

基于双码时延间隔的 GNSS 矢量跟踪环路

任晓岳¹, 卢虎², 王立志¹, 王旭婧¹

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 针对传统 GNSS 接收机在弱信号下工作性能不理想的特点, 分析了传统接收机和矢量接收机的工作原理, 归纳总结了传统接收机在弱信号下的性能缺陷; 在弱信号下对比传统标量接收机与矢量接收机的跟踪性能, 提出用设置双码时延间隔的方法来优化矢量跟踪性能。用矢量跟踪来弥补传统接收机在弱信号下的缺陷。仿真结果表明: 在载噪比 15~22 dB 情况下, 采用双码时延间隔 EKF 算法的矢量接收机跟踪性能要优于传统标量接收机, 且比采用单码时延间隔的矢量接收机跟踪误差还要小约 20 ns。

关键词 GNSS; 矢量接收机; 双码时延间隔

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.009

中图分类号 V241.62 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0036-04

The GNSS Vector Tracking Loop Based on Double-code Delay Interval

REN Xiao-yue¹, LU Hu², WANG Li-zhi¹, WANG Xu-jing¹

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: According to the condition that the operating performance of the traditional GNSS receiver is not ideal in the weak signal environment, firstly the article analyzes the working principle of traditional receiver and vector receiver, summarizes the traditional receiver's performance deficiency in the weak signal environment, secondly the tracking performance of the traditional scalar receiver and that of the vector receiver are compared in the weak signal environment, and simultaneously the method of setting up the delay interval of double-code is put forward to optimize the vector tracking performance. The technology of vector tracking is used to make up for the defect of traditional receiver in the weak signal. The experimental results show that the double-code delay interval vector receiver which uses EKF algorithm is superior to the traditional scalar receiver in tracking performance in the condition that the carrier-to-noise ratio is 15-22 dB/Hz, and its tracking error is about 20 ns smaller than the tracking error of the one-code delay interval vector receiver.

Key words: GNSS; vector receiver; double-code delay interval

全球卫星导航定位系统(GNSS),在军用和民用领域已相当广泛。传统GNSS接收机在特殊环境(例如隧道、森林、峡谷)下工作时,由于卫星导航

信号受到干扰、遮蔽等影响,信号大幅衰减低于28dB,大大低于传统GNSS接收机的捕获和跟踪门限,接收机工作性能十分不理想。研究弱信号环境

收稿日期:2012-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174194);航空科学基金资助项目(20110196004)

基金项目:任晓岳(1989-),男,山东烟台人,硕士生,主要从事导航定位研究。E-mail:776596484@qq.com

下可以理想工作的GNSS接收机成为近年来的热点和难点。在接收机工作流程中,跟踪环路十分重要。如果跟踪环路不能稳定工作,最终将导致定位结果误差较大甚至无法定位。

1996年Spilker提出了矢量跟踪思想。根据各个信道相关性,将各个信道联系起来,利用强信号通道来辅助弱信号通道,从而提高跟踪性能。赵思浩、Matthew Lashely、Mohamed^[1-3]等国内外学者进一步研究表明,矢量跟踪环路接收机在弱信号环境下的工作性能明显优于传统接收机。目前研究已经将自适应卡尔曼滤波算法应用到矢量环中,提出自适应地调整相干、非相干积分时间。本文通过对比对所有通道只采用1个码时延间隔和采用2个码时延间隔的EKF算法的跟踪精度,深入探讨通过设置、调整双码时延间隔来维持码跟踪误差的稳定以及提高跟踪精度的问题。

1 矢量环路工作原理

矢量跟踪技术把视野中所有卫星跟踪和导航解算组合到卡尔曼滤波器中来完成。将各通道接收到信号的伪距、伪距率的测量值输入到导航解算中得到用户位置、速度以及时钟误差状态量。将状态量反馈给跟踪模块,进行码相位、载波相位和载波多普勒跟踪。使用实时更新的状态量与实时卫星星历位置产生的误差控制码NCO(Numerically Controlled Oscillators,NCO)。预测值初始化每一通道的码和载波NCO,每一条通道的相关器输出值作为EKF的测量值进入下一时刻的滤波中。相关器、鉴别器、卡尔曼滤波器和NCO构成一个闭合反馈回路。

对矢量接收机进行具体分析,在某一时刻 k ,假设接收机的真实速度为 \mathbf{V}_k ,估计速度为 $\hat{\mathbf{V}}_k$,真实位置为 \mathbf{X}_k ,估计位置为 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。同时还要考虑到接收机的钟差 $t_{b,k}$ 和漂移钟差 $\dot{t}_{d,k}$ 的影响。然后将这4个状态变量联系在一起写出状态方程:

$$(\delta\mathbf{X}_k, \delta\mathbf{V}_k, t_{b,k}, \dot{t}_{d,k})^T =$$

$$\mathbf{F}_{k,k-1}(\delta\mathbf{X}_{k-1}, \delta\mathbf{V}_{k-1}, t_{b,k-1}, \dot{t}_{d,k-1})^T + \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵; \mathbf{W}_{k-1} 为过程状态扰动噪声。

同时还引入码相位误差、速度误差和载波频率误差的关系。其中码相位误差值和载波频率误差值可以通过码相位鉴别器和载波频率鉴别器测出^[4]:

$$\begin{aligned} t_{b,k} + (\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k)^T \alpha_{j,k} &= \hat{\phi}_{j,k} - \phi_{j,k} \\ t_{b,k} + (\mathbf{V}_k - \hat{\mathbf{V}}_k)^T \alpha_{j,k} &= \hat{f}_{j,k} - f_{j,k} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\hat{\phi}_{j,k} - \phi_{j,k}$ 为码相位误差; $\hat{f}_{j,k} - f_{j,k}$ 为载波频率

误差。利用接收机的初始状态量(包括位置、速度、各通道的钟差、以及相位和频率误差)与下一时刻的状态估计量的积分鉴别产生含有噪声的载波频率误差和码相位误差,输入到卡尔曼滤波器中,进行EKF过程^[5-6]将估计误差输出反馈到NCO,进行一次滤波。

2 基于自适应调整码时延间隔的EKF算法

弱信号环境下的码跟踪EKF算法^[7]定义第 i 个时间间隔上的测量矢量 $\mathbf{Z}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{X}_i + n_i$ (n_i 为测量噪声; \mathbf{H}_i 为矢量化观测矩阵)。根据文献^[3]提出动态模型: $\tau_{i+1} = \boldsymbol{\Phi} \tau_i + \mathbf{W}_{\tau,i+1}$,式中: τ 为码时延误差; \mathbf{W}_{τ} 为噪声项。则测量矢量为:

$$\mathbf{Z}_i = [\mathbf{I}_{E_i}, \mathbf{Q}_{E_i}, \mathbf{I}_{L_i}, \mathbf{Q}_{L_i}, \mathbf{I}_{P_i}, \mathbf{Q}_{P_i}]^T \quad (3)$$

将系统EKF方程重写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{i|i-1} &= \boldsymbol{\Phi} \mathbf{P}_{i-1|i-1} \boldsymbol{\Phi}^T + \mathbf{Q}_n \\ \mathbf{K}_i &= \mathbf{P}_{i|i-1} \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{i|i-1} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{B}_i + \mathbf{R}_n)^{-1} \\ \mathbf{P}_{i|i} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_{i|i-1} \\ \mathbf{X}_{i|i} &= \mathbf{X}_{i|i-1} + \mathbf{K}_i (\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i - \mathbf{b}_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{b}_i 为所计算的测量数; $\mathbf{Z}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot$

$[\mathbf{I}_{E_i} + \mathbf{Q}_{E_i}, \mathbf{I}_{L_i} + \mathbf{Q}_{L_i}, \mathbf{I}_{P_i} + \mathbf{Q}_{P_i}]^T$ 。

根据不同测量之间的协方差将测量协方差矩阵写为:

$$\mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} 1 & A & B \\ A & 1 & B \\ B & B & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $A = \left[1 - 2 \frac{\Delta\tau}{T_{\text{chip}}}\right]^2$; $B = \left[1 - \frac{\Delta\tau}{T_{\text{chip}}}\right]$ 。

由此算法可知 T_{chip} 为一个码片长度。 $|\tau| \leq T_{\text{chip}}$,该算法只引入了一个小的码时延间隔,通常情况下可以获得很好的码时延估计,但若在预计的码时延估计误差很大的时候,码的锁定就无法维持,这也会使跟踪性能受到影响。因此考虑引入一个大的码时延间隔来辅助维持码的锁定。若将2个码时延间隔设为 $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$,从一个即时信号中采用2个测量值,利用大的码时延间隔来辅助,所有环路使用一个共同的EKF算法。采用2个观测量,对应的观测矩阵变为:

$$\mathbf{Z}_i = [\mathbf{Z}_{i1}, \mathbf{Z}_{i2}]^T \quad (6)$$

因为采用2个码时延间隔,所以对应2个不同码时延间隔即时测量值的残差与增益将不同,可以将原来采用一个码时延间隔看作是采用2个相同的码时延间隔,从而测量协方差矩阵为:

$$R_n = \begin{bmatrix} 1 & A_1 & A_1 & C_s & C_a & A_1 \\ A_1 & 1 & A_2 & C_a & C_s & A_1 \\ A_2 & A_2 & 1 & B_2 & B_2 & 1 \\ C_s & C_a & B_2 & 1 & B_1 & B_2 \\ C_a & C_s & B_2 & B_1 & 1 & B_2 \\ A_2 & A_2 & 1 & B_2 & B_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $A_1 = \left[1 - 2 \frac{\Delta\tau_1}{T_{chip}}\right]^2$; $A_2 = \left[1 - \frac{\Delta\tau_1}{T_{chip}}\right]^2$; $B_1 = \left[1 - 2 \frac{\Delta\tau_2}{T_{chip}}\right]^2$; $B_2 = \left[1 - \frac{\Delta\tau_2}{T_{chip}}\right]^2$; $C_s = \left[1 - \frac{|\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2|}{T_{chip}}\right]^2$; $C_a = \left[1 - \frac{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2}{T_{chip}}\right]^2$.

在弱信号环境下的跟踪过程中,在预计码时延误差过大的情况下,将影响后续工作,引入一个重启模块,在误差超过一定限度后,将停止利用上级反馈的估计误差,开始启用初始设置码时延间隔 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$,进行重捕获。设置双码时延间隔可以弥补设置单码时延间隔的不足:设置单个较大码时延间隔只能维持码的锁定而不能更好的进行码时延估计;设置单个较小码时延间隔在普通环境下具有好的码时延估计而在复杂环境下容易导致码的失锁。跟踪环路设置双码时延间隔可以在跟踪遇到重捕获之后,利用设置一个较大的间隔来维持码的锁定,其它状态下采用较小的间隔,使得环路具有稳定良好的跟踪性能。

根据文献[8~9]建立 VDLL 码跟踪误差的模型,进一步通过实验仿真来说明设置双码时延间隔 EKF 算法的矢量跟踪在弱信号环境下的优越性^[9-10]。误差模型为:

$$\sigma_{VDLL} = \left[\frac{T_{EL}}{T} \right] \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \sigma_L^2 \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \quad (8)$$

式中: \mathbf{H} 为矢量测量矩阵; T_{EL} 为定位时间间隔; T 为预积分时间。根据文献[11~12]可求出反馈 σ_L^2

$$= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (N \text{ 为可见星数目})。$$

3 仿真分析

仿真验证:设置 2 个码时延间隔的 EKF 算法跟踪性能优于设置单个码时延间隔的 EKF 算法。仿真模拟 GPS 信号,设定工作环境的信噪比为 15~22 dB,根据矢量跟踪的工作原理进行跟踪性能仿真对比。为了验证对比采用对所有通道只采用 1 个码时延间隔和采用 2 个码时延间隔的 EKF 算法跟踪精度。假设时钟类型一致;预检测积分时间同为

400 ms;噪声带宽 10 Hz;码时延间隔一个设置为 0.5 码片,一个设置为 0.2 码片,一个设置 2 个码时延间隔 0.2 码片和 0.5 码片。仿真结果见图 1。

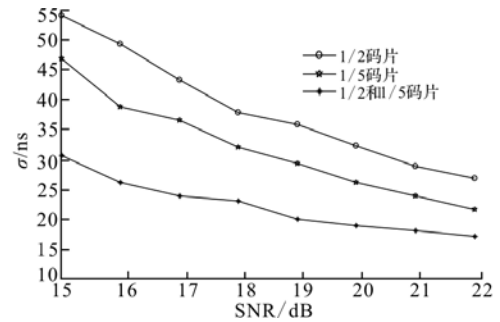


图 1 设置单、双码时延间隔的码跟踪精确度对比
Fig. 1 Compared the accuracy of code tracking by setting up single-code and double-code delay interval

通过仿真可以看出,弱信号情况下采用双码时延间隔设置的跟踪环路码跟踪误差 σ 要小于设置单个码时延间隔的环路,在导航定位中 3 ns 的码时延误差就会引起 1 m 的定位误差,因此,从总体上看,矢量跟踪环路误差要小于传统跟踪环路,进行设置双码时延间隔的矢量跟踪环路性能更加精确。

仿真模拟 GPS 信号,设定工作时间为 150 s,前 50 s 卫星信号良好,从第 50 s 开始对信号进行干扰,使信号衰减,并持续 50 s,最后 50 s 恢复信号强度,仿真验证对比对所有通道只采用 1 个码时延间隔和采用 2 个码时延间隔的 EKF 算法跟踪稳定性,结果见图 2。

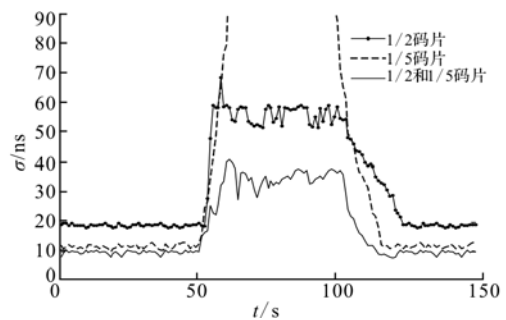


图 2 设置单、双码时延间隔的码跟踪稳定性对比
Fig. 2 Compared the stability of code tracking by setting up single-code and double-code delay interval

由图 2 可知,在前 50 s,设置双码时延间隔的与设置单个较小码时延间隔码跟踪误差均好于设置单个较大码时延间隔的码跟踪误差,但 50 s 之后,由于信号恶化,采用较小码时延间隔码跟踪不能维持稳定,产生码跟踪误差较大;设置双码时延间隔的码跟踪能够自适应地调整时延间隔,不仅能够维持码跟踪的稳定,而且其码跟踪比设置单个较大码时延间隔的跟踪更精确。

4 结语

在弱信号环境下,本文提出的设置双码时延间隔的矢量接收机的码跟踪误差,要大大小于传统标量接收机,与设置单码时延间隔的矢量接收机相比,其跟踪性能也更加稳定、精确。因为设置双码时延间隔,可以在码误差估计较大的情况下采用大码来维持锁定,在其它情况下采用较小码时延间隔来提高跟踪精度,因此可以确保跟踪的稳定与精确。

参考文献(References):

- [1] Ward P. Using a GPS receiver monte carlo simulator to predict RF interference performance [C]//Proceedings of 10th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation. Kansas, MO:[s. n.],1997:1473-1482.
- [2] Mohamed A H, Schwarz K P. Adaptive kalman filtering for INS/GPS [J]. Journal of geodesy, 1999, 73: 193-203.
- [3] Crane R. A simplified method for deep coupling of GPS and inertial data [C]//Proceedings of on NTM 2007. San Diego, CA: Institute of navigation, 2007: 311-319.
- [4] Ward P. Performance comparisons between FLL PLL and a novel FLL-assisted-PLL carrier tracking loop under RF interference conditions [C]//Proceedings of the 11th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation. Nashville, TN: [s. n.], 1998:783-795.
- [5] ZHAO Shihao, Akos D. An open source GPS/GNSS vector tracking loop implementation filter tuning and results [C]//Proceedings of ION ITM 2011. Aan Diego, CA: Institute of navigation, 2011:1293-1305.
- [6] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS principles and applications norwood [M]. MA,USA: Artech house inc, 2006.
- [7] Lian P. Improving tracking performance of PLL in high dynamic applications [D]. Calgary: The university of calgary, 2004.
- [8] Zidan N I. Acquisition and fine acquisition of weak GPS L2C and L5 signals under high dynamic conditions for limited-resource applications [C]//Proceedings of ION GNSS 2005. Long beach, CA:[s. n.], 2005:1577-1588.
- [9] Zidan N I. Extend kalman filter tracking and navigation message decoding of weak GPS L2C and L5 signals [C]//Proceedings of ION GNSS 2005. Long beach, CA:[s. n.], 2005:178-189.
- [10] Elliott D,Kaplan. Understanding GPS: principles and applications [M]. Beijing: Electronic industry press, 2012.
- [11] Deok Won Lim, Hee Won Kang, Dong Hwan Hwang, et al. Performance analysis of vector delay lock loop [J]. ICROS - SICE international joint conference, 2009: 88(5):2038-2046.
- [12] Van Dierendonck A J, Pat Fenton, Tom Ford. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver[J]. Journal of institute of navigation, 1992,39(3):265-283.

(编辑:田新华)