

基于脉冲响应模型的 GPS 失效解决方法

贾鹤鸣¹, 宋文龙¹, 车延庭²

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: INS/GPS 组合导航系统具有较高的导航定位精度,但在 GPS 信号失效时,导航定位误差会显著漂移。为解决此问题,提出了一种基于脉冲响应模型的 GPS 失效解决方法。首先,使用基于傅里叶基神经网络的频谱分析方法建立起 INS 系统机动信号与 INS/GPS 组合导航系统机动信号之间的频域传递函数;然后,将此频域传递函数转换到时域,得到时域脉冲响应模型;将得到的时域脉冲响应模型与 INS 机动信号卷积,将卷积之后的信号作为 INS/GPS 组合导航系统在 GPS 信号失效时的过渡信号。仿真实验证明,该模型可以有效抑制 INS/GPS 组合导航系统在 GPS 信号失效时的定位误差漂移。

关键词: 惯性导航系统/全球定位系统;脉冲响应模型;频谱分析;傅里叶变换;最小二乘法;失效

中图分类号: TN967

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)01-0079-05

An Algorithm Based on the Impulse Response Model for Bridging GPS Outages

Jia Heming¹, Song Wenlong¹, Che Yanting²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The INS/GPS system has high positioning accuracy, but its positioning error has a significant drift during the GPS outages. In order to solve this problem, an algorithm based on the impulse response model for bridging GPS outages was proposed. First of all, a frequency domain transfer function between the INS and the INS/GPS motion signals was established by use of a spectrum analysis method based on FBF (Fourier basis functions) neural network, then this frequency domain transfer function transformed to the time domain, and subsequently a time domain impulse response model obtained. Finally, the convolution of the time domain impulse response model and the INS motion signals was used for bridging GPS outages. Simulation results prove that this impulse response model can effectively inhibit the positioning error drift of the INS/GPS system during GPS outages.

Key words: INS/GPS; impulse response model; spectrum analysis; Fourier transform; least squares; outages

全球定位系统(global positioning system, GPS)具有全球性、高精度、低成本、误差不随时间积累等优点,成为目前应用非常广泛的一种导航系统。但是, GPS 也存在信号容易受到干扰、输出频率低、动态性能差等缺点。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)是一种全自主导航系统,具有隐蔽性良好和抗干扰能力强等优点。但是, INS 的误差随时间积累,如果惯性器件的精度较低,则误差积累的速度较快,不适合长时间进行单独导航^[1-4]。而将 INS 与 GPS 组合的导航系统,可以克服 GPS 与 INS 单独进行导航时的缺

收稿日期: 2012-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972424); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 贾鹤鸣(1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要从事非线性控制理论及应用等方向的研究。

E-mail: jiaheminglucky99@126.com

宋文龙(1973—), 男, 吉林四平人, 教授, 博士生导师, 主要从事林业工程自动化、智能控制及检测等方向的研究, 本文通信作者。 E-mail: wlsong139@126.com

点,具有良好的性能。但是, GPS 信号不稳定时,会出现 GPS 信号失效的情况,导航定位误差会发生显著漂移^[5]。

在船用 INS/GPS 组合导航系统中,令研究人员感兴趣的机动信号频带是由 GPS 系统决定的。考虑船舶长航时低航速的特点,认为频带在 0.5 Hz 以上的 INS 机动信号是噪声信号,会降低船舶低频机动信号的恢复能力,因而需要对其进行滤波^[6]。

本研究采用一种选择性的频域分析方法,可以对感兴趣的频带进行选择。如果 INS/GPS 组合导航系统中 GPS 的采样频率是 1 Hz,从基本频率(由 INS 数据采样频率确定的)到 0.5 Hz 的数据带宽得到频域传递函数,进而得到时域脉冲响应模型,并用作 GPS 信号失效时的过渡信号。与单纯的 INS 系统相比,INS/GPS 组合导航系统可以恢复载体的长期动态信号(如速度和位置信息)。该脉冲响应模型的系统输入为只有 INS 有效时的信号,输出则是 INS/GPS 组合导航系统的信号,如图 1 所示。建立起脉冲响应模型后,就可以在 GPS 信号失效时,将该脉冲响应模型与 INS 机动信号进行卷积,得到 INS/GPS 组合导航系统的机动信号,并将其作为组合导航系统在 GPS 信号失效时的过渡信号。

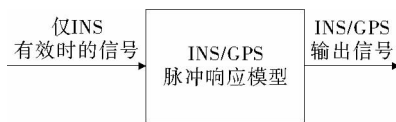


图 1 脉冲响应模型图

Fig. 1 Impulse response model

1 频谱分析基本原理

对于频带有限的信号 $f(t)$,有傅里叶变换公式

$$f(t) = \sum_{i=0}^N a_i \cos(i\omega_0 t) + \sum_{i=1}^N b_i \sin(i\omega_0 t), \quad (1)$$

或者

$$f(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(i\omega_0 t + \varphi_i). \quad (2)$$

其中: $A_0 = a_0$ 为直流分量; $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$ 为 i 次谐波分量的振幅; $\varphi_i = -\arctan(b_i/a_i)$ 为 i 次谐波分量的相位。只要获得了 a_i 和 b_i 就得到了 $f(t)$ 的幅度谱特性 A_i 和相位谱特性 φ_i 。由于实际信号一般没有解析表达式, a_i 和 b_i 的获得是比较困难的,为此,对式(1)进行离散化,得到离散信号 $f(k)$ 的傅里叶变换:

$$f(k) = \sum_{i=0}^N a_i \cos(i\omega_0 kT_0) + \sum_{i=1}^N b_i \sin(i\omega_0 kT_0). \quad (3)$$

其中: T_0 为采样周期, $k = 0, 1, \dots, M$, 并且 $M \geq 2N + 1$ 。

设权值向量为

$$\mathbf{W} = [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_N \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_N]^T,$$

神经网络激励矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \cos(\omega_0 T_0) & \dots & \cos(N\omega_0 T_0) & \sin(\omega_0 T_0) & \dots & \sin(N\omega_0 T_0) \\ 1 & \cos(2\omega_0 T_0) & \dots & \cos(2N\omega_0 T_0) & \sin(2\omega_0 T_0) & \dots & \sin(2N\omega_0 T_0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos(M\omega_0 T_0) & \dots & \cos(MN\omega_0 T_0) & \sin(M\omega_0 T_0) & \dots & \sin(MN\omega_0 T_0) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则式(3)可表示为

$$f(k) = \mathbf{B}(k, \cdot) \cdot \mathbf{W}. \quad (4)$$

对于脉冲响应模型的输入、输出信号 $R(k)$ 和 $C(k)$ 来说,可以使用离散化的傅里叶公式对其进行描述:

$$R(k) = \sum_{i=0}^N a_{Ri} \cos(i\omega_0 kT_0) + \sum_{i=1}^N b_{Ri} \sin(i\omega_0 kT_0); \quad (5)$$

$$C(k) = \sum_{i=0}^N a_{Ci} \cos(i\omega_0 kT_0) + \sum_{i=1}^N b_{Ci} \sin(i\omega_0 kT_0). \quad (6)$$

设权值向量分别为 $\mathbf{W}_R = [a_{R0} \ a_{R1} \ \cdots \ a_{RN} \ b_{R1} \ b_{R2} \ \cdots \ b_{RN}]^T$, $\mathbf{W}_C = [a_{C0} \ a_{C1} \ \cdots \ a_{CN} \ b_{C1} \ b_{C2} \ \cdots \ b_{CN}]^T$, 则式(5)和式(6)可以分别写成

$$R(k) = \mathbf{B}(k, :) \cdot \mathbf{W}_R; \quad (7)$$

$$C(k) = \mathbf{B}(k, :) \cdot \mathbf{W}_C. \quad (8)$$

其中: $\mathbf{B}(k, :)$ 为矩阵 \mathbf{B} 的第 $k+1$ 行, 表示 kT_0 时刻激励函数向量。

由以上分析可知, 只要获得权值向量 \mathbf{W}_R 和 \mathbf{W}_C , 即傅里叶变换的系数 a_{Ri}, b_{Ri} 和 a_{Ci}, b_{Ci} , 就可以得到 i 次谐波分量的幅值 $A_{Ri} = \sqrt{a_{Ri}^2 + b_{Ri}^2}$, $A_{Ci} = \sqrt{a_{Ci}^2 + b_{Ci}^2}$ 和相位 $\varphi_{Ri} = -\arctan(b_{Ri}/a_{Ri})$, $\varphi_{Ci} = -\arctan(b_{Ci}/a_{Ci})$ 。

2 INS/GPS 脉冲响应模型的建立

采用文献[7]所述的基于递推最小二乘法的傅里叶基神经网络算法来训练权值向量 \mathbf{W}_R 与 \mathbf{W}_C , 以获得输入输出信号的幅频特性和相频特性。对于脉冲响应模型的输入信号 $R(k)$ 来说, 神经网络的模型如图 2 所示。

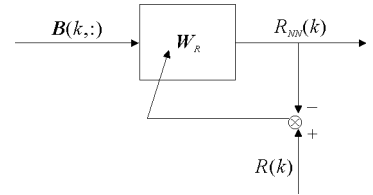


图 2 神经网络训练输入信号权值向量示意图

Fig. 2 Weight vector diagram of neural network training input signal

$$\text{神经网络输出为} \quad R_{N/N}(k) = \mathbf{B}(k, :) \cdot \mathbf{W}_R; \quad (9)$$

$$\text{误差函数为} \quad e_R(k) = R(k) - R_{N/N}(k); \quad (10)$$

$$\text{代价函数为} \quad J_R = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^M e_{Rk}^2(k). \quad (11)$$

使代价函数 J_R 取得最小值的权值向量 \mathbf{W}_R , 即所求神经网络的权值向量。为此, 令 $\partial J_R / \partial \mathbf{W}_R = 0$, 可以得到如下递归最小二乘算法:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}_R^{k+1} &= \mathbf{W}_R^k + \mathbf{Q}_R^k [R(k) - \mathbf{B}(k, :) \cdot \mathbf{W}_R^k] \\ \mathbf{Q}_R^k &= \frac{\mathbf{P}_R^k \mathbf{B}^T(k, :)}{1 + \mathbf{B}(k, :) \mathbf{P}_R^k \mathbf{B}^T(k, :)} \\ \mathbf{P}_R^{k+1} &= [\mathbf{I} - \mathbf{Q}_R^k \mathbf{B}(k, :)] \mathbf{P}_R^k \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

通过一段时间的样本数据训练, 即可得到 $R(k)$ 权值向量 \mathbf{W}_R 和 $C(k)$ 的权值向量 \mathbf{W}_C , 从而得到输入、输出信号的 i 次谐波分量的幅值 $A_{Ri} = \sqrt{a_{Ri}^2 + b_{Ri}^2}$, $A_{Ci} = \sqrt{a_{Ci}^2 + b_{Ci}^2}$ 和相位 $\varphi_{Ri} = -\arctan(b_{Ri}/a_{Ri})$, $\varphi_{Ci} = -\arctan(b_{Ci}/a_{Ci})$ 。输入、输出信号的幅频函数分别为

$$|R(\omega_i)| = A_{Ri} = \sqrt{a_{Ri}^2 + b_{Ri}^2}, \quad (13)$$

$$|C(\omega_i)| = A_{Ci} = \sqrt{a_{Ci}^2 + b_{Ci}^2}; \quad (14)$$

相频函数分别为

$$\angle R(\omega_i) = \varphi_{Ri} = -\arctan(b_{Ri}/a_{Ri}), \quad (15)$$

$$\angle C(\omega_i) = \varphi_{Ci} = -\arctan(b_{Ci}/a_{Ci}). \quad (16)$$

于是, 可以得到频域脉冲响应模型的传递函数 $H(\omega_i)$ 。其幅频函数 $|H(\omega_i)|$ 以及相频函数 $\angle H(\omega_i)$:

$$|H(\omega_i)| = \frac{|C(\omega_i)|}{|R(\omega_i)|}; \quad (17)$$

$$\angle H(\omega_i) = \angle C(\omega_i) - \angle R(\omega_i). \quad (18)$$

经过递推最小二乘法训练得到的神经网络输出, 具有良好的噪声滤除效果^[7]。

得到频域传递函数 $H(\omega_i)$ 后, 即可对其进行反变换, 得到时域内 INS/GPS 系统的脉冲响应模型 $h(\tau_i)$, τ_i 是延迟时间, 估计公式为

$$\begin{bmatrix} h(\tau_1) \\ \vdots \\ h(\tau_N) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega_1 \tau_1 + \angle H(\omega_1)) & \cdots & \cos(\omega_M \tau_1 + \angle H(\omega_M)) & \sin(\omega_M \tau_1 + \angle H(\omega_1)) & \cdots & \sin(\omega_1 \tau_1 + \angle H(\omega_M)) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\omega_1 \tau_N + \angle H(\omega_1)) & \cdots & \cos(\omega_M \tau_N + \angle H(\omega_M)) & \sin(\omega_M \tau_N + \angle H(\omega_1)) & \cdots & \sin(\omega_1 \tau_N + \angle H(\omega_M)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |H(\omega_1)| \\ \vdots \\ |H(\omega_M)| \\ |H(\omega_M)| \\ \vdots \\ |H(\omega_1)| \end{bmatrix} \quad (19)$$

当 INS/GPS 组合导航系统中 GPS 信号失效时,通过对 INS 信号与脉冲响应模型进行卷积,即可得到组合导航系统的输出,并将此输出信号用作 GPS 失效时的过渡信号^[8]。

3 仿真实验

为验证该脉冲响应模型算法的有效性,在 MATLAB 软件环境下进行仿真,仿真条件如下:

加速度计零偏为 $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$,陀螺漂移为 0.01° ;

初始对准误差为纵摇角误差 0.05° ,横摇角误差 0.05° ,航向角误差 0.1° ,信号输出频率 100 Hz ;

GPS 定位误差为 10 m ,信号输出频率 1 Hz ;

船舶匀速直线航行,航向 $NE45^\circ$,东向速度 $V_E = 7 \text{ m/s}$,北向速度 $V_N = 7 \text{ m/s}$;

假设存在周期性干扰加速度,东向加速度 $a_E = 0.02 \sin(2\pi t/2) + 0.001 \cos(2\pi t/0.5)$,北向加速度 $a_N = 0.02 \cos(2\pi t/2) + 0.001 \sin(2\pi t/0.5)$;

取谐波次数 $N=50$,对于不同的组合导航系统来说,可以取不同的 N 值, N 值越大对信号描述越精确,但是计算量也会相应增大。

假设前 350 s 系统工作在组合状态,在第 350 s 时 GPS 信号失效,仿真曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出,系统工作在组合状态时,定位误差为 10 m 左右。当 GPS 信号丢失时(第 350 s 开始丢失信号),系统若工作在纯惯性导航状态,其定位误差迅速增大,GPS 信号丢失 250 s 后定位误差达 150 m ;而使用了脉冲响应模型后,系统定位误差明显降低,定位误差为 50 m 。所以,使用该脉冲响应模型算法可以有效改善 GPS 失效时导航定位误差漂移的情况。

4 结束语

使用一种基于递推最小二乘法的傅里叶基神经网络算法的频谱分析方法,建立了 INS 机动信号与 INS/GPS 组合导航系统机动信号之间的频率传递函数;然后,将得到的传递函数转换到时间域,以获得其脉冲响应模型;最后,仿真验证了使用该脉冲响应模型可以有效降低 INS/GPS 组合导航系统在 GPS 失效时产生的定位误差漂移,非常适合于工程应用。

参考文献:

[1]何晓峰,胡小平,唐康华.无缝 GPS/INS 组合导航系统的设计与实现[J].国防科技大学学报,2008,30(1):83-88.

He Xiaofeng, Hu Xiaoping, Tang Kanghua. Design and evaluation of a seamless GPS/INS integrated navigation system[J].

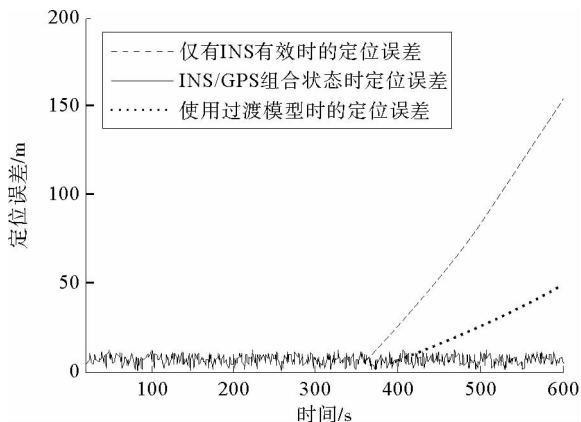


图 3 仿真结果图

Fig. 3 Simulation results

Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 83-88.

- [2] 毛克诚, 孙付平, 李海丰. UKF 在 GPS/INS 组合导航系统中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(3): 200-202, 206.
Mao Kecheng, Sun Fuping, Li Haifeng. On unscented Kalman filtering in GPS/INS integrated navigation system[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2007, 24(3): 200-202, 206.
- [3] 聂浩翔, 关劲, 卞鸿巍. 模糊自适应 Kalman 滤波在 INS/GPS 组合导航系统中的应用[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 67-70.
Nie Haoxiang, Guan Jin, Bian Hongwei. Fuzzy adaptive Kalman filtering in INS/GPS integrated navigation system[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(1): 67-70.
- [4] 王朋辉. 高动态 GPS/INS 组合导航系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 33-38.
- [5] 黄德鸣, 程禄. 惯性导航系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 86-90.
- [6] El-Diasty M, Pagiatakis S. An efficient INS/GPS impulse response model for bridging GPS outages[C]//IEEE TIC-STH09: 2009 IEEE Toronto International Conference: Science and Technology for Humanity. Toronto, Sep. 26-27, 2009: 328-333.
- [7] 曾喆昭. 一种基于傅里叶基神经网络的频谱分析方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1821-1824.
Zeng Zhezha. A spectrum analysis method based on FBF neural network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1821-1824.
- [8] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 128-138.

(责任编辑: 吕文红)

“机器人与智能技术”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|--------------------|-------------|
| ◇ 机器人理论与控制技术 | ◇ 智能系统建模与控制 |
| ◇ 人工智能与智能控制技术 | ◇ 机器人结构设计 |
| ◇ 移动机器人及自主导航技术 | ◇ 多机器人系统 |
| ◇ 机器人传感技术、智能传感器 | ◇ 特种机器人 |
| ◇ 机器视觉、图像处理与模式识别技术 | ◇ 机器学习 |

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“机器人与智能技术”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表, 优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: xbgjcl@126.com; zklwh@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057826

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部