

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0027-03

消除光纤陀螺非线性误差的自适应模糊神经网络系统建模算法

刘 宇^{1,2} 孙燕斌¹ 路永乐¹ 李东福¹ 黎蕾蕾² 潘英俊²

(¹ 重庆邮电大学光电工程学院光纤通信重点实验室, 重庆 400065)
(² 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 光纤陀螺的静态零位漂移是影响系统测量精度的主要因素,零位漂移的大小主要与开机时间和运行温度有关。分析了开环光纤陀螺(O-FOG)的温度和非线性特性,利用自适应模糊神经网络系统(AFNIS),以时间、温度和输入角速率为参量建立了 O-FOG 的零漂和刻度因子非线性误差混合模型。通过训练可以使该模型具有较高的精度。实验结果表明,补偿后的 O-FOG 克服了零漂和刻度因子的非线性对其测量精度的影响,使其在全温范围内的测量精度得到了较大提高,证明了该方法的可行性。

关键词 光学器件;光纤陀螺;非线性;自适应模糊神经网络;零漂;刻度因子

中图分类号 V241.5;TP273+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0027

Study of ANFIS Modeling Algorithm for Eliminating the Fiber Optic Gyro Nonlinear Error

Liu Yu^{1,2} Sun Yanbin¹ Lu Yongle¹ Li Dongfu¹ Li Leilei² Pan Yingjun²

¹ Key Laboratory for Optical Fiber Communications, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

² Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract The drift of zero output is the main fact to impact measurement precision of the system. The temperature and nonlinearity which effect the measurement precision the open-loop fiber optic gyro (O-FOG) are analyzed, and a novel model is presented to compensate errors caused by temperature and scale factor nonlinearity. The model is related with three factors: operate time, temperature and input angular rate. The precision can be improved by training. Experimental results show that it can eliminate effect of temperature drift and scale factor. The precision is improved in all temperature range, which shows the scheme's feasibility.

Key words optical devices; fiber optic gyro; nonlinear; adaptable fuzzy neural inference system; zero drift; scale factor

1 引言

开环光纤陀螺(O-FOG)具有结构坚固、可靠性高、启动时间短和耐冲击等特性,是非常理想的捷联惯性导航器件。由捷联惯性导航系统的理论可知惯性系统的工作精度在很大程度上取决于惯性元件的工作精度,惯性敏感元件的误差约占系统误差的90%。而对 O-FOG 来说,漂移率是衡量其精度的主要指标,其漂移率越小,精度越高。零漂本身是变化的,带有随机性,受外界环境影响,是重要的误差

项^[1]。另外,对于 O-FOG 刻度因子的非线性也是影响陀螺精度的一个重要因素。由于 O-FOG 的工作点随着输入角速度的不同而发生变化,所以刻度因子随不同输入也在发生变化,而且输入角速度越大非线性度就越大^[2],因此补偿刻度因子非线性引起的测量误差也是一个重要课题。

试制 O-FOG 的零位漂移和刻度因子变化是一个复杂的非线性变化过程,很难用精确的模型进行描述。它既与系统的运行时间有关,又与系统运行

基金项目: 重庆市科委自然科学基金(CSTG2007BB2448, 4385, 4391), 重庆市教委科研项目(KJ080518, KJ060515)和重庆邮电大学博士启动基金(A2007-45)资助课题。

作者简介: 刘 宇(1972—),男,副教授,主要从事光纤传感与惯性技术等方面的研究。E-mail: liuyu@cqupt.edu.cn

的环境温度有关,而且这两个参数是同时对 O-FOG 的零位输出信号和刻度因子产生作用。不同的系统工作时间点,即使系统运行温度相同,得到的陀螺零位输出和刻度因子结果也存在较大的偏差;同理,在不同系统运行温度下启动陀螺,其陀螺零位输出和刻度因子在同一运行时间点下也不同^[2]。这样在输入输出传输特性上就表现为多值对应关系。为利用 O-FOG 状态在多维空间中有唯一确定零位输出这一特点,本文采用自适应模糊神经网络(ANFIS)的建模方法对 O-FOG 的非线性误差进行补偿。

2 建立自适应模糊神经网络系统

自适应模糊神经网络系统(ANFIS)具有对任意非线性映射的任意逼近能力,与传统的线性辨识方法不同,不受非线性模型的限制,能基于数据建模,无须专家经验,自动产生模糊规则和调整隶属度函数^[3]。它利用神经网络自学习、自适应能力来模拟 O-FOG 非线性误差模型输入与输出之间的关系,通过训练得到 O-FOG 非线性误差模型。

系统选用 6 层前向网络^[4]用以实现模糊推理和学习。6 层分别包括输入层、前提隶属函数层、前提层、结论层和清晰化层、输出层。在建立的 ANFIS 系统中, X, Y 分别代表温度和 O-FOG 的输入角速率, Z 代表系统的零位输出。首先将这两个因子进行规范化,并确定其模糊子集的划分和隶属函数。为不失一般性,将两个因子的模糊集划分为 $\{NL, NM, NS, PS, PM, PL\}$, 分别表示负大、负中、负小、正小、正中、正大。每个输入变量都有 6 个输入单元与其 6 个模糊子集相对应,由此,可以得到每个输入信号格式为: $[\mu_{NL}(x), \mu_{NM}(x), \mu_{NS}(x), \mu_{PL}(y), \mu_{PM}(y), \mu_{PS}(y)]$ 。而每一输出单元对应着输出变量空间中的一个变化值,因此输出的模糊子集 Z 就可量化空间上的隶属函数来表示。其输出信号格式为: $[\mu_z(c_1), \mu_z(c_2), \dots, \mu_z(c_{35}), \mu_z(c_{36})]$ 。它们的隶属函数均取高斯型,且有 $\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{b}\right]$, 各隶属函数的曲线如图 1(a)所示,由此,可得到 36 条模糊规则

R^1 : If x is NL , y is NL , Then

$$z^1 = P_0^1 + P_1^1 x + P_2^1 y.$$

\vdots

R^{36} : If x is PL , y is PL , Then

$$z^{36} = P_0^{36} + P_1^{36} x + P_2^{36} y.$$

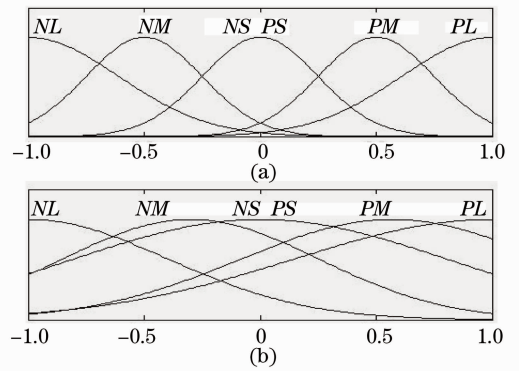


图 1 学习前(a)后(b)角速率的隶属函数

Fig. 1 Membership function of angular rate before study (a), after study (b)

将模糊规则和隶属函数用神经网络表示出来(导入),生成的神经网络用于实现模糊推理,然后利用修改的反传算法训练神经网络提高系统精度^[5]。经过训练后的网络能够对输入训练数据准确地做出响应。在实际应用中通过学习不断修改隶属函数和模糊规则,学习的目标是使误差函数 $E = (t-o)^2/2$ 最小,其中 t 是目标输出, o 是实际输出。当 $R_{MS} = \sqrt{\sum (t_p - o_p)/n_p}$ 小于某个定义误差值时,学习成功结束,否则转向第一层重新开始。

表 1 O-FOG 输入输出数据表

Table 1 Input-output data of O-FOG

Sampling time /s	Temperature /°C	Anguler rate /[(°) /s]	Output /[(°) /s]
0	20.55	38.6839	39.5906
20	21.03	37.6859	39.9941
40	20.56	38.6894	39.9914
60	20.96	38.6858	39.9903
80	21.22	39.6885	39.9928
100	20.99	39.6773	39.9900
120	20.65	38.6969	39.9812
140	20.54	37.6788	39.9906
160	20.47	39.6916	40.0014
180	21.01	38.6919	39.9826
200	21.32	37.6808	39.9964
220	21.06	38.6837	39.8965
240	20.93	39.6786	39.9924
260	20.82	38.6911	39.9890
280	20.64	38.6887	39.7843
300	20.74	38.6931	39.9880
320	20.98	38.6858	39.8967
340	20.82	38.6901	39.9930
360	20.59	38.6930	39.9820

表 1 给出的 20 组数据训练该系统,经过 1000 次学习后,网络基本收敛,训练结束。根据训练结果

修改隶属函数,求精模糊规则,最后从神经网络中提取隶属函数和模糊规则(导出),并将这些规则和隶属函数存入知识库中备用^[6]。根据模糊预测算法,得到补偿后的陀螺零位输出值为 $Z = \sum_{i=1}^{36} \omega^i z^i / (\sum_{i=1}^{36} \omega^i)$ 。训练结果发现,各语言值的隶属函数均产生修正。图 1(b)给出了有关角速率各隶属函数的修改结果,修正后的隶属函数的标准偏差

b_j 均有所增加,隶属函数变得平坦。经分析发现,修正后的隶属函数的分布与给定的样本数据的分布趋于一致,所以,比人为的划分更为合理。

根据训练得到的模糊预测模型,对 0~120 s 的零位输出电压进行检验,结果如图 2 所示。从图中可以看到,经过 ANFIS 模型补偿后的零位输出电压与理论计算值更为接近。

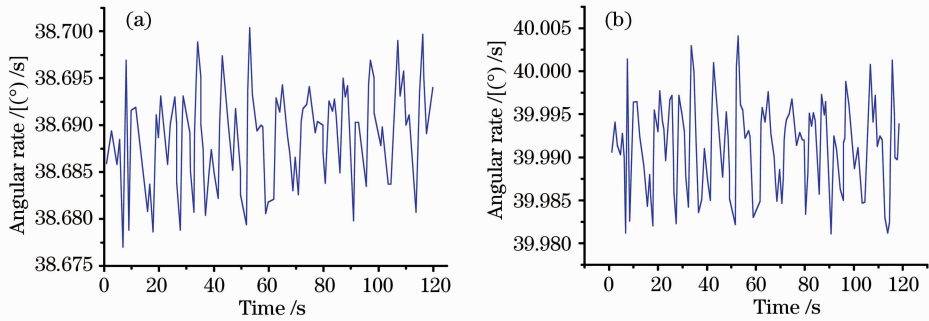


图 2 (a)未补偿的陀螺测量值;(b)采用 ANFIS 模型补偿的陀螺测量值

Fig. 2 (a) Uncompensated gyro measurement values; (b) compensated gyro measurement values by using ANFIS model

3 结 论

采用三轴转台速率实验,使用 ANFIS 对 O-FOG 的非线性误差进行建模处理,实验结果表明,使用 ANFIS 对 O-FOG 非线性误差补偿建立模型,并通过训练可以使该模型具有较高的精度。该模型可以较好地补偿 O-FOG 由于零漂和刻度因子非线性带来的测量误差,且补偿效果良好。该模型唯一的不足是由于采用神经网络补偿方法系统在线运算量要明显大于应用线性拟合等其他补偿措施时系统的在线运算量。由于 CPU 运算速度的飞速发展,运算量大造成系统缓慢的问题变得很容易解决,本文建议采用 TI 公司的 DSPTMS320VC33,将训练好的权值 W 和偏置值 b 写入存储器后,可以大大提高单次补偿运算所需的时间,对捷联惯性导航系统的解算不会造成影响。

参 考 文 献

1 R. Carrou, C. D. Coccou, D. Cardarelli *et al.*. The Passive resonator fiber optic gyro and comparison to the interferometer fiber gyro[C]. *SPIE*, 1986, **719**: 169~177

2 Liu Guifu. In-out Characteristic Modeling and Compensation Technology Investigation on Optic Gyroscope [D]. *Harbin: Harbin Engineering University*, 2002
柳贵福. 光学陀螺输入输出特性建模及补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002

3 Wang Xingshu, Huang Zongsheng, Zhou Pu *et al.*. Comparative study on digital filtering on the random drift of laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1547~1551
王省书, 黄宗升, 周朴等. 激光陀螺随机漂移的数字滤波方法比较[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1547~1551

4 Kung ChungChun, Li ChihChien. A new cluster validity criterion for fuzzy c-regression model and its application to T-S fuzzy model identification[C]. *Proc. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2004, 1673~1678

5 Zhang Shunxia, Yan Wei. The modeling and filtering of laser gyro drift data[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 1999, **7**(4): 70~72
张树侠, 闫威. 激光陀螺漂移的数据建模和滤波[J]. *中国惯性技术学报*, 1999, **7**(4): 70~72

6 Walid Abdel-Hamid, Aboelmagd Noureldin, Naser El-Sheimy. Adaptive fuzzy prediction of low-cost inertial-based positioning errors. [J]. *IEEE Fuzzy Sys.*, 2007, **15**(3): 104~132