

隐式自校正算法在锁相环中的应用

杨 莎^{1,2,3}, 朱宇霞^{1,2,3}, 齐志强^{1,2,3}, 于 涵^{1,2,3}

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430074;
3. 北京北方烽火科技有限公司, 北京 100085)

摘要:针对锁相环中晶体振荡器受温度影响的时变和不稳定等特点,在递推辨识算法的基础上提出一种自校正控制和前馈补偿相结合的方案,即隐式自校正控制方案。该方案根据辨识得到的系统参数设计控制器调节系统,使输出信号方差变化最小。将此算法应用到锁相环的自适应预测模块中,并用 MATLAB 软件仿真验证此算法,仿真结果表明,使用隐式自校正控制算法后,不仅能优化系统的辨识参数,而且输出信号的变化也趋于稳定,可以满足锁相环中输出信号跟踪输入信号的要求。

关键词: 锁相环; 隐式自校正控制; 自适应预测模块

中图分类号: TN752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2011)02-0050-03

Applications of implicit self-tuning control algorithm in phase lock loops

Yang Sha^{1,2,3}, Zhu Yuxia^{1,2,3}, Qi Zhiqiang^{1,2,3}, Yu Han^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China;
3. Beijing Northern FiberHome Technologies Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In view of time-varying and instability of crystal oscillators in phase lock loops due to the effects of temperature, a scheme of implicit self-tuning control combined with forward compensation is proposed on the basis of the recursive identification algorithm, i. e. implicit self-tuning control algorithm. This scheme designs the controller regulating system in accordance with the parameters obtained from the identification so as to minimize the output signal variance variations. Application of this algorithm in the self-tuning prediction modules and simulation and validation of this algorithm by using MATLAB show that application of this algorithm can not only optimize the system identification parameters, but also considerably stabilize the output signals, satisfying the requirement of the output signals in phase lock loops to track the input signals.

Key words: phase lock loop; implicit self-tuning control; adaptive prediction module

0 引 言

许多电子设备要正常工作,通常需要外部的输入信号与内部的振荡信号同步,利用锁相环可以实现这个目的。锁相环是一种反馈控制电路,它是一种使输出信号与参考信号或者输入信号在频率和相位上同步的电路,能实现输出信号频率对输入信号频率的自动跟踪,所以通常用于闭环跟踪电路。

对于锁相环,温度变化对晶体振荡器的作用会导致输出频率产生偏差,从而影响锁相环的稳定性。本文在系统递推辨识算法的基础上提出一种广义自校正控制算法,以控制温度的非线性和不稳定性,达到自适应调节的目的。1987 年 Clarke 等人提出了基于系统离散时间参数模型的预测控制算法,即基于参数模型的广义预测控制(GPC)算法,在广义最小方差控制的基础上引入了多步预测的思想,但 GPC 算法需要递推 Diophantine 方程和矩阵求逆,

计算量较大。所以可以考虑直接辨识自校正控制参数的方法,此方法称为隐式自校正算法。

1 锁相环中隐式自校正控制方案

1.1 隐式自校正控制算法

所谓自校正控制是利用过程中的输入和输出信号在线地对过程的数学模型进行辨识,然后修正控制策略,改变调节器的控制作用,达到对系统的有效控制。自校正控制算法是目前应用最广泛的一类自适应控制方法,它由辨识和控制两部分组成。辨识过程是用一个结构已知而参数未知的预测模型描述系统的特性,通过比较提前预测值和实际输出值,调整自适应模块的模型系数,优化系统参数。控制过程是根据辨识参数计算本采样周期内的控制量从而去控制下一步的系统模型。在此控制量的控制下,系统的参数不断优化,使实际输出的方差达到最小。Diophantine 方程是自校正控制中很重要的方程,该

方程的多项式如下：

$$\begin{aligned} A(Z^{-1})X(Z^{-1}) + B(Z^{-1})Y(Z^{-1}) &= C(Z^{-1}), \\ A(Z^{-1}) &= a_0 + a_1Z^{-1} + a_2Z^{-2} + \cdots + a_nZ^{-n}, \\ B(Z^{-1}) &= b_0 + b_1Z^{-1} + b_2Z^{-2} + \cdots + b_mZ^{-m}, \\ C(Z^{-1}) &= c_0 + c_1Z^{-1} + c_2Z^{-2} + \cdots + c_kZ^{-k}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $A(Z^{-1})$ 、 $B(Z^{-1})$ 和 $C(Z^{-1})$ 均为已知多项式, 次数分别是 n 、 m 和 k 。 $X(Z^{-1})$ 和 $Y(Z^{-1})$ 为待求多项式。

假设需要调节的目标值为 y_r , $u(t)$ 为输入量, $y(t)$ 为输出量, $\theta(t)$ 为辨识参数矩阵, 则系统中提前 d 步的最优预测方程可表示为

$$y(t+d|t) = a_1y(t) + \cdots + a_ny(t-n+1) + b_0u(t) + b_1u(t-1) + \cdots + b_mu(t-m-d+1)。$$

已知 t 时刻及 t 时刻之前的输入和输出, 预测出 $t+d$ 时刻的输出。考虑到实际系统中的噪声, 用 $\varepsilon(t)$ 表示 t 时刻的噪声, 则可将上式改写成

$$\begin{aligned} y(t) &= b_0u(t-d) + \varphi(t-d)\theta(t-d) + \varepsilon(t), \\ \varphi(t) &= [y(t), y(t-1), \cdots, y(t-n+1), \\ &\quad u(t-1), \cdots, u(t-m-d+1)], \\ \theta(t) &= [a_1, a_2, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_{m+d-1}]. \end{aligned} \quad (2)$$

根据文献[1]和[3], 由递推辨识方法可以得到参数矩阵 $\theta(t)$

$$K(t) = \frac{\mathbf{P}(t-1)\varphi(t-d)}{\lambda + \varphi^T(t-d)\mathbf{P}(t-1)\varphi(t-d)}, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(t-1) - K(t)\varphi^T(t-d)\mathbf{P}(t-1)], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta(t-1) + K(t)[y_r - \beta_0u(t-d) - \\ &\quad \varphi^T(t-d)\theta(t-1)], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $K(t)$ 表示增益向量; $\mathbf{P}(t)$ 表示 $\theta(t)$ 协方差矩阵。隐式自校正算法就是在系统递推算法得到辨识参数 $\theta(t)$ 的基础上, 由辨识参数直接计算出同一采样周期内的控制量, 此控制量自适应律函数 $u(t)$ 为:

$$u(t) = \frac{1}{\beta} [y_r - \varphi^T(t)\theta^T(t)], \quad (6)$$

通过 $u(t)$ 控制系统, 以及系统辨识参数 $\theta(t)$ 的不断优化, 使输出信号方差最小。

1.2 锁相环数学模型

锁相环由数字鉴相器 (DPD)、自适应滤波器、数/模转换 (DAC) 器和恒温控制晶体振荡器 (OCXO) 组成。锁相环时钟模块根据时钟源状态检测器检测到的时钟源状态和配置, 同时根据训练定时器的状态来选取对应的模式。锁相环时钟模块的

内部构成如图 1 所示。

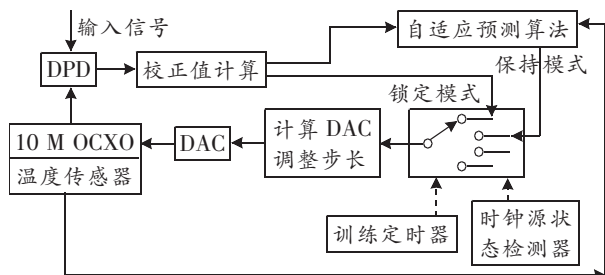


图 1 锁相环时钟模块内部构成示意图

锁相环中的关键算法由时钟源跟踪处理、温度补偿处理和老化补偿处理 3 部分组成。时钟源跟踪处理是为了使输出信号频率和相位与输入信号一致; 温度补偿、老化补偿处理部分主要是考虑到锁相环中 OCXO 受温度和时间老化的影响, 在锁定状态时, 将每次计算出来的校正值和查询的温度送给自适应预测算法模块进行训练, 建立一种自适应预测模块的模型, 在连续训练时间足够但时钟源异常时, 进入保持状态, 根据自适应预测模型算法、当前的温度值和 DPD 鉴相的结果预测出 OCXO 的调整值并进行调整。

锁相环中累积定时误差 (CTE) 表示输出信号与输入信号从开始时刻到测量时刻积累的时间误差。时钟源正常时, 假设 $CTE_0 = 0$, Cor_{ref} 表示之前 2 000 次的校正信号的平均值; CTE 是由 GPS 噪音和晶振器的频率不稳定造成的, 为了消除 GPS 接收机产生的 50 ns/s 的随机相位误差噪声, 在时钟源正常时, 引入 damp 因素。 k 时刻校正信号可表示为

$$C_k = Cor_{ref} - CTE_k / damp。 \quad (7)$$

锁相环中 OCXO 分别选用 1 ppb/day 和 4 ppb/75 °C 的晶振, 其中 1 ppb 表示十亿分之一。晶振器老化时间及温度会对频率稳定性产生影响, 由于 1 ppb/day 的晶振的老化速率对频率稳定性影响很小, 为了简化模型, 可以不考虑。本文主要考虑温度对频率稳定性的线性影响。在闭环情况下, k 时刻锁定状态时自适应预测模块中 CTE 可表示为

$$CTE_k = CTE_{k-1} + \Delta CTE_k。 \quad (8)$$

用 a 表示晶振频率稳定度的温度敏感度, $u(k)$ 表示 k 时刻温度传感器显示的温度, 实际过程中还需要考虑测量噪声, 设 $v(t)$ 表示 t 时刻的噪声, 用 $y(t)$ 表示 t 时刻校正信号。 k 时刻增加的噪声积累可表示为

$$\begin{aligned} \Delta CTE_k &= au(k-1) + v(k) - \\ &\quad bv(k-1) + y(k-1), \end{aligned} \quad (9)$$

故式(9)中 k 时刻的 CTE_k 可表示为

$$CTE_k = \sum_{t=0}^{k-1} au(t) + v(t+1) - bv(t) + y(t)。$$

(10)

根据文献[1]和[2], Cor_{ref} 中 N 值一般取 2 000, $damp$ 取 150。由以上公式整合可以得到 k 时刻的校正信号如下:

$$C_k = \frac{1}{2000} \sum_{t=k-2000}^{k-1} Y_t - \frac{1}{150} \sum_{t=0}^{k-1} [au(t) + v(t+1) - bv(t) + y(t)]。$$

(11)

2 模型设计与实现

结合上一节介绍的隐式自校正算法和锁相环的数学模型,将隐式自校正算法应用到锁相环的自适应预测模块中。参考文献[1]中锁相环中自适应预测模块的递推辨识算法,根据一段时间的输入输出值建立系统数学模型,辨识出系统参数。隐式自校正算法在每个采样周期内得到辨识参数后,还需要由参数辨识直接计算出控制信号。通过此控制信号不断优化辨识参数,使输出值变化的方差最小。根据上一节中锁相环的数学模型,用 $Y_c(k)$ 表示 k 时刻 CTE_k , 则式(10)可写为

$$Y_c(k) = \sum_{t=0}^{k-1} a * u(t) + v(t+1) - bv(t) + y(t)。$$

(12)

k 时刻的校正信号可由式(11)表示,经过变化得到:

$$Y_c(k) = -150C_k + \frac{150}{2000} \sum_{t=k-2000}^{k-1} Y_t。$$

为了使校正信号稳定,可以变化 $Y_c(k)$ 。对 $Y_c(k)$ 进行简化,设 $y(k) = Y_c(k) - Y_c(k-1)$, 则变形并简化式(11),得到

$$y(k) = au(k-1) + v(k) - bv(k-1) + y(k-1)，$$

(13)

该式与式(2)相似,可以用此模型。通过此模型可以得到辨识系统参数。本文中采用的隐式自校正算法并不辨识对象模型参数,而是根据输入输出数据和 GPC 并列预报器间的特点,直接辨识自校正控制函数,由此控制函数控制系统,使输出方差最小,节省很多工作量。在仿真时,参考文献[1], a 一般设成 0.053 3, b 设成 0.25。可搭建出系统仿真模型,其中,自校正调节器模块的相关参数可以设置如下: $m=0, n=1, d=2, y_r=0, \beta=1$, 遗忘因子设为 1, 系统的采样周期为 $T=0.1$ 。

3 MATLAB 仿真结果

我们使用 MATLAB 软件进行了仿真,自适应

预测模块中校正器的控制律和校正器辨识参数分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 可以看出,为了使输出信号具有最小方差,校正器在第 2 秒时产生了很强的控制信号,在 8 s 后输出信号和校正控制信号与估计参数都相对平稳。从图 3 可以看出,在第 2 秒时由于控制信号调节使校正后的输出信号降到最低,在 8 秒后输出信号变化相对稳定。

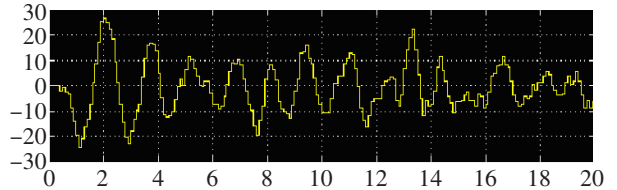


图 2 校正器产生的自校正控制序列

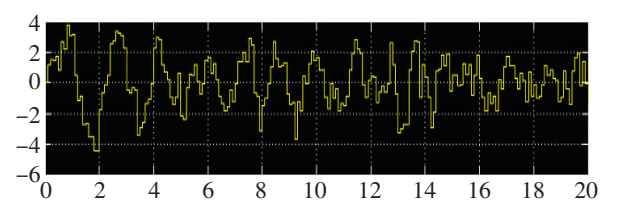


图 3 校正器产生的输出信号

图 4 所示为校正器参数辨识结果。

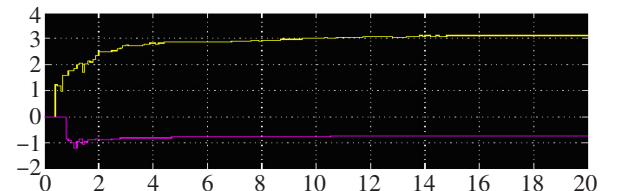


图 4 校正器参数辨识结果

由图 2~图 4 可以看出,在系统运行的初始阶段,系统的辨识参数变化较大,输出变动也较大,图 2 和图 3 中的控制信号校正序列变化也很大。随着控制信号控制系统,系统逐渐稳定,不断优化系统辨识参数,调节控制信号,使输出趋近调节目标值。

4 结束语

本文在系统递推辨识算法的基础上提出了一种广义隐式自校正控制算法。MATLAB 软件仿真表明,隐式自校正控制器不仅可以很好地跟踪设定值的变化,对系统参数进行估算优化,使系统模型参数变化有很好的自适应能力,还能够实时地通过控制信号改变输出信号,使输出信号的方差最小。相对于显示算法,隐式算法省去了 Diophantine 方程的递推求解,大大减少了计算量,提高了控制器的实时性。