters, 2010, 82(14):2975-2978.