

# 引入微分控制思想的辅助 GPS 载波跟踪环路设计

高帅和<sup>1,2</sup>, 赵琳<sup>1</sup>, 郭丽姝<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川成都 610036)

**摘 要:** 载波信号跟踪环路制约着 GPS 接收机的工作性能, 针对其易受高动态和弱信号等环境干扰的缺陷, 提出一种引入微分控制思想、应用 SINS 辅助接收机载波跟踪环路的设计方法。剖析应用于载波跟踪的相位锁定环 (Phase Locked Loop, PLL), 并将其近似为 PI 控制模型; 在验证辅助信息引入时环路系统稳定的基础上, 增加类微分控制项, 利用 SINS 的输出和时钟误差信息估算的多普勒频率作为跟踪环路的中心频率, 辅助 PLL 实现载波信号跟踪; 仿真结果表明提出方法能够有效地缩短跟踪环路带宽, 缓解热噪声和动态应力之间的矛盾, 进而改善载波环路的频率响应和跟踪误差。

**关键词:** 信号跟踪; 多普勒频移; PLL; 微分控制

**中图分类号:** U666.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1817-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.018

## Aiding GPS Carrier Tracking Loop with Differential Control

GAO Shuai-he<sup>1,2</sup>, ZHAO Lin<sup>1</sup>, GUO Li-shu<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan 610036, China)

**Abstract:** The performance of GPS receiver is affected by carrier tracking loop. Because of the vulnerability of carrier tracking in high dynamic and weak signal environments, a method of strapdown inertial navigation system (SINS) aiding GPS tracking loop utilized differential control cogitation is proposed. Phase locked loop (PLL) utilized in traditional carrier tracking is analyzed, and the control mode could be considered as PI (proportion and integration) control. Then the stable of tracking loop with information aiding is verified, and differential control item is introduced to achieve carrier tracking, where the Doppler prediction is calculated by SINS output and clock error. Simulation results indicate that the proposed method could shorten the bandwidth of tracking loop, relieve the contradiction between thermal noise and dynamic stress, and thus further improve the frequency response and tracking errors in carrier tracking loop.

**Key words:** carrier signal tracking; Doppler frequency shift; phase locked loop (PLL); differential control

## 1 引言

高动态和弱信号环境下的 GPS 接收机的工作性能往往受限于接收机内部载波跟踪环路的设计。影响载波跟踪的主要误差因素包括热噪声、动态应力、振动引入的相位噪声, 以及 Allan 方差引入的相位噪声等。其中, 载波环路热噪声随着环路噪声带宽的增加而增加, 为了抑制其负面影响, 主要可通过缩短噪声带宽和增加预检测积分时间来实现; 而动态应力误差则随环路噪声带宽的增加而降低, 增加环路噪声带宽可以降低动态应力误差, 应对较高的动态性的影响, 因此在接收机中热噪声和动态应力误差是难以调和的矛盾<sup>[1,2]</sup>。为缓解载波跟踪环路中的误差冲突, 文献[3~5]中均提出利用 SINS

信息辅助载波跟踪环路的方法, 结果均验证了辅助信息可以有有效的缩短环路噪声带宽, 消除动态性造成的影响, 然而缺少相应的系统控制分析。文献[6]中提到根据锁相环相位输出结果, 提取频率误差量, 作为增加的微分控制项的输入, 由于预测信息源于环路输出, 因此其效能有限。为了将微分控制的思想和信息辅助有效地结合, 本文设计了一种引入微分控制思想, 应用 SINS 辅助接收机载波跟踪环路设计的方法, 在分析相位锁定环 (Phase Locked Loop, PLL) 的 PI 模型近似的基础上, 引入类微分控制项, 验证引入辅助信息的环路稳定性, 利用 SINS 输出的信息和时钟误差信息估算的多普勒频率作为跟踪环路的中心频率, 辅助 PLL 实现载波信号跟踪, 仿真结果验证了该方法的有效性。

## 2 载波跟踪环路的模型分析

作为接收机载波跟踪的主要方式,PLL在时域上的基本结构如图1(a)所示, $\varphi_i(t)$ 和 $\varphi_o(t)$ 分别代表跟踪环路的输入和输出, $k_0$ 为鉴相器的增益, $F(t)$ 和 $N(t)$ 分别为环路滤波器和振荡器的传递函数.对其进行拉普拉斯变换,结构如图1(b)所示.

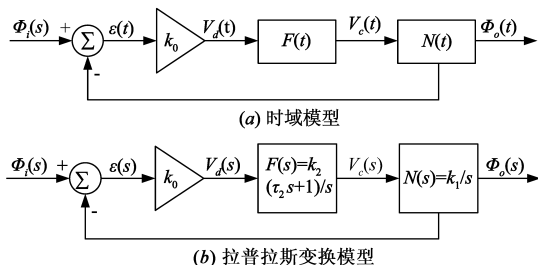


图1 载波跟踪环路的控制模型

### 2.1 载波环路的PI模型近似

根据图1(b)的结构,存在:

$$\begin{cases} V_d(s) = k_0 \epsilon(s) = k_0 [\varphi_i(s) - \varphi_o(s)] \\ V_c(s) = V_d(s) F(s) \\ \varphi_o(s) = V_c(s) N(s) = k_1 V_c(s) / s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $N(s) = k_1/s$ ,当载波跟踪环路采用二阶锁相环路时,存在 $F(s) = k_2(\tau_2 s + 1)/s$ .根据式(1)得到环路的传递函数 $H(s)$ 为:

$$H(s) = \frac{\varphi_o(s)}{\varphi_i(s)} = \frac{k_0 k_1 F(s)}{s + k_0 k_1 F(s)} = \frac{k_0 k_1 k_2 (\tau_2 s + 1)}{s^2 + k_0 k_1 k_2 (\tau_2 s + 1)} \quad (2)$$

在该跟踪环路中除了具有即时成比例地反映控制系统偏差的差值信号 $\epsilon(s)$ ,还有消除静差的积分环节.在环路处于稳定的状态下,增大比例系数 $k_0$ ,可以缩小稳态误差,提高控制精度(但不能完全的消除稳态误差),同时加快系统的调节速度<sup>[7]</sup>.然而,当比例系数 $k_0$ 过大,调节过程中会出现较大的超调量,进而影响环路稳定,甚至会造成跟踪环路失锁.综合以上分析,传统的载波跟踪环路中对载波数字控制振荡器(Numerical Controlled Oscillator, NCO)的控制等同于同时具备了按比例反应系统的偏差的比例调节,和使系统消除稳态误差的积分环节,换言之,该控制可近似视为PI控制.

微分控制是PID控制中不可或缺的一环,其思想是通过偏差的变化来控制对象,进而达到控制目标,具体作用是改善系统的瞬态特性,增加系统的稳定性,在工程上一般不能单独使用.微分控制发挥作用是通过反映系统偏差的变化律,在偏差还没有形成之前预测其量值来产生超前的控制作用.因此,考虑在载波跟踪PLL中,引入微分控制项,进而改善控制系统的响应速度和稳定性.本文中将通过SINS运动信息、星历信息,

以及时钟误差信息预测载波环路的 Doppler 值及其变化率,作为增加的类微分控制项的输入,用以提供给 PLL 作为下一时刻环路的中心频率.

### 2.2 引入辅助信息的环路系统稳定性分析

引入 SINS 辅助信息的环路结构如图2所示<sup>[8]</sup>,在原有的控制环路的基础上增加了 SINS 辅助通路,其中存在辅助信息的误差量 $e(t)$ ,该误差主要是由输出惯性信息误差和系统时钟误差引起的.

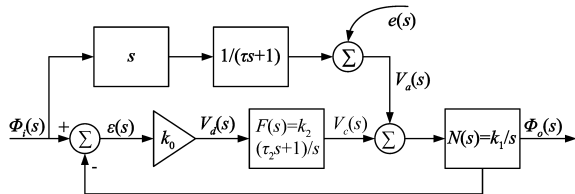


图2 引入SINS辅助信息的环路控制结构

为了便于验证,假设辅助信息的误差为理想状态,即 $e(t) = 0$ ,则存在:

$$\begin{cases} V_d(s) = k_0 \epsilon(s) = k_0 [\varphi_i(s) - \varphi_o(s)] \\ V_c(s) = V_d(s) F(s) \\ V_a(s) = \varphi_i(s) s / (\tau s + 1) \\ \varphi_o(s) = [V_c(s) + V_a(s)] N(s) = k_1 [V_c(s) + V_a(s)] / s \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)得到增加辅助信息的环路传递函数 $H'(s)$ 为:

$$H'(s) = \frac{k_1 s^2 + k_0 k_1 k_2 (\tau_2 s + 1)(\tau s + 1)}{(\tau s + 1) [s^2 + k_0 k_1 k_2 (\tau_2 s + 1)]} \quad (4)$$

和式(2)相比,式(4)的分母增加了 $(\tau s + 1)$ 项,极点增加了 $-\frac{1}{\tau}$ ,因此增加 SINS 信息辅助的系统和原始系统在某种程度上具有等价性, $H(s)$ 稳定,则 $H'(s)$ 也稳定<sup>[9]</sup>.此外,对于忽略的辅助信息的误差量 $e(t)$ 而言,其准确度也直接影响到整个系统的稳定,因此,需要提高辅助信息的估计精度,降低误差.

### 2.3 引入辅助信息的环路性能定量分析

前文已经提到,影响载波跟踪 PLL 的主要误差因素包括热噪声 $\delta\varphi_t$ 、动态应力噪声 $\delta\varphi_d$ 、振动引入的相位噪声 $\delta\varphi_v$ ,以及 Allan 方差引入的相位噪声 $\delta\varphi_{av}$ 等.在载波环路设计时,往往用其引起的稳态相位误差的标准差来描述 PLL 的性能,即:

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\delta\varphi_t^2 + \delta\varphi_v^2 + \delta\varphi_{av}^2 + \frac{\delta\varphi_d^2}{3}} \leq 15(\text{deg}) \quad (5)$$

当引入惯性信息辅助,绝大部分的动态应力噪声可以消除,则存在:

$$\sigma_{\text{PLL}} \approx \sqrt{\delta\varphi_t^2 + \delta\varphi_v^2 + \delta\varphi_{av}^2} \leq 15(\text{deg}) \quad (6)$$

当采用二阶跟踪环路,视距动态应力为 $1\text{g/s}$ 时,惯性信息引入前后跟踪环路的相位误差对比结果如图3

所示.其中,实线为引入辅助信息的结果,虚线为无外部信息辅助的结果,显然辅助信息的引入有效地减少了环路的相位误差.

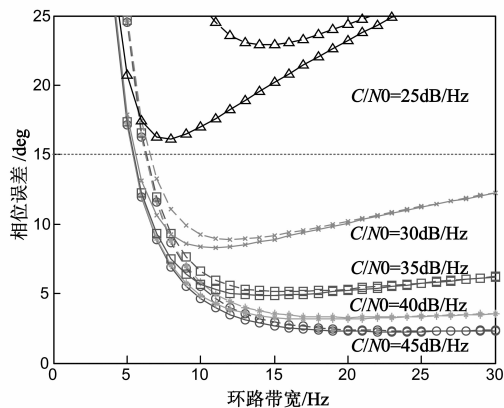


图3 二阶跟踪环路的相位误差

进一步假设视距动态应力为  $10\text{g/s}$ ,信号的载噪比为  $30\text{dB/Hz}$ ,辅助信息足够精确,此时无辅助环路实现稳定跟踪信号的最优带宽和最小带宽分别为  $19\text{Hz}$  和  $12\text{Hz}$ ,远大于辅助环路对应的  $11\text{Hz}$  和  $6\text{Hz}$  的带宽.

### 3 引入微分控制思想的跟踪环路设计

在载波跟踪环路中,输入的中频数字信号首先需转换成同相和正交两个支路,利用即时码信号剥离输入信号中的 C/A 码信息,得到  $I_p$  和  $Q_p$ .在完成周期内的积分清零后,送入跟踪环路的鉴相器和滤波器中,据此调整本地 NCO.当经过一段时间的调整使得鉴相器输出的平均误差接近于零时,载波环路实现稳定跟踪.然而当载体处于高动态环境下,即有较高的速度和速度的导数时,载波多普勒变化剧烈,传统的载波 PLL 经常失锁,甚至无法实现精确地跟踪.在该方案中考虑增加类微分项的辅助,即应用 SINS 输出的信息、星历信息,以及时钟误差信息等估算多普勒频率和频率变化量.辅助载波跟踪环路的结构如图 4 所示,其中引入项的作用是在偏差未形成时,最大程度的预测偏差,进而

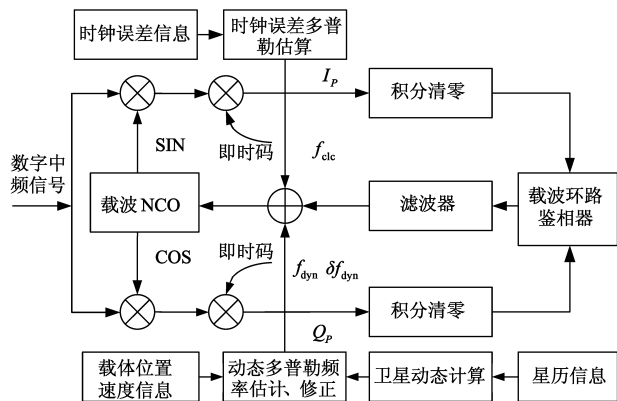


图4 辅助载波跟踪环路的框图

消除偏差,估计项可以有效地估测载波环路多普勒的变化,因此将其视为类微分项.

辅助多普勒是在组合 GPS/SINS 系统的基础上实现的,因此可以将时钟的误差信息直接转化为相应的多普勒频率  $f_{\text{clk}}$ .相对运动引起的多普勒频率则根据星历和载体的运动信息计算,通过星历推算卫星动态信息的具体流程如图 5 所示.

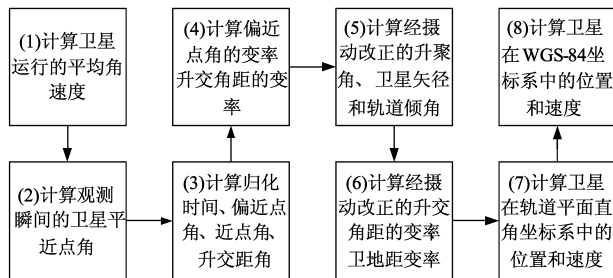


图5 星历推算卫星运动信息的流程

动态载波多普勒  $f_{\text{dyn}}$  可通过式(7)计算获得<sup>[10]</sup>,

$$f_{\text{dyn}} = (v_c - v_s) \cdot \mathbf{I}_{\text{los}} / \lambda_L \quad (7)$$

其中,  $\lambda_L$  为载波  $L1$  的波长,  $v_c$  为载体的速度,  $v_s$  为卫星的速度,  $\mathbf{I}_{\text{los}}$  为卫星和接收机之间的视距方向矢量.忽略卫星运动情况下,相干积分时间为  $1\text{ms}$  时的多普勒的变化量  $\delta f_{\text{dyn}}$  为:

$$\delta f_{\text{dyn}} = -0.001 a_c \mathbf{I}_{\text{los}} / \lambda_L \quad (8)$$

其中,  $a_c$  为载体的加速度.鉴于时钟误差引起的频率变化量难以精确跟踪,方案直接采用输出的预测多普勒频率值作为下一时刻环路的中心频率,而并未采用式(8)中的变化量  $\delta f_{\text{dyn}}$ .

前文已经提到多普勒的估计结果会直接影响整个环路控制系统的性能,而在整个推导过程中,动态多普勒频率经历了星历推算卫星运动信息,位置、速度信息的坐标转换,以及多普勒的估算等环节,估计结果中难以避免的会出现随机误差,此处针对存在的随机误差进行 AR(2) 建模,将随机误差通过建模的方式予以抑制,进而获得更加精确的修正值.

### 4 仿真结果分析

为了验证本文提出的优化的辅助跟踪环路方案对高动态载波相位跟踪的效果,对 GPS 的中频信号设置如下,信号的载噪比随机分布在  $30\text{dB/Hz}$  和  $40\text{dB/Hz}$  之间,中心频率和采样频率分别为  $4.092\text{MHz}$  和  $16.368\text{MHz}$ ,锁相跟踪环路为 2 阶,环路噪声带宽为分别取  $25\text{Hz}$  和  $10\text{Hz}$ ,预检测积分时间为  $10\text{ms}$ .运动状态如图 6 所示,其中加加速度的最大值为  $10\text{g/s}$ ,将该轨迹中对应的多普勒值引入到 19 号卫星中.

图 7 比较了环路噪声带宽为  $20\text{Hz}$  情况下,传统载波跟踪环路输出和文中提出方案的差异,图 7(a) 和图

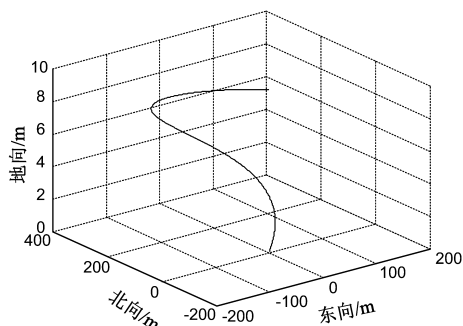


图6 载体运动轨迹仿真

7(b)分别为引入类微分控制的跟踪环路和传统跟踪环路的输出结果.显然引入类微分控制的辅助跟踪环路,在获得外部多普勒等信息辅助后,迅速的达到环路锁定,具有较快的频率响应.

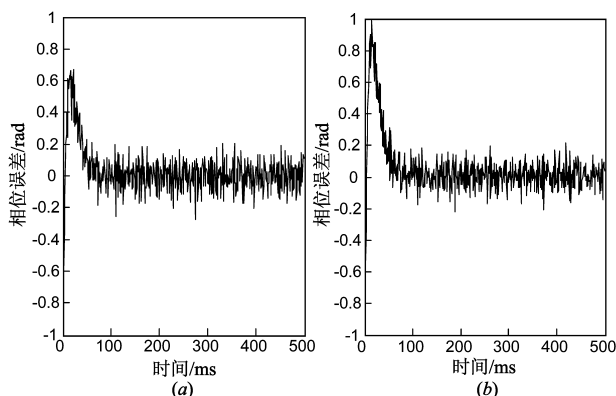


图7 噪声带宽为20Hz条件下的PLL误差输出

为了进一步验证提出方法在缓解环路的热噪声和动态应力误差的有效性,将环路的噪声带宽缩至 7Hz,比较二者的输出,结果如图 8 所示.图 8(a)和图 8(b)分别为引入类微分控制的跟踪环路和传统跟踪环路的输出结果.引入类微分控制的跟踪环路的输出频率响应稍有加长,但较传统载波跟踪环路长时间无法锁定的情况,文中提出方案在改善载波跟踪环路性能方面效果不俗.

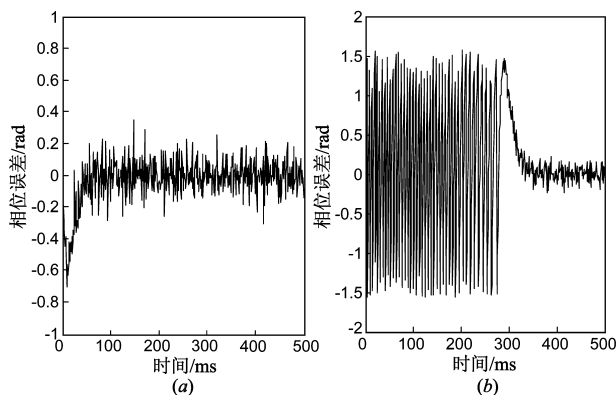


图8 噪声带宽为5Hz条件下的PLL误差输出

## 5 结论

本文在分析传统的载波跟踪环路的基础上,提出了增加类微分控制项,利用辅助信息改善跟踪环路性能的方案,并得出如下结论:

(1)传统载波跟踪环路具有即时成比例地反映控制系统的偏差信号,还具有消除静差的积分环节,因此可视为类 PI 模型.

(2)增加辅助信息有助于缩短环路噪声带宽,缓解热噪声和动态应力误差之间的矛盾;同时在环路中引入辅助信息可以不改变系统的稳定性.

(3)引入预测多普勒信息的类微分控制,可以改善整个跟踪环路的频率响应和跟踪误差.

## 参考文献

- [1] 张伯川,张其善.高动态接收机的关键问题研究[J].电子学报,2003,31(12):1844-1846.  
ZHANG Bo-chuan, ZHANG Qi-shan. Research on the key issue about high dynamic receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1844-1846. (in Chinese)
- [2] Ravindra, Jinling Wang. Analysis of INS derived Doppler effects on carrier tracking loop[J]. The Journal of Navigation, 2005, 58(3): 493-507.
- [3] Tsung-Yu Chiou. GPS receiver performance using inertial-aided carrier tracking loop[A]. 18th International Technical Meeting of the Satellite Division ION GNSS Conference[C]. Long Beach: The Institute of Navigation, 2005. 2895-2910.
- [4] Tsung-Yu Chiou, Santiago Alban, Sarah Atwater. Performance analysis and experimental validation of a Doppler-aided GPS/INS receiver for JPALS applications[A]. 17th International Technical Meeting of the Satellite Division ION GNSS Conference[C]. Long Beach: The Institute of Navigation, 2004. 1609-1618.
- [5] Demoz Gebre-egziabher, Alireza Razavi. Sensitivity and performance analysis of Doppler aided GPS carrier tracking loops[J]. Navigation, 2005, 52(2): 49-60.
- [6] 高帅和,赵琳,丁继成.应用PID思想的高动态GPS载波跟踪环路设计[J].中国惯性技术学报,2011,19(1):55-58.  
GAO Shuai-he, ZHAO Lin, DING Ji-cheng. High dynamic GPS carrier tracking loop design utilizing PID[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 55-58. (in Chinese)
- [7] Uyanik H U, Tarim N. PID-controlled PLL for fast frequency-hopped systems[A]. 6th IEEE Dallas Circuits and Systems Workshop on System-on-Chip[C]. Dallas, TX, USA: IEEE Press, 2007. 1-3.
- [8] 吕鹏,陆明泉,冯振明.SNS/GPS紧耦合接收机载波跟踪环路分析[A].第二届中国卫星导航学术年会[C].上海:

美国科研出版社,2011.1443 – 1446.

Lu Peng, Lu Mingquan, Feng Zhenming. Analysis of SINS/GPS tight-coupled receiver carrier tracking loop[A]. 2nd China Satellite Navigation Conference[C]. Shanghai: Scientific Research Publishing, INC, 2011. 1443 – 1446. (in Chinese)

- [9] S Alban, D M Akos, S M Rock. Performance analysis and architectures for INS-aided GPS tracking loops[A]. Proceedings of the 2003 National Technical Meeting of The Institute of Navigation[C]. Anaheim: The Institute of Navigation, 2003. 611 – 622.

- [10] D Borio, N Sokolova, G Lachapelle. Doppler measurements and velocity estimation; A theoretical framework with software receiver implementation[A]. Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of ION[C]. Savannah: The Institute of Navigation, 2009. 304 – 316.

## 作者简介



高帅和 男,1986 年 10 月出生于辽宁瓦房店,现为哈尔滨工程大学博士研究生,从事卫星导航接收机的相关工作.

E-mail: gaoshuaihe@yahoo.cn



赵琳 男,1968 年 5 月出生于黑龙江哈尔滨,现为哈尔滨工程大学教授、博士生导师,主要从事卫星导航、惯性导航和组合导航方向的研究工作.