

文章编号:1001-2486(2007)04-0057-05

机抖激光陀螺捷联系统姿态算法优化设计*

潘献飞, 吴文启, 黄新生

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:机械抖动激光陀螺捷联惯性导航系统中通常要对陀螺信号进行预滤波处理以消除抖动偏频, 数据滤波后其幅值和相位的变化引入了附加的姿态算法误差。为了减小此误差, 研究了抖动解调滤波器的特性以及数据滤波对系统姿态算法精度的影响, 推导了与滤波器匹配的姿态算法优化公式。优化算法仅修正了传统算法系数, 不增加算法实现难度。仿真和实验表明, 优化算法能有效减小滤波器引入的附加姿态算法误差, 明显改善算法精度, 有很高的工程实用价值。

关键词:激光陀螺; 捷联系统; 姿态算法; 低通滤波

中图分类号:TP302.1 **文献标识码:**A

Optimization of Attitude Algorithms on Dither RLG SINS

PAN Xian-fei, WU Wen-qi, HUANG Xin-sheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the dither ring laser gyro (RLG) strapdown inertial navigation system (SINS), gyro outputs are often pre-filtered to eliminate the dither bias, so the distortion of magnitude and phase of filtered data induce the additional attitude algorithm errors. In this paper, the dither demodulation filter was analyzed and its influence on attitude algorithms was researched. The formulas of optimized attitude algorithm were derived to match the response of the filter. The optimization technology did not complex the algorithms because only the algorithms coefficients were amended. The simulations and experiments illustrate that the optimized algorithms can reduce effectively the additional algorithm errors and increase obviously the algorithms precision. The algorithms have great value to real application.

Key words: laser gyro; strapdown system; attitude algorithms; lowpass filter

捷联惯性导航系统中, 姿态算法是积分载体角速度得到载体姿态的过程。在恶劣的运动环境中, 由于转动的不可交换性误差的影响, 通用的微分方程积分算法(如 Runge-Kutta 法)不能满足捷联系统对精度的要求, 必须研究适合捷联惯导微分方程数值积分的专门算法, 以降低圆锥效应的影响。设计补偿精度高、计算量少的圆锥补偿算法一直是人们不断追求的目标。国内外学者对高精度、高速度的圆锥补偿算法进行了大量的研究, 建立了一套以 Miller 的三子样算法^[1]为基础的圆锥补偿及优化算法, 得到了广泛的工程应用^[2-4]。

目前, 国内的激光陀螺技术快速发展, 激光陀螺捷联惯导系统以其体积小、启动快、精度高、动态范围大等优势应用范围日益扩大, 尤以机械抖动激光陀螺应用最为成熟。机抖陀螺采用抖动偏频的方式减小锁区的影响, 因此在陀螺输出信号中叠加了抖动偏频信号, 必须用信号处理的方式消除才能得到与输入信号对应的输出信号。抖动解调的方法一般有整周期采样法和数字低通滤波法^[5]。前者使数据采样周期与陀螺抖动周期同步, 整周期内抖动偏频正负抵消, 从而消除偏频影响。其缺点是导航解算周期与抖动周期不同步, 造成数据采样周期与导航解算周期不同步, 从而带来较大的解算误差。随着数字信号处理技术的发展和嵌入式计算机技术的进步, 数字低通滤波法成为可能。只要用高于陀螺抖频两倍的采样频率对陀螺输出高频采样, 再用低通滤波的方法即可消除抖动偏频的影响, 解决了数据同步问

* 收稿日期: 2007-02-10

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 潘献飞(1978—), 男, 博士生。

题,能提高姿态解算频率,而且可以消除信号高频噪声引入的“伪圆锥误差”的影响,因此逐渐被广泛采用。

低通滤波消除抖动偏频的方法虽然解决了同步问题,但滤波器的引入必然引起陀螺数据幅值和相位的变化,从而影响系统算法精度。2001年,Mark^[6]提出了根据陀螺滤波后的频率特性对圆锥补偿算法进行修正的思想,并在实际导航系统中得到了应用。本文研究了低通滤波器的引入对捷联系统姿态解算效果的影响,并根据滤波器设计了新的姿态算法修正公式,有效减小滤波器的影响,满足系统精度要求。

1 滤波器的选择和设计

根据载体的机动特性,一般要求激光陀螺信号带宽为0~100Hz。90型机械抖动激光陀螺的抖动频率一般为300~430Hz。利用两者的频率差,可以用数字低通滤波器滤除陀螺的抖动偏频信号,实现抖动解调。陀螺原始输出为频率交变信号,频率变化范围很大,而有限冲击响应(FIR)滤波器的线性相位特性可以保证信号时域不失真,只是相对于原始信号有一固定的时间延迟,因此抖动解调滤波采用FIR滤波器。

FIR滤波器的幅频特性越好,要求滤波器阶数越高,则相位延迟越大。为了兼顾幅频和相位指标,本文采用20阶FIR滤波器。类似于文献[5],系统中陀螺采样率 $f_s = 2\text{kHz}$,滤波器指标设定如下:通带截止频率100Hz,通带波纹小于 $\pm 0.1\text{dB}$,阻带下限截止频率300Hz,幅值衰减大于40dB,其幅频相频特性如图1。

在滤除高频抖动的同时,滤波器也使通带内的陀螺有效信号产生了幅值和相位的变化。相位延迟可能引起陀螺与加表信号异步以及影响系统导航解算的实时性。对于系统姿态算法,只用到陀螺数据,可忽略异步影响,因此主要研究滤波器幅频特性对系统姿态算法的影响。

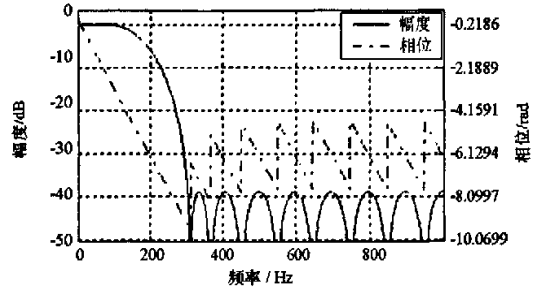


图1 FIR滤波器幅频相频响应

Fig.1 Magnitude-phase frequency response of FIR

2 滤波数据姿态算法的推导

刚体转动矢量微分方程为

$$\dot{\Phi} = \omega + \frac{1}{2} \Phi \times \omega + \frac{1}{12} \Phi \times (\Phi \times \omega) \quad (1)$$

式中, Φ 为转动矢量, ω 为角速度矢量。由此可推得一个矢量更新周期 T 内,转动矢量估计值为

$$\hat{\Phi} = \sum_{i=1}^n \theta(i) + \delta\hat{\Phi} \quad (2)$$

式中, n 为一个矢量更新周期 T 内的角增量个数, $\delta\hat{\Phi}$ 为圆锥补偿估计值,在第 m 个圆锥补偿周期 T 内,圆锥补偿的估计值为^[7]

$$\delta\hat{\Phi}_m = \left[\sum_{j=n-p+1}^n k_{2n-j} \Delta\theta_{m-1}(j) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{n-i} \Delta\theta_m(i) \right] \times \Delta\theta_m(n) \quad (3)$$

式中, k 为角增量叉乘系数, $\Delta\theta_m(i)$ 为第 m 个圆锥补偿周期的第 i 个角增量输出, $\Delta\theta_{m-1}(j)$ 为第 $m-1$ 个圆锥补偿周期的第 j 个角增量输出, p 为利用前一圆锥补偿周期的角增量个数。

实际工程应用中,一般采用单周期补偿算法,即

$$\delta\hat{\Phi}_m = \sum_{i=1}^{n-1} k_{n-i} \Delta\theta_m(i) \times \Delta\theta_m(n) \quad (4)$$

对于经典圆锥运动,其转动向量为

$$\varphi = [0 \quad a \cos \Omega t \quad a \sin \Omega t]^T \quad (5)$$

其中, Ω 为圆锥运动频率, a 为圆锥运动幅度。

在理想情况下, 一个圆锥补偿周期 T 内, 等效转动矢量和陀螺角增量分别为

$$\Phi = \begin{bmatrix} -2\sin^2(a/2)\sin(\Omega T) \\ -2\sin(a)\sin(\Omega T/2)\sin[\Omega(t+T/2)] \\ 2\sin(a)\sin(\Omega T/2)\cos[\Omega(t+T/2)] \end{bmatrix} \quad \Delta\theta = \begin{bmatrix} -2\Omega T \sin^2(a/2) \\ -2\sin(a)\sin(\Omega T/2)\sin[\Omega(t+T/2)] \\ 2\sin(a)\sin(\Omega T/2)\cos[\Omega(t+T/2)] \end{bmatrix} \quad (6)$$

则在第 m 个圆锥补偿周期内, 圆锥效应为

$$\delta\Phi_m = \Phi_x - \Delta\theta_x = [2\sin^2(a/2)[\Omega T - \sin(\Omega T)]] \quad (7)$$

陀螺数据经过滤波器低通滤波, 设低通滤波器为 $F(\Omega)$, 则有以下性质:

$$F(0) = 1, \quad \lim_{\Omega \rightarrow 0} F(\Omega) = 1, \quad |F(\Omega)| \leq F_{\max} \quad (8)$$

滤波后陀螺输出信号特性发生变化, 圆锥幅度 a 是圆锥频率 Ω 的函数, $a = a_0 g(\Omega)^{[6]}$, 则在圆锥补偿周期 T 内, 滤波后等效转动矢量和角增量分别为

$$\Phi' = \begin{bmatrix} -2\sin^2[a_0 g(\Omega)/2]\sin(\Omega T) \\ -2\sin[a_0 g(\Omega)]\sin(\Omega T/2)\sin[\Omega(t+T/2)] \\ 2\sin[a_0 g(\Omega)]\sin(\Omega T/2)\cos[\Omega(t+T/2)] \end{bmatrix} \quad \Delta\theta' = \begin{bmatrix} -2F(0)\Omega T \sin^2(a/2) \\ -2F(\Omega)\sin(a)\sin(\Omega T/2)\sin[\Omega(t+T/2)] \\ 2F(\Omega)\sin(a)\sin(\Omega T/2)\cos[\Omega(t+T/2)] \end{bmatrix} \quad (9)$$

设 $T = n\Delta t, \lambda = \Omega\Delta t$, 则在第 m 个圆锥补偿周期内, 滤波后圆锥效应为^[6]

$$\delta\Phi'_m = \Phi'_x - \Delta\theta'_x = 2\sin^2(a/2)[\Omega T - F^2(\Omega)\sin(\Omega T)] = \frac{1}{2} n\lambda a^2 [1 - F^2(\lambda)\sin(n\lambda)] \quad (10)$$

由文献[7]可知, 具有相等时间间隔的角增量叉乘结果相等, 与绝对时间无关, 只与采样间隔 Δt 和两次采样的间隔有关。设角增量叉乘项为

$$C_p(i) = \Delta\theta(i) \times \Delta\theta(i+p) \quad (11)$$

则由式(3)可推得, 陀螺输出滤波后

$$C_p(n) = -(\Omega\Delta t)^2 F^2(\omega) \sin^2 \text{sinc}^2(\Omega\Delta t/2) \sin(p\Omega\Delta t) \quad (12)$$

则滤波后圆锥补偿估计值为

$$\begin{aligned} \delta\hat{\Phi}'_m &= \sum_{p=1}^{n-1} C_p k_p = -(\Omega\Delta t)^2 F^2(\omega) \sin^2 a \text{sinc}^2(\Omega\Delta t/2) \sum_{p=1}^{n-1} \sin(p\Omega\Delta t) k_p \\ &\quad - \lambda^2 a^2 F^2(\lambda) \text{sinc}^2(\lambda/2) \sum_{p=1}^{n-1} \sin(p\lambda) k_p \end{aligned} \quad (13)$$

由式(10)和式(13), $\delta\Phi'_m = \delta\hat{\Phi}'_m$, 可得

$$\frac{1}{2} n [1 - F^2(\lambda)\sin(n\lambda)] = -\lambda F^2(\lambda) \text{sinc}^2(\lambda/2) \sum_{p=1}^{n-1} \sin(p\lambda) k_p \quad (14)$$

两边对 λ 做 Taylor 展开, 对应项系数相等, 可求得陀螺数据经过滤波器 $F(\Omega)$ 后的圆锥补偿算法叉乘项系数 k_p 。当滤波器 $F(\Omega) = 1$ 即数据为理想数据时, 系数 k_p 即为传统圆锥算法系数, 算法子样数 n 分别取 2、3、4、5 时, 传统算法系数和数据经过 FIR 滤波后的优化算法系数如表 1。

可以看出, 考虑滤波器影响的新

表 1 传统算法和优化算法系数

Tab. 1 Coefficients of classical and optimized algorithms

算法子样数		k_1	k_2	k_3	k_4
2	传统	2/3			
	优化	-1.3830			
3	传统	27/20	9/20		
	优化	81.979	-41.402		
4	传统	214/105	92/105	54/105	
	优化	-1117.08	926.373	-244.81	
5	传统	1375/504	650/504	525/504	250/504
	优化	26 350.80	-26 588.81	11 585.94	-1981.4

算法与传统算法形式完全相同, 只是角增量叉乘系数不同, 在系统实现中只需改变传统算法系数, 不增

加任何系统复杂度和计算量。式(14)适用于符合式(8)条件的任何滤波器的姿态修正算法,式(8)条件很容易满足,因此优化算法具有普遍价值。

3 误差特性分析与仿真

为了便于叙述,把姿态算法分为三种不同情况。算法1为理想情况,轨迹发生器生成的理想陀螺信号不经过滤波器,直接作姿态解算,用传统算法可得到满意的精度;算法2为实际系统中常见的情况,陀螺信号经过了滤波器,但仍然采用传统算法,从下文仿真结果可知,其有很大的精度损失;算法3为本文讨论的优化算法式(14),当陀螺信号经过了滤波器后,根据滤波器特性对传统算法进行修正。

用两种方法来分析验证算法的误差特性。

3.1 相对圆锥误差

用相对圆锥误差曲线来描述姿态算法误差与信号采样率($f_s = 1/\Delta t$)和圆锥运动频率 f 的关系,是一种描述算法误差特性的常用方法^[2]。设陀螺采样率 $f_s = 2\text{kHz}$,求出四子样下三种算法的相对圆锥误差曲线如图2。

图2中算法2曲线与算法1随 $f\Delta t$ 的减小而明显下降的趋势不同,这是因为滤波器引入的误差已远大于算法本身误差,传统算法误差的趋势已经不能体现。修正算法3补偿了大部分的滤波器误差,从而重新体现了传统算法1的下降趋势。在滤波器通带之外,当 $f > 100\text{Hz}$ 时,由于滤波器的衰减作用,信号幅度逐渐微弱,圆锥补偿逐渐减小,相对圆锥误差逐渐增大;当圆锥频率大于阻带下限截止频率($f > 300\text{Hz}$)时,陀螺数据幅值衰减40dB,信号幅度近似为0,则圆锥补偿趋近于0,相对圆锥误差趋近于1。

表2 不同圆锥频率下姿态漂移仿真($^{\circ}/60\text{s}$)

Tab.2 Attitude drift ($^{\circ}/60\text{s}$) simulations at different coning frequencies

圆锥频率 (Hz)	算法1	算法2	算法3
1	$-4.3592\text{e}-10$	$-6.6605\text{e}-05$	$2.0715\text{e}-07$
10	$6.5314\text{e}-10$	$-6.5661\text{e}-02$	$2.7480\text{e}-06$
50	$3.9153\text{e}-06$	$-5.9605\text{e}+00$	$4.6227\text{e}-02$
80	$7.1432\text{e}-05$	$-1.0778\text{e}+01$	$2.5133\text{e}+00$

3.2 圆锥运动仿真

用圆锥运动下姿态算法仿真的方法观察不同算法的误差漂移。设载体做式(5)定义的经典圆锥运动,锥半角 $\alpha = 1^{\circ}$,数据采样频率 $f_s = 2\text{kHz}$ 。原始数据用算法1,滤波后数据用算法2和算法3进行姿态解算。当算法为四子样时,在滤波器通带内取不同圆锥频率 f 下的姿态漂移误差如表2。三种算法在滤波器通带0~100Hz内误差变化趋势与图2的相对圆锥误差变化趋势基本一致。随着圆锥运动频率的降低,各算法精度都有不同程度的提高。算法2虽然在图2中的相对误差变化趋势不明显,但由于圆锥漂移本身随运动频率的降低而减小,故其绝对圆锥算法误差也随之减小。

由仿真结果可以明显看出,算法3相对算法2的精度有1~4个量级的改善,说明算法3对滤波器的补偿作用是有效的。但由于FIR滤波器表达式较为复杂,在用公式(14)推导的过程中截断误差较大,因此算法3还远不能补偿到算法1的理想水平。但对于实际捷联系统来说,系统误差受很多因素的影响,根据应用环境的不同,算法误差只要控制在一定精度范围内即可,没必要无限制提高。算法3相对算法2两个量级的精度改善可以大大提高捷联系统的环境应用范围。

由仿真结果可以明显看出,算法3相对算法2的精度有1~4个量级的改善,说明算法3对滤波器的补偿作用是有效的。但由于FIR滤波器表达式较为复杂,在用公式(14)推导的过程中截断误差较大,因此算法3还远不能补偿到算法1的理想水平。但对于实际捷联系统来说,系统误差受很多因素的影响,根据应用环境的不同,算法误差只要控制在一定精度范围内即可,没必要无限制提高。算法3相对算法2两个量级的精度改善可以大大提高捷联系统的环境应用范围。

4 实验验证

为了验证算法效果,必须使载体做高频圆锥运动,这实际上是很难做到的。为此,采用准实际数据的仿真方式。即载体的运动轨迹由理想轨迹发生器产生(图3(a));而陀螺原始数据中包含的抖动调

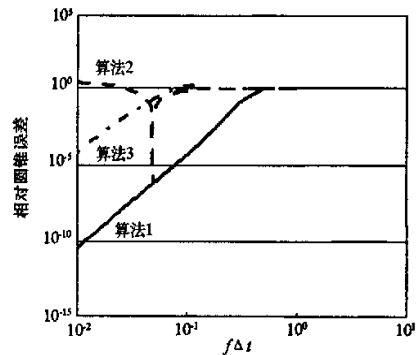


图2 三种算法的相对圆锥误差响应

Fig.2 Relative coning error response for three algorithms

制、高频噪声等由捷联系统实际采样数据得到,两者叠加构成圆锥运动的原始陀螺输出(图3(b))。后者由激光捷联系统静基座下的陀螺原始输出滤去地球自转分量得到,包含了抖动信息、陀螺漂移、高频噪声等,真实反映陀螺实际输出信号的频域特性。而且,采用实际采样做抖动偏频信号,可以检验滤波器的滤波性能,真实反映滤波后陀螺数据(图3(c))的频谱特性变化及其对算法造成的影响,仿真结果近似于真实结果。

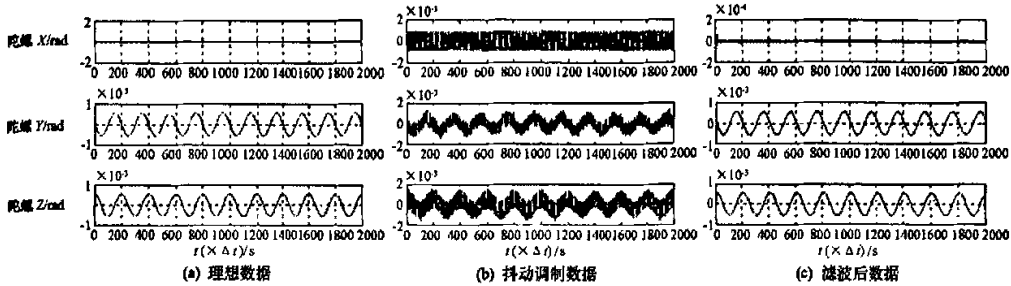


图3 陀螺输出数据的生成

Fig.3 The production of gyro output data

由于数据滤波后依然有残留抖动和噪声调制,也会引入圆锥漂移,而图3(a)中的理想信号没有此调制,因此算法1的姿态漂移与后两种算法没有可比性,算法2和算法3的姿态漂移误差如表3。

可以看出,修正算法3相对算法2在滤波器通带内有最高两个量级的精度改善。在50Hz附近精度提高两个量级,在10Hz和80Hz附近精度提高3~4倍。与标准圆锥运动仿真表2的姿态漂移结果基本一致,说明算法具有很好的实际应用价值。

表3 不同圆锥频率下姿态漂移实验(°/60s)

Tab.3 Attitude drift (°/60s) experiments at different coning frequencies

圆锥频率(Hz)	算法2	算法3
1	-2.8478e-002	-3.0057e-002
10	-1.0949e-001	-3.2357e-002
50	-5.9853e+000	2.3452e-002
80	-1.0800e+001	2.6187e+000

5 结论

本文的优化姿态算法适用于任何满足式(8)条件的滤波数据的捷联系统,算法补偿效果与滤波器性能有关。滤波器越接近理想滤波器,传统算法的精度损失越小,优化算法优势越小。当滤波器是理想滤波器时,优化算法与传统算法一致。圆锥运动对于姿态漂移是最恶劣的运动,而一般的车载环境相对优良,加上传感器误差等其它误差因素的影响,捷联系统导航误差中姿态算法误差一般不占主导地位。但对于高频振动环境或是传感器精度较高的高精度系统,算法误差对系统导航精度的影响增大,信号滤波器影响必须考虑,本文优化算法可显示优势。另外,根据圆锥算法与划船算法的对偶性,此优化算法也可扩展到划船算法,对加速度计的采样滤波特性进行算法修正,从而得到优化的姿态和导航算法,提高捷联系统的总体导航精度。

参考文献:

- [1] Miller R B. A New Strapdown Attitude Algorithms[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1983, 6(4): 287-291.
- [2] Ignagni M B. Optimal Strapdown Attitude Integration Algorithms[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990, 13(2): 363-369.
- [3] Jiang Y F, Lin Y P. Improved Strap-down Coning algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1992, 28(2): 484-490.
- [4] Lee J G, Yoon Y J. Extension of Strapdown Attitude Algorithm for High-Frequency Base Motion[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990, 13(4): 738-743.
- [5] 刘宗玉, 陈明, 王玮. 抖动偏频激光陀螺中的解调及实现技术[J]. 测控技术, 2004, 23(9): 67-75.
- [6] Mark J G, Tzartas D A. Tuning of Coning Algorithms to Gyro Data Frequency Response Characteristics[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(4): 641-647.
- [7] Park C G, Kim K J. Formalized Approach to Obtaining Optimal Coefficients for Coning Algorithms [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 22(1): 165-168.

