

RBF神经网络在单轴旋转惯导系统轴向陀螺漂移辨识中的应用*

于旭东¹, 魏学通², 李莹², 龙兴武¹

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073;
2. 中国人民解放军 92941 部队 95 分队, 辽宁葫芦岛 125000)

摘要: 在激光陀螺单轴旋转惯性导航系统中, 单轴旋转可以自动补偿垂直于旋转轴上的惯性器件误差, 却不能消除旋转轴方向上惯性器件的误差, 因此单轴旋转惯性导航系统的导航精度主要由轴向陀螺漂移决定。提出了一种基于径向基函数神经网络的轴向陀螺漂移辨识方法, 利用系统纬度误差和温度变化量作为训练集, 针对系统热态、冷态两种情况对 RBF 神经网络进行训练, 对轴向陀螺漂移的辨识精度达到 $0.0003^\circ/\text{h}$ 。试验结果表明: 该方法能够有效地辨识轴向陀螺漂移, 使系统达到较高的导航精度, 满足实际应用的需

关键词: 激光陀螺; 惯导系统; 单轴旋转; 陀螺漂移; RBF 神经网络

中图分类号: U666.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)03-0048-05

Application of Radial Basis Function Network for Identification of Axial RLG Drifts in Single-axis Rotation Inertial Navigation System

YU Xudong¹, WEI Xuotong², LI Ying², LONG Xingwu¹

(1. College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Element 95 Unit 92941 of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: In the single-axis rotation inertial navigation system with ring laser gyroscope (RLG), the single-axis rotation can compensate the vertical errors of the inertial apparatus automatically, but cannot compensate the axial vertical errors, so the precision of the system is determined by the drift of the axial RLG. A novel identification method based on radial basis function network is proposed for the axial RLG drift. The inputs of the network are the latitude error and change of the temperature, and the network is trained for steady and non-steady state, in which the identification capability is less than $0.0003^\circ/\text{h}$. The experiments show that this method can estimate the axial RLG drift efficaciously, and the result of the navigation is excellent and can meet the practical demand.

Key words: ring laser gyroscope; inertial navigation system; single-axis rotation; gyro drift; RBF neural networks

激光陀螺惯性导航系统能够自主地提供载体的位置、速度和姿态等信息, 是舰船安全航行的保障, 也是舰载武器系统发射的姿态基准^[1-2]。随着对惯性导航精度要求的不断提高, 单纯地提高惯性器件(特别是陀螺)的精度很难满足使用要求, 因此必须采用系统补偿(如旋转调制方案)等关键技术^[3]。西方军事强国早在 20 世纪 80 年代初期就开始对激光陀螺应用于长时间惯性导航技术进行了研究^[4-5], 现已逐步取代气浮陀螺惯导系统(AN/WSN-3)、液浮陀螺惯导系统(AN/WSN-5)和静电陀螺惯导系统(ESGN), 广泛装备多种舰只和潜艇^[6]。AN/WSN-7 系列激光陀螺惯导系统已经成为美国海军水面舰船和潜艇的标准设备, 已装备除三叉戟核潜艇以外的所有美海军舰艇^[7]。随着我国军事装备的日益现代化, 对高

精度惯性导航系统的需求也越来越迫切, 因此研制高精度的惯性导航系统具有十分迫切的现实需要。

目前, 旋转惯导系统的旋转方案主要有单轴旋转和双轴旋转两种方式^[8-9]。从原理上讲, 单轴旋转可以消除垂直于旋转轴方向上的惯性器件误差, 但不能消除旋转轴上的惯性器件误差, 特别是轴向陀螺漂移, 因此单轴旋转惯导系统的精度主要由轴向陀螺漂移决定^[10]。由于轴向陀螺的可观测性很低, 单轴旋转惯导系统初始对准时间一般采用 16h, 其中 4h 用于完成初始对准和水平惯性器件漂移的测定, 12h 用于精确辨识轴向陀螺漂移。

仿真表明: 单轴旋转惯导系统若要取得 $1\text{nm}/72\text{h}$ 的定位精度, 需要轴向陀螺的辨识精度

* 收稿日期: 2011-09-20

作者简介: 于旭东(1982—), 男, 吉林长春人, 讲师, 博士, E-mail: wind0909@163.com

优于 $0.0005^\circ/\text{h}$ 。文献[11]提出了一种基于姿态解算的轴向陀螺漂移的估计方法,单轴旋转惯导系统的定位精度达到 $1\text{nm}/24\text{h}$ 。本文提出了一种新颖的基于 RBF 神经网络的轴向陀螺漂移辨识方法,以系统纬度误差和温度变化量作为训练集,以系统定位误差最小为目标函数,针对系统热态、冷态两种情况对 RBF 神经网络进行训练,精确辨识轴向陀螺漂移,提高系统导航精度。

1 RBF 神经网络

在神经网络中,常用反向传播 BP 网络来实现辨识功能,但 BP 网络存在局部最优问题,且训练速度慢、效率低,而 RBF 神经网络则在一定程度上克服了这些问题,它用局部逼近的总和达到对训练数据的全局逼近,可实现全局最优^[1213]。此外,RBF 网络是一种特殊的两层网络,其参数由于 RBF 中心的固定而得以线性化,因此隐层充当了无调节参数的固定的非线性转化环节,它将输入空间映射到一个新空间,唯一的调节参数是线性叠加权值,这些参数可以采用线性最小方差 (LS) 得到,这就是 RBF 网络的优势所在。基于以上原因,本文选择 RBF 网络对轴向陀螺常值漂移进行辨识。

具有 n 个输入和一个输出的 RBF 网络结构实现了 $f_r: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 的映射:

$$f_r(x) = \omega_0 + \sum_{i=1}^m w_i \Phi(\|x - c_i\|) \quad (1)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为输入量; $\Phi(\cdot)$ 为非线性转化函数, $w_i (1 \leq i \leq m)$ 为加权值 (或参数), $c_i \in \mathbb{R}^n (1 \leq i \leq m)$ 为第 i 个隶属度函数的中心, m 为中心个数。

由图 1 可知,RBF 网络输入到隐单元的权值固定为 1,所以可以看作由含有径向基神经元的隐层和含有线性神经元的输出层两层组成。隐层中每一个神经元中心和局部感受域决定了 RBF 的位置和宽度,输出层神经元将隐层的 RBF 加权叠加,只要选择足够的隐层神经元、适当的中心、局部感受域和加权值,RBF 网络可以任意精度拟合任意函数。在 RBF 网络中假设非线性转化函数 $\Phi(\cdot)$ 和 c_i 是固定的,给定一组输入和相对应的期望输出,加权值 w_i 可通过 LS 法确定。 $\Phi(\cdot)$ 的选择对网络性能的影响并不大,本文采用的基函数为高斯函数,描述为

$$\Phi(u) = \exp\left(-\frac{u^2}{\delta^2}\right) \quad (2)$$

其中 δ 为实常数,它决定了该隶属函数围绕中心

点的宽度。 $\Phi(\cdot)$ 具有局部感受的特点,即只在中心周围的一部分区域内反应较强,体现了大脑皮质层的反应特点。对网络性能影响较大的是中心 c_i 的选择,实际中心往往选择为数据的子集。

由于轴向陀螺漂移与惯导系统的输入输出存在非线性关系,采用传统的系统辨识方法很难对其进行精确的辨识,神经网络辨识不受非线性模型的限制。它依据被控系统的输入输出数据对通过学习得到一个描述系统输入输出关系的非线性映射。给定一个输入,即可得到一个输出,而不需要知道输入和输出之间存在着怎样的数学关系。

2 基于 RBF 神经网络的轴向陀螺漂移辨识

2.1 辨识时间和输入样本的确定

系统输出的经纬度误差最容易观测,因此考虑通过系统的经纬度误差信息辨识轴向陀螺漂移。图 1 给出了不同导航实验中经过 4h 初始对准和水平方向惯性器件漂移测定后 12h 内系统输出的经纬度误差曲线,从图中可以看出,在导航 12h 时,纬度误差输出为正时,经度误差时正时负,因此若采用经度误差作为观测量时,可能导致辨识的轴向陀螺漂移出现奇异解,因此只选用纬度误差作为观测量来估算轴向陀螺漂移。

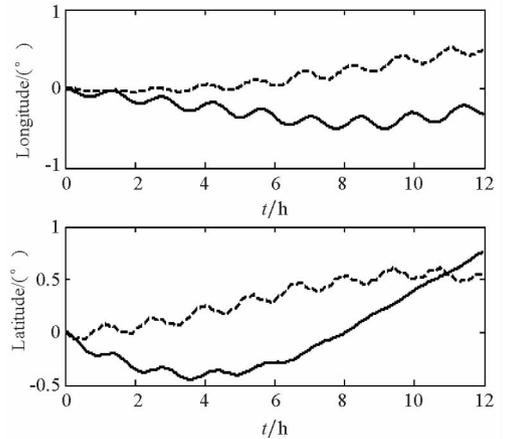


图 1 不同导航实验 12h 系统输出经纬度误差曲线
Fig. 1 Longitude and latitude error in 12 hours between different navigation tests

在静基座下,对纬度误差产生影响的主要是轴向陀螺漂移、初始对准误差、加速度计漂移等,且按照正余弦规律在系统中传播,具体形式如表 1 所示^[14]。其中 ε 为轴向陀螺漂移, ∇_N 为北向加速度计漂移, φ_U 为初始方位误差角, δV_N 为初始速度误差, ω_{ie} 为地球自转周期,周期振荡时间为 24h , ω_s 为舒拉周期,周期为 84.4min , L 为当地纬度, R 为地球半径。

表 1 各误差源对纬度误差的影响情况

Tab. 1 Several error sources influence to latitude error

误差源	传播形式	误差源	传播形式
轴向陀螺漂移	$\left[-\frac{\cos L}{\omega_{ie}} + \frac{\cos L}{\omega_{ie}} \cdot \cos(\omega_{ie}t) \right] \cdot \varepsilon$	北向加速度计漂移	$\frac{\nabla_N}{R(\omega_e^2 - \omega_s^2)} [\cos(\omega_s t) - \cos(\omega_e t)]$
初始方位误差角	$-\varphi_U [\cos L \cdot \sin(\omega_{ie}t) + \frac{\omega_{ie}}{\omega_s} \cos L \cdot \sin(\omega_s t)]$	初始北向速度误差	$\frac{\delta V_N \cdot \sin(\omega_s t)}{R \cos L \cdot g}$

从表 1 中可以看出,初始方位误差角和初始北向速度误差对纬度的影响规律为正弦函数,陀螺和加速度计漂移对纬度的影响规律为余弦函数。经过 12h 导航,对纬度的影响为正弦函数的项变为零,故不用考虑初始方位误差角和初始北向速度误差的影响。而加速度计漂移经过 4h 初始对准后可以精确测定,对纬度误差的影响很小。故可以认为经过 4h 初始对准 12h 导航后产生的误差主要是由于轴向陀螺漂移引起,所以选择 12h 后的纬度误差对轴向陀螺漂移进行辨识。从图 1 中可以看出,系统的纬度误差是一个非线性函数,因此我们考虑采用 RBF 神经网络对轴向陀螺漂移进行辨识。

具体方法为:单轴旋转惯性导航系统经过 4h 的初始对准后,精确地估计出水平陀螺的漂移和加速度计零偏后对其进行修正,然后转入导航状态,经过 12h 导航后,观测系统的纬度变化量,采用 RBF 神经网络进行精确辨识,扣除掉轴向陀螺漂移后再次转入导航状态,进行系统导航解算。

2.2 热态下轴向陀螺常值漂移辨识

系统热态主要是指在对准过程中系统温度变化较小,一般要求温度变化量小于 3℃,系统处于相对稳定的状态。RBF 神经网络系统的输入是惯导系统 12h 输出的纬度误差,RBF 神经网络系统的输出是轴向陀螺漂移。经过单轴旋转后,系统的主要误差源为轴向陀螺漂移,因此轴向陀螺漂移真值的确定方法为:首先不修正轴向陀螺漂移,进行导航实验,实验结束后逐步调整轴向陀螺漂移的计算值,在 72h 内使得定位误差达到最小,以此作为轴向陀螺漂移的真值。为了达到 1nm/72h 的定位精度,需要对轴向陀螺漂移的辨识精度优于 0.0005°/h,为了提高网络训练的精度,将训练误差设置为 0.0003°/h,径向基函数的分布密度 SPREAD 设置为 2,网络训练样本如表 2 所示,当地纬度为 28.222°,训练过程如图 2 所示,当达到一定训练次数后,训练误差变化非常缓慢,趋于收敛。

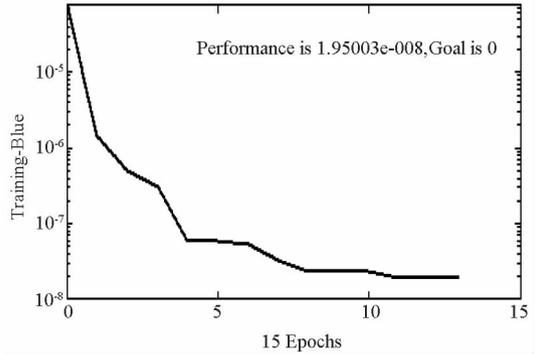


图 2 RBF 神经网络训练过程

Fig. 2 Training curve of the RBF neural network

将一组没有参加网络训练的实验数据作为检验样本,利用训练后的网络进行仿真,计算出网络输出值与实验数据之间的偏差,用以评价网络的逼近精度和泛化能力。表 3 给出了 3 组检验样本经过 RBF 神经网络训练后的结果,图 3 给出了表 3 中第一组辨识前后的定位误差曲线。通过对比可以看出,轴向陀螺漂移辨识误差优于 0.0003°/h,辨识后系统的定位精度大大提高。

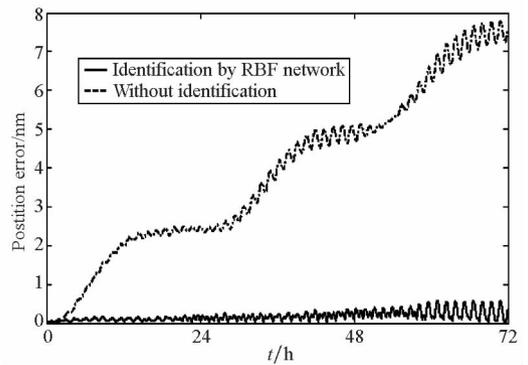


图 3 RBF 神经网络系统辨识前后系统定位误差

Fig. 3 The position error comparison by RBF neural network

2.3 冷态下轴向陀螺常值漂移辨识

系统冷态是指系统启动时完全冷却,启动后温度上升快,温度变化量大,一般大于 10℃。当系统冷态启动进行导航实验时,我们发现,冷态启动相对于热态启动的结果稍差,主要原因是在对准过程中温度发生了较大的变化,轴向陀螺漂移随着温度的变化而改变,在对准结束时利用热态

的 RBF 神经网络系统辨识的轴向陀螺漂移不准确。针对这种情况,设计实验如下:系统冷态启动 16h 对准,要求对准过程中温度变化较大,且温度逐步提升(避免温度出现拐点这种特殊情况,一般情况下,系统温度都是逐步提升的,因此具有一定的普适性),并且在导航过程中温度变化不大,这样可以分离出在对准过程中系统环境温度变化引起的系统导航误差。

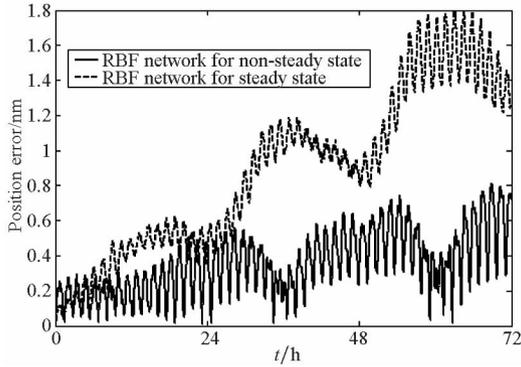


图4 不同 RBF 神经网络系统辨识后系统定位误差
Fig.4 The position error by the different RBF neural networks

冷态下轴向陀螺漂移真值的确定方法与热态下轴向陀螺漂移真值的确定方法一致。轴向陀螺漂移经过多温度点补偿后^[15],利用热态 RBF 神经网络进行辨识,结果如表 4 所示,辨识后其导航

定位误差一般为 0.8nm ~ 2.5nm,轴向陀螺漂移误差在 0.0005°/h ~ 0.0015°/h 量级,辨识误差较大。这种轴向陀螺漂移很难通过温度补偿进行消除,因此需要对系统冷态启动时重新建立网络模型,网络输入为系统 12h 输出的纬度误差、温度和温度变化量,输出为轴向陀螺漂移。网络训练样本如表 4 所示,表 5 给出了冷态情况和热态情况下 3 组检验样本经过 RBF 神经网络训练后的结果,图 4 给出了表 5 中第一组实验中系统冷态启动采用不同神经网络辨识的定位误差曲线。可以看出,综合考虑对准时间内温度和温度变化量后,辨识后系统的定位精度大大提高。因此单轴旋转惯导系统中轴向陀螺辨识时要根据系统的状态,选择不同的神经网络系统,对其进行精确辨识。

3 结论

RBF 人工神经网络能够实现对复杂非线性映射关系的高度逼近,为单轴旋转惯导系统轴向陀螺的辨识提供了一种有效的方法。本文针对惯导系统热态、冷态两种情况,以系统纬度误差、温度及温度变化量为输入,对轴向陀螺漂移进行了精确辨识,RBF 神经网络辨识精度优于 0.0003°/h,极大地提高了系统的导航精度,具有很高的实用价值。

表 2 热态下 RBF 神经网络训练样本

Tab.2 Sample of the RBF neural network for steady state

纬度(°)	温度范围(°C)	陀螺漂移(°/h)	纬度(°)	温度范围(°C)	陀螺漂移(°/h)
28.2274	37 ~ 39	0.0007	28.2032	60 ~ 61	-0.00253
28.2238	28 ~ 39	0.00022	28.1966	49 ~ 52	-0.00339
28.2162	55	-0.00076	28.1974	50	-0.00324
28.2184	45	-0.00064	28.2150	45 ~ 47	-0.00084
28.2251	35 ~ 36	0.00028	28.1971	42 ~ 43	-0.0033
28.2403	12 ~ 14	0.0024	28.2033	62	-0.0026
28.2474	48 ~ 49	0.0034	28.1982	59	-0.0031
28.2146	55	-0.00096	28.1978	42	-0.00301

表 3 RBF 神经网络系统辨识结果

Tab.3 Identification result of the RBF neural network

纬度(°)	温度范围(°C)	RBF 辨识的陀螺漂移(°/h)	陀螺漂移真值(°/h)	辨识误差(°/h)	辨识前定位误差(nm/72h)	辨识后定位误差(nm/72h)
28.1959	44 ~ 45	-0.00324	-0.0034	-0.00016	8	0.5
28.2250	43	0.0005	0.0003	-0.0002	1.4	0.6
28.2350	55 ~ 57	0.0020	0.0022	0.0002	4	0.6

表 4 冷态下 RBF 神经网络训练样本

Tab.4 Sample of the RBF neural network for non-steady state

训练编号	对准时间的温度变化(℃)	温差(℃)	校准时间的温度变化(℃)	温差(℃)	纬度(°)	陀螺漂移真值(°/h)	热态 RBF 辨识结果
1	12 ~ 35	23	25 ~ 35	10	28.2413	0.00165	0.0027
2	42 ~ 54	12	51 ~ 54	3	28.1988	-0.00343	-0.0031
3	42 ~ 62	20	53 ~ 62	9	28.2028	-0.00330	-0.0027
4	32 ~ 48	16	44 ~ 48	4	28.2472	0.00325	0.0031
5	29 ~ 38	9	35 ~ 38	3	28.2260	0.00013	0.0007
6	46 ~ 59	13	53 ~ 59	6	28.1980	-0.00345	-0.0031

表 5 不同 RBF 神经网络系统辨识结果对比

Tab.5 Identification result comparison of the different RBF neural networks

检验编号	对准时间温变(℃)	温差(℃)	校准时间温变(℃)	温差(℃)	热态 RBF 模型辨识的系统精度(nm/72h)	冷态 RBF 模型辨识的系统精度(nm/72h)
1	25 ~ 57	32	40 ~ 57	17	1.8	0.8
2	15 ~ 40	25	30 ~ 40	10	1.7	0.9
3	42 ~ 57	15	52 ~ 57	5	1.3	0.75

参考文献 (References)

[1] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. 2nd ed, United Kingdom: Institution of Electrical Engineers, 2004.

[2] Lawrence A. Modern inertial technology: navigation, guidance, and control [M]. New York: Springer-Verlag, Inc., 1998.

[3] 许国祯. 惯性技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995. XU Guozhen. Inertial technology handbook [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1995. (in Chinese)

[4] Levinson E, Giovanni C S. Laser gyro potential for long endurance marine navigation [C]// IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1980: 115 - 129.

[5] Levinson E, Majure R. Accuracy enhancement techniques applied to the marine ring laser inertial navigator (MARLIN)[J]. Navigation: Journal of The Institute of Navigation, 1987, 34(1): 64 - 86.

[6] Joint Staff. Master positioning, navigation, and timing plan [R]. Washington, D. C. 20318 - 0600 2003 CJCS, 2003.

[7] Dewall J, May M B, Carvil J, et al. Ship augmented gravity enhancement (SAGE) [C]// IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2006: 36 - 43.

[8] 于旭东. 二频机抖激光陀螺单轴旋转惯性导航系统若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011. YU Xudong. Research on some key technologies for single-axis rotation inertial navigation system with mechanically dithered ring laser gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[9] 袁保伦, 饶谷音. 光学陀螺旋转惯导系统原理探讨[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(6): 76 - 80. YUAN Baolun, RAO Guyin. On the theory of optical gyro rotating inertial navigation system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(6): 76 - 80. (in Chinese)

[10] 张伦东, 练军想, 胡小平. 载体角运动对旋转式惯导系统旋转调制效果的影响[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 152 - 156. ZHANG Lundong, LIAN Junxiang, HU Xiaoping. The effect of vehicle angle motion on rotation modulation technology for rotating INS [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 152 - 156. (in Chinese)

[11] 吴赛成, 秦石乔, 王省书, 等. 基于姿态解算的 z 向激光陀螺零偏估计方法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1209 - 1212. WU Saicheng, QIN Shiqiao, WANG Shengshu, et al. A new method for the estimate of z-direction ring laser gyro drift based on attitude determination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1209 - 1212. (in Chinese)

[12] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. XU Lina. Neural networks control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)

[13] 张泽旭. 神经网络控制与 MATLAB 仿真[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011. ZHANG Zhexu. Neural networks control and matlab simulation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011. (in Chinese)

[14] 李东明. 捷联式惯导系统初始对准方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006. LI Dongmin. Initial alignment method for strapdown inertial navigation system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)

[15] 张鹏飞, 王宇, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺多温度点实时温度补偿方法的研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 562 - 566. ZHANG Pengfei, WANG Yu, TANG Jianxun, et al. Research on methods for compensating temperature of mechanically dithered RLG [J]. ACTA Armamentar II, 2010, 31(5): 562 - 566. (in Chinese)