

文章编号:1001-2486(2011)01-0007-04

基于卫星导航数据在线拟合星光折射模型方法*

温永智,吴杰

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:基于星光折射的自主导航系统结构简单、成本低廉,理论上能够实现对飞行器的高精度导航。但由于测量模型受大气参数不确定性的影响,使得该导航方法的精度及可靠性严重降低。根据飞行器处于低轨道的卫星导航数据,通过神经网络在线拟合星光折射模型,避免了大气参数不确定性的影响,提高了星光折射导航精度。通过仿真重点研究了星光折射模型的特点、拟合方法,并对拟合模型的精度进行了分析。

关键词:自主导航;星光折射;神经网络;拟合

中图分类号:V249.32+3 **文献标识码:**A

Fitting Starlight Atmosphere Refraction Model on Line Using Satellite Navigation Data

WEN Yong-zhi, WU Jie

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The autonomous navigation system based on starlight atmosphere refraction has simple structure and low cost. Using the system, the spacecraft can get high-precision navigation data. But the measurement model has some imprecise atmospheric parameter, which reduces the navigation precision and reliability seriously. The above effects can be avoided by nervous network fitting starlight atmosphere refraction model on line, using satellite navigation data, when the spacecraft is at low orbit. This method can improve the navigation precision based on starlight refraction. Through simulation, the characteristics of the starlight refraction model and the fitting method were researched, and the precision analysis of the fitting models were also made.

Key words: autonomous navigation; starlight refraction; nervous network; fitting

基于星光折射的自主导航方法在国内外已有较深入的研究^[1-3]。使用该导航方法时,首先需要建立恒星星光折射视高度和折射角之间的精确数学模型,然后建立视高度、折射角和飞行器位置之间联系,即观测方程,最后利用观测方程基于非线性滤波^[4]或最小二乘微分校正法^[5]求解飞行器的位置。在星敏传感器精度较高时,大气折射模型误差成为制约导航精度提高的主要因素,而我国对全球大气的测量数据及其影响规律的研究尚不完善。因此有学者根据大气数据、大气模型等先验知识深入研究了星光在大气中的折射模型并给出了经验公式^[5-6]。但建立经验公式时没有考虑地球扁率的影响,结果也没得到实际应用的检验,因而给基于星光折射的自主导航方法的可行性及其精度评估带来了很大的不确定性。

考虑到飞行器处于低轨道(高度 < 3000km)时,使用 GNSS 卫星可以获得高精度的导航数据

(米量级),而且技术相对成熟可靠。因此本文研究了使用 GNSS 卫星测量数据和径向基神经网络在线拟合星光折射模型的方法。

1 星光折射模型

星光折射和大气的光学特性紧密相关。当星光通过地球大气时,由于大气密度不均匀,光线会发生折射弯向地心方向。从轨道上看,当恒星的真实位置已经下沉时,其视位置还保持在地平之上,星光折射示意图如图 1 所示。

图中 h_a 称为视高度, R 为折射角,同时观测两颗未折射恒星和若干颗折射恒星,通过测出折射后的恒星与未折射恒星之间的角距变化量,可求解出折射角。根据大气折射模型可以建立 h_a 和 R 之间的关系。通过两者之间的关系可以得出,当星光穿越较低的大气层时,折射角较大。因而应尽可能选择折射高度比较低的恒星,这样可

* 收稿日期:2010-07-23

基金项目:国家 863 高技术计划项目(51309060302)

作者简介:温永智(1983—),男,博士生。

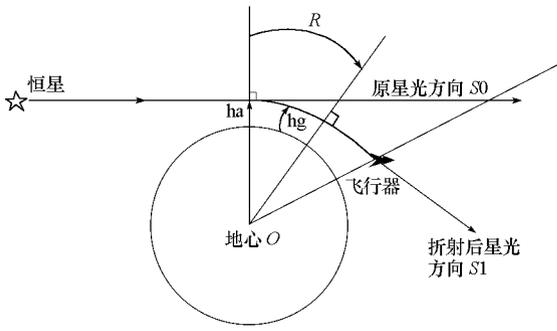


图1 星光折射几何关系

Fig.1 Starlight refraction geometrical relation

以敏感比较大的折射角而且相对误差较小。但折射高度也不能选得太低,过低的星光会穿过大气对流层。对流层会产生各种剧烈的气象现象,使星光折射方向具有很大的不确定性。因此,在星光折射法自主导航方案中,一般选择折射高度在20~50km的恒星进行测量。

文献[1]研究表明,星光折射角 R 与大气密度之间存在较精确的函数关系,而大气密度随高度的变化也有较准确的模型,从而可以精确地确定出折射星光在大气中的折射高度 h_g 。折射高度 h_g 与视高度 h_a 之间存在一定关系, h_a 又和飞行器的位置有一定的几何关系。从而可建立折射角 R 与飞行器位置之间的关系式。视高度 h_a 与折射角 R 之间的数学关系:

$$h_a = h_0 - H \ln(R) + H \ln \left[k(\lambda) \rho_0 \left(\frac{2\pi R_e}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + R \left(\frac{HR_e}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, R_e 为地球平均半径; $k(\lambda)$ 为与光波波长有关的散射系数; h_0 为参考高度; ρ_0 为高度 h_0 处的密度; H 为密度标尺高度。

另外,从图1的几何关系中还可以看出

$$h_a = \sqrt{r_s^2 - u^2} + u \tan(R) - R_e - a \quad (2)$$

式中 $u = |\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{s}|$, \mathbf{r}_s 为航天器的位置矢量, \mathbf{s} 为未折射前星光的方向矢量, $a = (1 - \cos R) / \cos R \cdot (R_e + h_a)$, 为一个非常小的量,通常可以忽略。

式(1)和(2)联立构成了基于星光折射的导航观测模型。使用过程中通常将视高度 h_a 作为间接观测量。由式(1)可知根据折射角 R 计算视高度时,受到和大气模型有关的参数 h_0 、 ρ_0 和 H 的影响。当大气模型与实际大气数据不符时,计算出的视高度误差就很大,其影响甚至超过了星敏器精度的影响,导致基于星光折射的导航精度受到制约。评价 h_a 受大气密度和折射角测量误

差共同影响的简化模型可表示为:

$$dh_a = H \cdot \frac{d\rho_0}{\rho_0} - H \cdot \frac{dR}{R} + \sqrt{\frac{HR_e}{2\pi}} \cdot dR \quad (3)$$

从而可得 h_a 的均方差

$$\sigma(h_a) = \sqrt{\left(\frac{H}{\rho_0}\right)^2 \cdot \sigma(\rho_0)^2 + \left(-\frac{H}{R} + \sqrt{\frac{HR_e}{2\pi}}\right)^2 \cdot \sigma(R)^2}$$

当不考虑大气密度误差影响时, $\sigma(h_a)$ 为:

$$\sigma(h_a) = \left(-\frac{H}{R} + \sqrt{\frac{HR_e}{2\pi}}\right) \cdot \sigma(R) \quad (4)$$

$\sigma(h_a)$ 不但和 $\sigma(R)$ 有关,还随折射角 R 的大小变化,其均方根误差表示为:

$$\sigma_{\sigma(h_a)} = \frac{H}{R^2} \cdot \sigma(R)^2 \quad (5)$$

2 神经网络拟合方法

飞行器一般带有卫星信号接收机,当飞行器处于在低轨段时(轨道高度 < 3000km),卫星导航精度较高,基于伪距的单点定位精度可达米级。因而考虑利用卫星导航数据根据式(2)拟合式(1)和式(3),从而实现高精度自主导航。由于 h_a 与 R 之间具有很强的非线性关系,选择径向基函数 RBF 神经网络(简称径向基网络)拟合数据。

径向基网络是由 Moody 和 Darken 于 20 世纪 80 年代末提出的一种神经网络结构,可以以任意精度逼近任意连续函数。相对于 BP 神经网络具有训练速度较快,预报精度较高。径向基神经网络是由输入层、隐含层和输出层构成的三层前向网络。其中隐含层神经元输入与输出如图 2 所示^[7]。

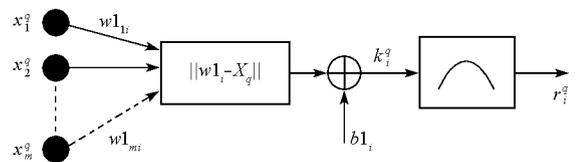


图2 RBF网络隐含层神经元的输入与输出

Fig.2 The relation between input and output of RBF network implication layer neurons

图2中 $x_k^q (k = 1, \dots, m)$ 表示第 q 个输入向量的第 k 个分量; w_{1ki} 表示输入向量(第1层)的第 k 个分量与第 i 个隐含层神经元之间的连接权重。阈值 b_{1i} 可以调节函数的灵敏度,但在使用过程中通常通过对扩展常数 C 的调整实现输出对输入的不同响应。设 $b_{1i} = 0.8326/C_i$, 则隐含层神经元的输出可表示为:

$$r_i^q = \exp\left(-0.8326^2 \times \left(\frac{\|w1_i - X^q\|}{C_i}\right)^2\right)$$

参数 C 的大小影响输出输入的响应宽度。 C 值越大,响应范围越大,神经元之间的平滑度也越好; C 值越小,函数越能反映输入与输出之间的细节。

Matlab7.0 自带的工具箱函数 $\text{net} = \text{newrbf}(P, T, C)$, 为 RBF 网络的建立和训练提供了一条途径,函数中 P 为训练样本输入值, T 为训练样本输出值, C 为扩展常数。

网络训练样本和测试样本的获得:根据式(2)以 GNSS 的导航结果作为飞行器的位置 r_s , 将测量值 R 代入获得 h_a 的计算值。以 R 为输入,对应的 h_a 作为目标值,将输入值和目标值归一化后,构成一对训练样本。为了获得高精度的导航结果,还需拟合 h_a 的均方差 $\sigma(h_a)$ 和 R 的关系。以式(2)计算出的 h_a 和网络仿真出的 h_a 之差的绝对值 Eh_a 的 1.37 倍(误差的绝对值换算为均方差时需扩大的倍数)作为目标值,将 R 和目标值归一化后,获得关于 h_a 的均方根误差 $\sigma(h_a)$ 与 R 映射关系的一对训练样本。当飞行器在低轨段飞行时可采集大量的训练样本,通过径向基网络获得折射角 R 到 h_a 和 h_a 均方根误差 $\sigma(h_a)$ 之间的映射。

3 拟合精度分析

3.1 仿真基本条件

以《1976 年美国标准大气》提供的数据作为标准,通过计算机仿真分析神经网络拟合参数的选择,在此基础上对比分析有大气密度误差的情况下传统模型和神经网络模型的精度。

仿真中,飞行器在轨道高度为 3007.63km 的近圆轨道上飞行,飞行时间为 1000s。考虑到视高度越高,视高度的计算值受星传感器精度影响就越大,拟合精度就越差,因此飞行过程中观测视高度在 20 ~ 40km 的星光数据进行拟合,获得 1428 对采样数据。

GNSS 卫星考虑 GPS、GLONASS、Galileo 和 COMPASS 组合星座,导航数据为 GNSS 和飞行器动力学方程采用紧组合方式融合后的结果。GNSS 卫星采用伪距和伪距变率作为测量信息,测量方程中考虑星历误差、卫星钟差残差、接收机噪声,数据频率为 1Hz。状态方程中将 J_2 项以外的引力摄动项及太阳光压作为过程噪声。其中卫星星历误差和卫星钟差残差是影响导航精度的主要

系统性误差。最终的导航精度为米量级,为神经网络提供拟合数据。

星传感器测量精度: $1''$; 视场: $20^\circ \times 20^\circ$; 观测周期: 3s。

恒星星图依据第五星表(Fundamental Katalog 5, FK5)进行模拟,可观测星等为 8 等。在飞行过程中星传感器光轴方向指向地球边缘,如图 3 和图 4 所示。当视场中没有观测到折射星时,以每个观测周期扫描 $1/6$ 圆周的速度寻星;当视场中有折射星时,一直跟踪其中一颗折射星。

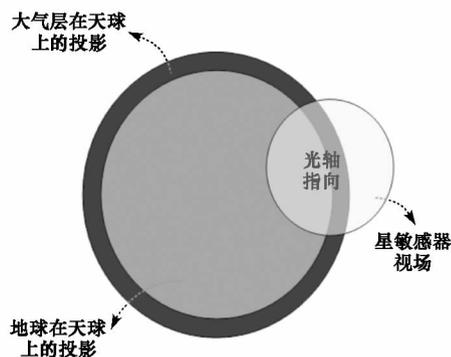


图 3 星传感器视场与地球的相对关系
Fig.3 The relation between the field of view of star-sensor and earth

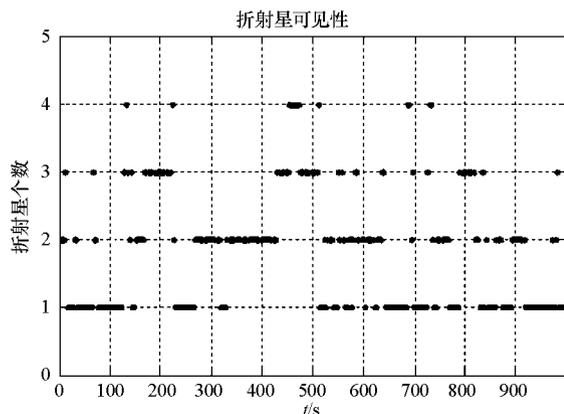


图 4 折射星的可见性
Fig.4 The visibility of refraction-star

3.2 神经网络拟合参数的选取

以对测试数据的预报残差绝对值的加权平均值作为评价拟合效果优劣的指标。表示为:

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_{Z,i} - Y_{N,i}|}{\sigma_{Y,i}} \quad (6)$$

其中, n 为测试样本的数据个数, $Y_{Z,i}$ 为第 i 个样本点的理论真值(由解析模型计算求得), $Y_{N,i}$ 为第 i 个样本点的神经网络预报值, $\sigma_{Y,i}$ 为 $Y_{Z,i}$ 的理论均方根值。 J 的大小代表了拟合效果, J 越小说明拟合曲线越能正确反映输入与输出之间的函数关系,拟合效果就越好。其中,在拟合 $\sigma(h_a)$ 时,理论值由式(4)获得, $\sigma(h_a)$ 的理论均方差由

式(5)获得。

经过仿真,不同拟合精度参数 C 下对应的指标值如表 1 所示。

表 1 不同精度参数下对应的拟合指标大小

Tab.1 The fitting targets of diversity precision parameter

参数 C	0.1	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1	2.5	3.0
J_{h_a}	0.25	0.19	0.13	0.15	0.34	0.42	0.41	0.41
参数 C	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
$J_{\sigma}(h_a)$	33.73	26.82	25.27	25.29	25.30	25.27	25.26	25.25

当 $C = 0.9$ 时 h_a 的拟合效果达到最优。在对 $\sigma(h_a)$ 拟合时,当 $C > 1.0$ 后拟合指标 J 变化不明显,取 $C = 4.0$ 。在最优值下对观测值的拟合结果如图 5 和图 6 所示。

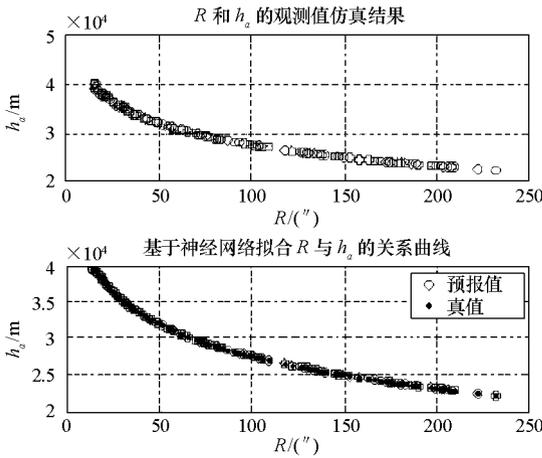


图 5 R 和 h_a 函数关系的拟合曲线
Fig.5 The relation curve of R and h_a

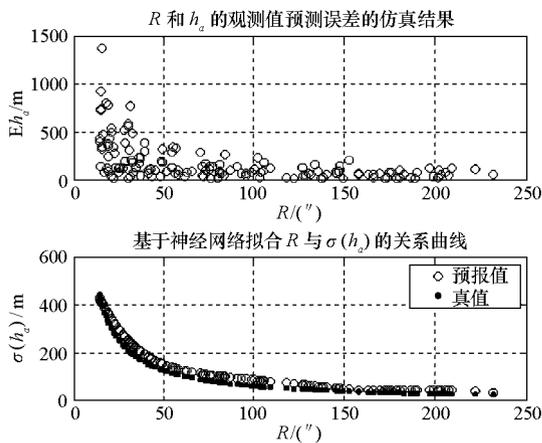


图 6 R 和 $\sigma(h_a)$ 的函数关系的拟合曲线
Fig.6 The relation curve of R and $\sigma(h_a)$

3.3 拟合精度对比分析

根据式(1)在不同的大气密度误差下计算视高度,根据式(6)进行对比分析视高度计算的平均误差大小。不同大气密度误差下对应的平均误差如表 2 所示。

表 2 大气密度误差对视高度误差的影响

Tab.2 The effects of atmosphere density error upon apparent altitude

大气密度误差(%)	0.1%	0.2%	0.5%	1%	2%	3%
视高度平均误差 J	0.09	0.17	0.43	0.85	1.70	2.54

从表 2 中可以看出,大气密度误差对视高度的计算影响显著。在相同的条件下,通过神经网络拟合后的折射模型计算精度优于大气密度误差为 0.2% 时用传统模型的计算精度。因此用径向基神经网络拟合星光折射模型是可行且有效的。

4 结论

由折射角计算视高度时,计算精度受大气密度模型参数误差影响较大,计算误差直接影响基于大气折射的自主导航精度。现有文献中给出的经验公式没有经过实际飞行试验的验证,因而实际的导航精度难以预料。本文分析了星光折射模型的特点,提出用神经网络在线拟合折射模型的方法,避免了大气模型参数不确定造成的影响。拟合后的模型精度受拟合方法、卫星导航数据精度及样本值的选取等因素的影响。在使用该方法前,通过模拟仿真设置最优的神经网络拟合参数;在实际使用时,不需再对拟合效果进行评价。通过仿真,在精度为米量级的卫星导航数据、使用径向基神经网络拟合、选取视高度较低的折射星作为样本值的情况下,可以获得优于传统模型在大气密度误差小于 0.2% 时的精度。

参考文献:

- [1] 房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [2] White R L, Gounley R B. Satellite Autonomous Navigation with SHAD[J]. The Charles Stark Draper Laboratory, 1987(4).
- [3] Ferguson J R. Autonomous Navigation of USAF Spacecraft[D]. The University of Texas at Austin, 1983.
- [4] 周凤岐, 赵黎平, 周军. 基于星光大气折射的卫星自主轨道确定[J]. 宇航学报, 2002, 23(4):20-23.
- [5] Wang X L, Ma S. A Celestial Analytic Positioning Method by Stellar Horizon Atmospheric Refraction[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009(22): 293-300.
- [6] 王国权, 金声震, 孙才红, 等. 卫星自主导航中 25~60 公里星光大气折射模型研究[J]. 科技通报, 2005, 21(1):106-109.
- [7] 飞思科技研发中心, 神经网络理论与 Matlab7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.