考虑陀螺频率特性的角速率输入圆锥补偿算法

陈 雨 赵 剡 李群生 吴 辉

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对陀螺直接输出角速率且通带内增益不一致(频率特性),而传统角速率输入圆锥补偿算法要求输入理想的角速率,提出了一种考虑陀螺频率特性的角速率输入圆锥补偿算法. 推导了圆锥运动情况下姿态更新周期内理想旋转矢量增量和实际姿态算法计算的旋转矢量增量,以最小化理想旋转矢量增量和计算旋转矢量增量之间非周期项的差异为计算圆锥误差补偿系数的准则,最优补偿系数可以看成是采用理想角速率输入的圆锥补偿算法系数与考虑频率特性时对理想圆锥补偿算法系数修正的和. 得到了公式化求解考虑频率特性的各子样算法最优系数的方法. 仿真结果表明,所提出的算法比传统角速率输入圆锥补偿算法在精度上有明显提高.

关 键 词: 捷联惯导系统; 姿态算法; 旋转矢量; 圆锥误差

中图分类号: V 249.32^{+}2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1228-05

Coning compensation algorithm with angular rate considering gyroscope frequency characteristics

Chen Yu Zhao Yan Li Qunsheng Wu Hui

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Focusing on the gyroscopes' output is angular rate and has a certain frequency characteristics, a coning compensation algorithm considering the gyroscopes' frequency characteristics with angular rate as input was presented. The ideal and computed rotation vector increment was derived in the attitude update interval under coning motion. The coning compensation algorithm coefficients were computed to minimize the non-periodic term difference between the ideal and computed rotation vector increment. The optimal coefficients were defined to be the sum of the values that exist for perfect angular rate input and an adjustment that accounts for the frequency characteristics. The formulized approach for the optimal coefficients with arbitrary samples considering frequency characteristics was obtained. Simulation results show that the accuracy of the algorithm can be improved effectively as compared with the conventional ones.

Key words: strapdown inertial navigation system; attitude algorithm; rotation vector; coning error

捷联惯导系统的惯性测量单元直接固联于载体,姿态算法的性能直接影响到捷联惯导系统的导航精度. 由于有限转动的不可交换性,姿态的数值解算不可避免地要引入不可交换性误差(圆锥误差). 众多学者对圆锥补偿算法进行了大量的研究. 文献[1]提出一种在经典圆锥运动下推导圆锥补偿的通用方法,为采用旋转矢量推导姿态算法奠定了基础. 文献[2]在文献[1]的基础上提出了几种改进的圆锥补偿算法. 文献[3]在确定圆锥补偿算法系数时采用约束圆锥运动,考虑了陀螺的频率特性. 文献[4]考虑了陀螺的有限带宽,设计了最优圆锥补偿算法. 这些补偿算法都是

收稿日期: 2012-11-14; **网络出版时间**: 2013-09-22 10:24

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130922.1024.002.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20100818018)

作者简介: 陈 雨(1985-),男,湖南株洲人,博士生,chenyu@aspe.buaa.edu.cn.

基于陀螺的角增量信息. 针对有些陀螺直接输出角速率信息,文献[5]提出了一种以角速率信号作为圆锥补偿算法输入的新补偿算法. 文献[6]提出利用角速率求取角增量的拟合算法,推导了角速率输入的圆锥误差补偿算法的补偿系数. 文献[7-8]提出了以角速率为输入信号,任意子样数圆锥补偿算法的一般形式. 这些采用角速率作为输入的圆锥补偿算法都假定陀螺具有理想的频率特性即能输出理想值. 工程实际中陀螺都具有一定的动态特性,若将理想角速率作为输入的圆锥补偿算法应用于工程实际存在局限.

针对光纤陀螺、MEMS(Micro Electro Mechanical System)陀螺等直接输出角速率,且为了消除高频噪声经常采用低通滤波,使陀螺具有一定的动态特性(频率特性),本文研究了考虑陀螺频率特性的角速率输入圆锥补偿算法.

1　圆锥运动理想旋转矢量增量

旋转矢量可以唯一地确定载体的姿态,当用旋转矢量描述载体的姿态时,有如下旋转矢量微分方程[9]:

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}\times\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{\Phi^2}\left[1-\frac{\Phi\sin\Phi}{2(1-\cos\Phi)}\right]\boldsymbol{\Phi}\times(\boldsymbol{\Phi}\times\boldsymbol{\omega}) \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{\Phi}$ 为旋转矢量;$\boldsymbol{\omega}$ 为载体角速率矢量;Φ 为旋转矢量的模.

当忽略高次项时,式(1)可以简化为

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}\times\boldsymbol{\omega} \tag{2}$$

假设在姿态更新周期内对陀螺角速率进行 N 次采样. 姿态更新周期 H 和陀螺采样周期 h 的关系如图 1 所示.

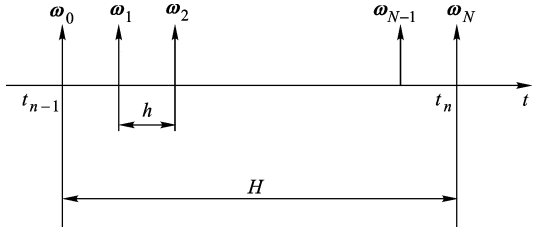

图 1　H 与 h 之间关系

圆锥运动是一种恶劣的运动环境条件,通常采用圆锥运动来设计捷联惯导姿态算法. 典型的圆锥运动角速率矢量[10-11]可以表示为

$$\boldsymbol{\omega}=a\Omega\cos\Omega t\boldsymbol{I}+b\Omega\sin\Omega t\boldsymbol{J} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{I},\boldsymbol{J}$ 为载体系相互正交的单位向量;a,b 分别为沿载体系 $\boldsymbol{I},\boldsymbol{J}$ 轴的圆锥运动幅度;Ω 为圆锥运动频率.

当载体按式(3)所示的小角度运动时,式(2)可以简化为

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{2}\boldsymbol{A}(t)\times\boldsymbol{\omega} \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{A}(t)=\int_0^t\boldsymbol{\omega}\mathrm{d}t$.

对于第 n 个姿态解算周期,对式(4)进行积分可得理想旋转矢量增量[11]为

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{\Phi}=&\int_{t_{n-1}}^{t_n}\left[\boldsymbol{\omega}+\frac{1}{2}\boldsymbol{A}(t)\times\boldsymbol{\omega}\right]\mathrm{d}t=\\&a(\sin\Omega t_n-\sin\Omega t_{n-1})\boldsymbol{I}-\\&b(\cos\Omega t_n-\cos\Omega t_{n-1})\boldsymbol{J}+\\&\frac{1}{2}ab\Omega H\left(1-\frac{\sin\Omega t_n-\sin\Omega t_{n-1}}{\Omega H}\right)\boldsymbol{K}\end{aligned} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{K}$ 为载体系与 $\boldsymbol{I},\boldsymbol{J}$ 相互正交的单位向量.

2　圆锥运动计算旋转矢量增量

假设载体按式(3)作圆锥运动且惯性测量单元中 3 个相互正交的陀螺的频率特性一致,则考虑陀螺的频率特性时,陀螺输出的角速率为

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{\omega}}=&af(\Omega)\Omega\cos[\Omega t+\varphi(\Omega)]\boldsymbol{I}+\\&bf(\Omega)\Omega\sin[\Omega t+\varphi(\Omega)]\boldsymbol{J}\end{aligned} \tag{6}$$

式中,$f(\Omega)$ 为陀螺的幅频特性;$\varphi(\Omega)$ 为陀螺的相频特性.

实际姿态算法对旋转矢量进行积分时,使用的是式(6)所示的陀螺输出角速率,因此计算旋转矢量增量为

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{\boldsymbol{\Phi}}=&\int_{t_{n-1}}^{t_n}\left[\tilde{\boldsymbol{\omega}}+\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{A}}(t)\times\tilde{\boldsymbol{\omega}}\right]\mathrm{d}t=\\&\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(t_n)+\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{A}}(t_{n-1})\times\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(t_n)+\delta\boldsymbol{\Phi}\end{aligned} \tag{7}$$

式中,$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(t)=\int_{t_{n-1}}^{t}\tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathrm{d}t$;$\tilde{\boldsymbol{A}}(t)=\int_0^t\tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathrm{d}t$;$\delta\boldsymbol{\Phi}$ 为圆锥补偿量并且有 $\delta\boldsymbol{\Phi}=\frac{1}{2}\int_{t_{n-1}}^{t_n}\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(t)\times\tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathrm{d}t$.

式(6)代入式(7)可得采用实际陀螺输出计算的旋转矢量增量:

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{\boldsymbol{\Phi}}=&af(\Omega)\{\sin[\Omega t_n+\varphi(\Omega)]-\\&\sin[\Omega t_{n-1}+\varphi(\Omega)]\}\boldsymbol{I}-\\&bf(\Omega)\{\cos[\Omega t_n+\varphi(\Omega)]-\\&\cos[\Omega t_{n-1}+\varphi(\Omega)]\}\boldsymbol{J}+\\&\frac{1}{2}abf^2(\Omega)(\sin\Omega H+\\&\sin\varphi(\Omega)\{\cos[\Omega t_n+\varphi(\Omega)]-\\&\cos[\Omega t_{n-1}+\varphi(\Omega)]\}-\end{aligned}$$

$$\cos\varphi(\Omega)\{\sin[\Omega t_n+\varphi(\Omega)]-\sin[\Omega t_{n-1}+\varphi(\Omega)]\})\boldsymbol{K}+\delta\boldsymbol{\Phi} \tag{8}$$

角速率输入的圆锥补偿算法的一般形式[8]为

$$\delta\boldsymbol{\Phi}=h^2\sum_{i=1}^{N}k_i(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{N-i}\times\tilde{\boldsymbol{\omega}}_N) \tag{9}$$

式中,k_i 为圆锥补偿算法系数.

在式(6)所描述的角速率情况下,姿态解算周期中不同采样时间的角速率叉乘为

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_i\times\tilde{\boldsymbol{\omega}}_j=abf^2(\Omega)\Omega^2\sin\Omega h(j-i)\boldsymbol{K}=abf^2(\Omega)\Omega^2\sin\lambda(j-i)\boldsymbol{K} \tag{10}$$

式中,$\lambda=\Omega h$.

从式(10)可以看出,$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_i\times\tilde{\boldsymbol{\omega}}_j$ 仅与相对时间间隔$(j-i)$有关,而与绝对时间无关. 将式(10)代入式(9),可得圆锥补偿值为

$$\delta\boldsymbol{\Phi}=abf^2(\Omega)\lambda^2\sum_{i=1}^{N}k_i\sin\lambda i\boldsymbol{K} \tag{11}$$

3 改进圆锥补偿算法推导

根据式(9)圆锥补偿算法的关键是要求得圆锥补偿算法系数,下面对改进的圆锥补偿算法进行推导.

圆锥补偿误差定义为采用实际陀螺输出计算的旋转矢量增量与理想的旋转矢量增量之差. 即

$$\boldsymbol{\Phi}_\varepsilon=\Delta\tilde{\boldsymbol{\Phi}}-\Delta\boldsymbol{\Phi} \tag{12}$$

因为 $\Delta\tilde{\boldsymbol{\Phi}},\Delta\boldsymbol{\Phi}$ 的 $\boldsymbol{I},\boldsymbol{J}$ 分量都为零均值交流项,忽略零均值的交流项,则只剩下 $\boldsymbol{K}$ 轴分量,式(12)可以写成

$$\boldsymbol{\Phi}_{\varepsilon\boldsymbol{K}}=(\Delta\tilde{\boldsymbol{\Phi}}-\Delta\boldsymbol{\Phi})_{\boldsymbol{K}}=\frac{1}{2}abf^2(\Omega)\sin\Omega H+abf^2(\Omega)\lambda^2\sum_{i=1}^{N}k_i\sin\lambda i-\frac{1}{2}ab\Omega H \tag{13}$$

定义归一化的算法误差[4]为

$$E_c=\frac{2f^2(\Omega)\lambda^2}{\Omega H}\sum_{i=1}^{N}k_i\sin\lambda i-\left[1-\frac{f^2(\Omega)}{\Omega H}\sin\Omega H\right] \tag{14}$$

则式(13)可以写成

$$\boldsymbol{\Phi}_{\varepsilon\boldsymbol{K}}==\frac{1}{2}ab\Omega HE_c \tag{15}$$

为了求得最优的圆锥补偿系数,即要归一化的算法误差为0,则式(14)可以写成

$$\sum_{i=1}^{N}k_i\lambda^2\sin\lambda i=\frac{\Omega H-\sin\Omega H}{2}+\frac{\Omega H}{2}\left(\frac{1-f^2(\Omega)}{f^2(\Omega)}\right) \tag{16}$$

定义

$$g(\lambda)=\frac{1-f^2(\lambda/h)}{f^2(\lambda/h)} \tag{17}$$

则式(16)可以写成2个等式,即

$$\sum_{i=1}^{N}k_i'\lambda^2\sin\lambda i=\frac{1}{2}(N\lambda-\sin N\lambda) \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{N}k_i''\lambda^2\sin\lambda i=\frac{1}{2}N\lambda g(\lambda) \tag{19}$$

式中,$N\lambda=\Omega H$.

且有

$$k_i=k_i'+k_i'' \tag{20}$$

因此最优圆锥补偿系数等价于求解式(18)和式(19),然后把结果相加. 式(18)和文献[7-8]采用理想陀螺数据时是一致的,式(18)的解k_i'可以看成是陀螺理想情况下的最优圆锥补偿系数,式(19)的解 k_i''可以看成是考虑陀螺的频率特性时对陀螺理想情况下圆锥补偿系数的修正量.

按算法优化准则,要使式(18)、式(19)中 λ 的低次幂相等. 对式(18)两边进行泰勒展开,使 λ 的不高于 $2N+1$ 阶项相等,可以得到 N 个方程,写成矩阵的形式有

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{k}'=\boldsymbol{y} \tag{21}$$

式中,$\boldsymbol{A}$ 矩阵的元素为 $A_{i,j}=(-1)^{i+1}j^{2i-1}/(2i-1)!$;$\boldsymbol{k}'$为理想圆锥补偿算法系数向量,可以写成$\boldsymbol{k}'=[k_1'\quad k_2'\quad\cdots\quad k_N']^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{y}$ 向量的元素为 $y_i=(-1)^{i+1}N^{2i+1}/[2(2i+1)!]$.

对线性方程组式(21)求解可得理想圆锥补偿算法系数:

$$\boldsymbol{k}'=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{y} \tag{22}$$

假设陀螺动态特性的传递函数为

$$G(s)=\frac{c_0+c_1s+c_2s^2+\cdots+c_ms^m}{d_0+d_1s+d_2s^2+\cdots+d_ns^n} \tag{23}$$

幅频特性可以表示为

$$f(\Omega)=\frac{\sqrt{(c_0-c_2\Omega^2+\cdots)^2+(c_1\Omega-c_3\Omega^3+\cdots)^2}}{\sqrt{(d_0-d_2\Omega^2+\cdots)^2+(d_1\Omega-d_3\Omega^3+\cdots)^2}} \tag{24}$$

将式(24)代入式(17),可知 $g(\lambda)$ 是偶函数,对 $g(\lambda)$ 在进行泰勒展开时,所有关于 λ 的奇次项都为零. 考虑到在直流输入的情况下放大倍数为1,因此有 $f(0)=1$,即 $g(0)=0$. $g(\lambda)$ 的泰勒展开为

$$g(\lambda)=\sum_{i=1}^{\infty}\frac{\left.\frac{\mathrm{d}^{2i}g(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda^{2i}}\right|_{\lambda=0}}{(2i)!}\lambda^{2i} \tag{25}$$

对式(19)两边同时进行泰勒展开,使 λ 的不高于 $2N+1$ 阶项相等,可以得到 N 个方程,写成矩

阵的形式有

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{k}'' = \boldsymbol{z} \tag{26}$$

式中,$\boldsymbol{k}''$为理想圆锥补偿算法系数修正向量,且写成分量形式有 $\boldsymbol{k}'' = [k_1''\quad k_2''\quad \cdots\quad k_N'']^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{z}$ 向量的元素为 $z_i = \dfrac{N\mathrm{d}^{2i}g(\lambda)}{2(2i)!\ \mathrm{d}\lambda^{2i}}\bigg|_{\lambda=0}$.

对线性方程组式(26)求解可得对理想情况下圆锥补偿系数的修正量:

$$\boldsymbol{k}'' = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{z} \tag{27}$$

此时,仅考虑误差主项,改进的角速率输入圆锥补偿算法漂移误差为

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{\varepsilon K} = \frac{abf^2(\Omega)\lambda^{2N+3}\left(\sum_{j=1}^{N}A_{N+1,j}k_j - y_{N+1} - z_{N+1}\right)}{H} \tag{28}$$

4　应用示例与仿真分析

4.1　理想角速率输入圆锥补偿算法

1) 在姿态更新周期内对陀螺角速率进行 2 次采样,即 $N=2$ 时

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -\dfrac{1}{6} & -\dfrac{4}{3} \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \dfrac{2}{3} \\ -\dfrac{2}{15} \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{k}' = \begin{bmatrix} \dfrac{28}{45} \\ \dfrac{1}{45} \end{bmatrix}$$

2) 在姿态更新周期内对陀螺角速率进行 3 次采样,即 $N=3$ 时

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -\dfrac{1}{6} & -\dfrac{4}{3} & -\dfrac{9}{2} \\ \dfrac{1}{120} & \dfrac{4}{15} & \dfrac{81}{40} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \dfrac{9}{4} \\ -\dfrac{81}{80} \\ \dfrac{243}{1\,120} \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{k}' = \begin{bmatrix} \dfrac{2\,619}{2\,240} \\ \dfrac{27}{56} \\ \dfrac{87}{2\,240} \end{bmatrix}$$

上述理想角速率输入圆锥补偿算法结果与文献[5,7-8]中的结果一致.

4.2　考虑频率特性对理想算法系数修正量

4.2.1　陀螺频率特性为惯性环节

假设陀螺的传递函数为惯性环节,则传递函数可以写成

$$G(s) = \frac{1}{Ts+1} \tag{29}$$

式中,T 为时间常数.

幅频特性为

$$f(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(T\Omega)^2+1}} \tag{30}$$

将式(30)代入式(17)可得

$$g(\lambda) = \frac{T}{h^2}\lambda^2 \tag{31}$$

1) 当 $N=2$ 时

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \dfrac{T}{h^2} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\qquad \boldsymbol{k}'' = \begin{bmatrix} \dfrac{4T}{3h^2} & -\dfrac{T}{6h^2} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

2) 当 $N=3$ 时

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \dfrac{3T}{2h^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{k}'' = \begin{bmatrix} \dfrac{9T}{4h^2} & -\dfrac{9T}{20h^2} & \dfrac{T}{20h^2} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

4.2.2　陀螺频率特性为振荡环节

假设陀螺的传递函数为振荡环节,则传递函数可以写成

$$G(s) = \frac{\omega_{\mathrm{n}}^2}{s^2+2\zeta\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2} \tag{32}$$

式中,ζ 为振荡环节阻尼比;ω_{n} 为自然振荡频率.

幅频特性为

$$f(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{\Omega}{\omega_{\mathrm{n}}}\right)^2\right]^2+\left(2\zeta\dfrac{\Omega}{\omega_{\mathrm{n}}}\right)^2}} \tag{33}$$

将式(33)代入式(17)可得

$$g(\lambda) = \frac{4\zeta^2-2}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}\lambda^2 + \frac{1}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^4}\lambda^4 \tag{34}$$

1) 当 $N=2$ 时

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \dfrac{4\zeta^2-2}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^2} \\ \dfrac{1}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{k}'' = \begin{bmatrix} \dfrac{16\zeta^2-8}{3(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}+\dfrac{2}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \\ -\dfrac{2\zeta^2-1}{3(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}-\dfrac{1}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \end{bmatrix}$$

2) 当 $N=3$ 时

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \dfrac{6\zeta^2-3}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^2} \\ \dfrac{3}{2(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \\ 0 \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{k}'' = \begin{bmatrix} \dfrac{18\zeta^2-9}{2(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}+\dfrac{39}{8(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \\ -\dfrac{18\zeta^2-9}{10(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}-\dfrac{3}{(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \\ \dfrac{2\zeta^2-1}{15(\omega_{\mathrm{n}}h)^2}+\dfrac{3}{8(\omega_{\mathrm{n}}h)^4} \end{bmatrix}$$

4.3　仿真分析

以在姿态更新周期内对陀螺角速率进行 3 次采样 $N=3$ 时为例,陀螺的频率特性分别为惯性环节和振荡环节,惯性环节的时间常数 T 为 0.001 s,振荡环节的阻尼比 ζ 为 0.7,ω_{n} 为 1 000 rad/s. 在圆锥运动条件下对本文的圆锥补偿算法与传统的理想角速率输入的圆锥算法进行比较.

圆锥运动幅值 a,b 都为 1°,陀螺采样周期 h 为 0.005 s,考察 $\boldsymbol{K}$ 轴算法漂移误差与圆锥运动频率的关系,陀螺频率特性为惯性环节的仿真结果如图 2 所示,陀螺频率特性为振荡环节的仿真结果如图 3 所示. 图中算法漂移误差曲线纵坐标为取对数后的曲线.

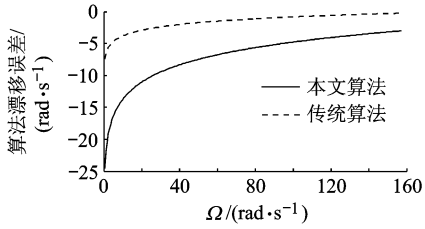

图 2 惯性环节下算法漂移误差与 Ω 的关系

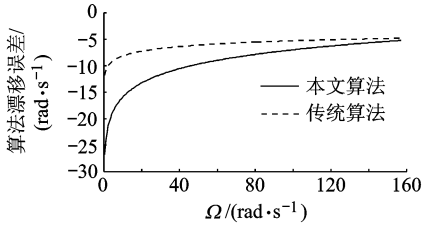

图 3 振荡环节下算法漂移误差与 Ω 的关系

圆锥运动幅值 a,b 都为 1°,$\Omega=100$ rad/s,考察 $\boldsymbol{K}$ 轴算法漂移误差与陀螺采样频率的关系,陀螺频率特性为振荡环节的仿真结果如图 4 所示. 图中算法漂移误差曲线纵坐标为取对数后的曲线.

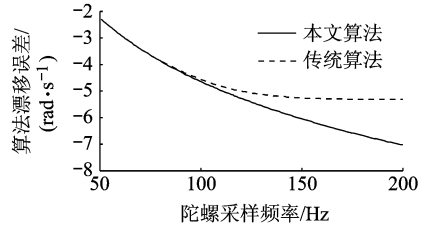

图 4 振荡环节下算法漂移误差与陀螺采样频率关系

从图 2、图 3 可以看出,在相同的圆锥运动频率下,考虑频率特性的角速率输入圆锥补偿算法比传统角速率输入圆锥算法的漂移误差明显降低. 因此,本文的算法在精度上比传统角速率输入圆锥补偿算法在精度上有明显提高. 在陀螺采样频率一定的情况下两种算法的漂移误差都随圆锥运动频率的增大而增大. 从图 4 可以看出,两种算法漂移误差都随陀螺采样频率增大而减小,但本文算法漂移误差衰减得更快.

5 结 论

本文提出了考虑陀螺频率特性的角速率输入圆锥补偿算法. 得到了公式化求解考虑频率特性的各子样最优算法系数的方法. 给出了动态特性为惯性环节和振荡环节下求取最优圆锥补偿系数的应用实例. 通过仿真证明了当陀螺含有频率特性时所提出的算法比传统角速率输入圆锥补偿算法在精度上有明显提高. 对提高工程应用中角速率输入的姿态算法的精度具有实用价值.

参考文献(References)

[1] Miller R B. A new strapdown attitude algorithm[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1983, 6(4): 287-291

[2] Jiang Y F, Lin Y P. Improved strapdown coning algorithms[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 484-490

[3] Mark J G, Tazartes D A. Tuning of coning algorithms to gyro data frequency response characteristics[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(4): 641-647

[4] Ignagni M. Optimal sculling and coning algorithms for analog sensor systems[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(3): 851-860

[5] 魏晓虹,张春熹,朱奎宝. 一种高精度角速率圆锥补偿算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(12): 1312-1316
Wei Xiaohong, Zhang Chunxi, Zhu Kuibao. High accuracy coning compensate algorithm by angular velocity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(12): 1312-1316(in Chinese)

[6] 曾庆化,刘建业,熊智,等. 一种角速率激光陀螺惯导系统高精度姿态算法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2159-2163
Zeng Qinghua, Liu Jianye, Xiong Zhi, et al. A high accuracy attitude algorithm of ring laser gyro strapdown inertial navigation system with pure angle rate output[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(12): 2159-2163(in Chinese)

[7] 杨胜,房建成. 角速率输入下圆锥补偿算法的一般形式[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 920-924
Yang Sheng, Fang Jiancheng. General formulas of coning compensation algorithm with angular rate input[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 920-924(in Chinese)

[8] Ben Y Y, Sun F, Gao W, et al. Generalized method for improved coning algorithms using angular rate[J]. IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems, 2009, 45(4): 1565-1572

[9] Bortz J E. A new mathematical formulation for strapdown inertial navigation[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7(1): 61-66

[10] 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

[11] Savage P G. Explicit frequency shaped coning algorithms for pseudoconing environments[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(3): 774-782

(编 辑:赵海容)