

捷联式光学导引头视线角速率解耦与估计

孙婷婷^{1,2}, 储海荣¹, 贾宏光¹, 张跃¹, 李岩¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为准确估计捷联导引头视线角速率, 建立了全捷联导引头数学模型, 根据弹目运动相对关系进行视线角速率解耦与估计算法研究。首先, 建立了全捷联导引头数学模型, 并利用 Taylor 级数对其进行线性化; 接着, 根据弹目运动几何学与坐标系相对关系推导视线角速率解耦算法; 然后, 针对捷联导引头无法直接测量体视线角速率的问题, 提出微分+稳态 Kalman 滤波方法估计体视线角速率; 最后, 建立视线角速率解耦与估计算法验证系统并进行仿真实验, 结果表明: 解耦算法绝对误差小于 5×10^{-5} rad/s, 相对误差小于 0.3%, 验证了解耦算法的正确性; 在包含导引头数学模型条件下, 采用角频率为 19.2 rad/s 的稳态 Kalman 滤波器, 视线角速率估计误差小于 4×10^{-3} rad/s, 较直接微分方法的估计误差提高近一个量级。视线角速率解耦与估计算法同时能满足制导系统对精度与动态性能的要求。

关键词: 捷联式光学导引头; 视线角速率; 稳态 Kalman

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1587-07

Line-of-sight angular rate decoupling and estimation of strapdown optical seeker

Sun Tingting^{1,2}, Chu Hairong¹, Jia Hongguang¹, Zhang Yue¹, Li Yan¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to accurately estimate the line-of-sight (LOS) angular rate of the strapdown seeker, strapdown seeker mathematical model was established, decoupling and estimation algorithm of LOS angular rate was based on the movement of the missile and target relative relationship. Firstly, a mathematical model of the strapdown seeker was established, and the Taylor series was used for its linearization. Secondly, according to the movement of the missile and target geometry and coordinate system relative relationship, the LOS angular rate decoupling algorithm was derived. Strapdown seeker can not directly measure the body line-of-sight (BLOS) angular rate, differential coefficient+steady-state Kalman filter was proposed to estimate the BLOS angular rate. Finally, LOS angular rate decoupling and estimation algorithm verification system was established and simulation experiment was carried out. The results showed that, the absolute error of decoupling algorithm was less than 5×10^{-5} rad/s and relative

收稿日期: 2013-09-04; 修订日期: 2013-10-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重大项目; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

作者简介: 孙婷婷(1989-), 女, 硕士生, 主要从事飞行器导航制导与控制等方面的研究。Email: joystt@163.com

导师简介: 贾宏光(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事飞行器总体技术等方面的研究。Email: jiahg@ciomp.ac.cn

error was less than 0.3%, the correctness of the decoupling algorithm was verified. Under the conditions of containing seeker mathematical model, the steady-state Kalman filter was used by the angular frequency of 19.2 rad/s, LOS angular rate estimation error was less than 4×10^{-3} rad/s, nearly an order of magnitude was improved than direct differentiation method estimation error. The decoupling and estimation algorithm of the LOS angular rate can at the same time meet the requirements of the guidance system accuracy and dynamic performance.

Key words: strapdown optical seeker; line-of-sight angular rate; steady-state Kalman

0 引言

现代局部战争对精确制导武器的发展提出了较高要求,除了要求命中精度高外,还要求其具备重量轻、体积小、成本低、可靠性高等特点。传统框架式导引头具有较大的总视场角,且能够直接提取制导系统所需的视线角速率信息,但由于框架的存在,使其结构复杂,重量增大,且降低了系统的可靠性。随着大面阵、高分辨率成像器件的迅速发展,捷联式导引头在制导系统中应用成为重要的研究方向,并在美国“长钉”导弹上得到较好应用。捷联式光学导引头将光学系统、相机和图像处理等部分直接固联在载体基座上,降低了结构复杂性与成本,提高了可靠性;取消框架使总的视场角降低,可以采用高分辨率成像器件提高角分辨率;但捷联导引头不能直接提取制导系统所需的视线角速率信号,因此,需要设计合适的解耦算法与估计算法。

目前国内外学者已开展对捷联式光学导引头视线角速率估计方面的研究。R.D.Ehrich^[1]采用附加速率补偿方法进行单通道视线角速率重构;Emmert R I^[2]利用抖动自适应加滤波与微分网络形成视线角速率,此方法对导引头精度要求适中,但只能用于低机动制导武器中;Smita Sadhu^[3]等利用扰动观测器估计视线角速率;Jacques Waldmann^[4],焦迎杰^[5]等分别采用扩展 Kalman 与无迹 Kalman 滤波技术估计惯性视线角速率。以上估计算法均基于导引头体视线角速率已知或者可通过弹目相对运动加速度、速度与距离等信息估计,而对于捷联式光学导引头不能测量弹目相对运动学关系与提供体视线角速率的问题,文中从捷联导引头数学模型出发,推导视线角速率解耦算法,利用微分+稳态 Kalman 滤波器估计体视线角速率,并通过仿真分析视线角速率的估计精度。

1 坐标系及其关系

捷联导引头模型和解耦算法需要在地理坐标系、弹体坐标系、视线坐标系和体视线坐标系中进行研究。各坐标系定义如下:

(1) 地理坐标系 $Ox_e y_e z_e$: 取载体和地球中心连线与地球表面交点 O 为坐标系原点, Ox_e 轴取在当地水平面内指向东, Oy_e 轴沿当地地垂线方向并且指向天顶, Oz_e 轴方向按右手法则确定。

(2) 弹体坐标系 $Ox_b y_b z_b$: 原点 O 选在导弹瞬时质心上; Ox_b 轴与导弹纵轴重合, 指向导弹头部为正; Oy_b 轴位于导弹纵向对称面内且与 Ox_b 轴垂直, 指向上为正; Oz_b 轴按右手法则确定。

(3) 视线坐标系 $Ox_s y_s z_s$: 以导弹质心 O 为原点; 导弹与目标连线方向取为 Ox_s 轴, 且指向目标为正; Oz_s 轴在惯性坐标系确定的水平面内且垂直于 Ox_s 轴; Oy_s 轴按右手法则确定。

(4) 体视线坐标系 $Ox_l y_l z_l$: 原点取为导弹质心 O ; Ox_l 轴指向导弹与目标连线方向, 指向目标为正。 Oz_l 轴在弹体坐标系确定的 $Ox_b z_b$ 平面内并且垂直于 Ox_l 轴。 Oy_l 轴按右手法则确定。

各坐标系之间的转换关系如图 1 所示, 其中 θ 、 ψ 、 γ 分别为俯仰角、偏航角与滚转角, q_α 与 q_β 分别为体视线高低角与方位角, q_γ 与 q_λ 分别为视线高低角与视线方位角, q_c 为视线变换角。

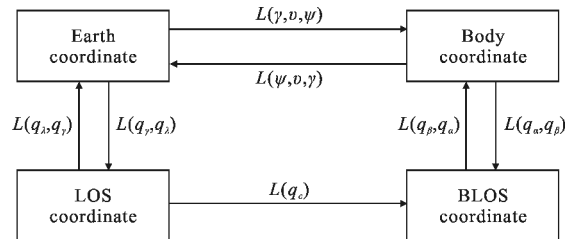


图 1 各坐标系之间的转换关系

Fig.1 Rotation relationship among coordinates

2 捷联导引头数学模型

2.1 捷联导引头数学模型

捷联式导引头主要由光学系统、相机及图像跟踪器组成,其特性主要由计算延迟、光学与探测器测角及采样保持输出决定,模型^[6]如图 2 所示。

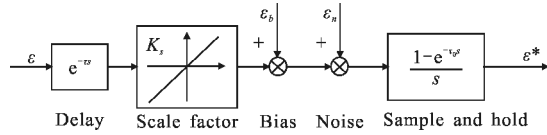


图 2 捷联导引头模型

Fig.2 Starupdown seeker model

图中, ε 为体视线角, 即弹目视线与弹轴的夹角, τ 为相机和图像处理延迟时间, K_s 为刻度因数, 由量化间隔与光学非线性两部分组成, 而光学非线性影响较小; ε_b 为零位误差, ε_n 为由图像处理不确定性造成的误差, τ_0 为采样时间, ε^* 为测量体视线角。捷联导引头数学模型可描述为:

$$\varepsilon^* = \frac{1 - e^{-\tau_0 s}}{s} (\varepsilon_b + \varepsilon_n + K_s e^{-\tau s} \varepsilon) \quad (1)$$

量化误差造成了测量角度值与实际角度值的差别, 通常认为其服从均匀分布, 最大误差值为量化间隔 q , 即 1 个像素所对应的测量角度。零位误差 ε_b 可以通过对导引头的标定与补偿, 使其减少到 1 个像素; 图像处理不确定性造成的误差主要由图像跟踪算法引起, 通常认为其服从均值为 0, 标准差为 1 个像素的正态分布。导引头视场为 $18^\circ \times 14.4^\circ$, 对于分辨率为 640×512 的探测器, 像元分辨率为 0.028° 。

2.2 模型线性化及其频率特性

忽略导引头零位与噪声影响, 捷联导引头模型可以简化为:

$$\varepsilon^*(s) = K_s \frac{1 - e^{-\tau_0 s}}{s} e^{-\tau s} \varepsilon(s) \quad (2)$$

由于导引头中存在延时与采样保持环节, 属于非线性系统。通常对包含捷联导引头的制导控制系统的分析仍采用经典线性系统分析方法, 故需对捷联导引头的模型进行线性化近似。近似方法主要有 Pade' 近似与 Tarloy 级数展开^[7-8]。

对于纯滞后环节, Pade' 近似表示为:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{P(-s)}{P(s)} \quad (3)$$

$$P(s) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{(2n-k)!}{(2n)!} (s\tau)^k \quad (4)$$

式中: n 为 Pade' 近似的阶数; k 为系数。

一阶 Pade' 近似为:

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - 0.5\tau s}{1 + 0.5\tau s} \quad (5)$$

二阶 Pade' 近似为:

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - \frac{1}{2}(\tau s) + \frac{1}{12}(\tau s)^2}{1 + \frac{1}{2}(\tau s) + \frac{1}{12}(\tau s)^2} \quad (6)$$

纯延时环节也可以采用 Taylor 级数零点形式或者极点形式展开, 分别如公式(7)与公式(8)所示。

$$e^{-\tau s} = 1 - \frac{(\tau s)}{1!} + \frac{(\tau s)^2}{2!} - \frac{(\tau s)^3}{3!} + \frac{(\tau s)^4}{4!} - \dots \quad (7)$$

$$e^{-\tau s} = \frac{1}{1 + \frac{(\tau s)}{1!} + \frac{(\tau s)^2}{2!} + \frac{(\tau s)^3}{3!} + \frac{(\tau s)^4}{4!} + \dots} \quad (8)$$

Pade' 近似方法的两种近似形式均为非最小相位系统, 不便于理论分析。同时 Taylor 级数零点展开形式的分子阶数高于分母阶数, 经典控制理论分析方法要求分子阶数小于等于分母阶数, 故零点展开形式也不适于系统分析。极点展开形式为最小相位系统, 满足线性系统分析条件, 故对纯延时环节采用极点展开形式进行。

对纯延时环节分别进行一阶至四阶 Taylor 级数极点展开, 并绘制 Bode 图, 如图 3 所示。

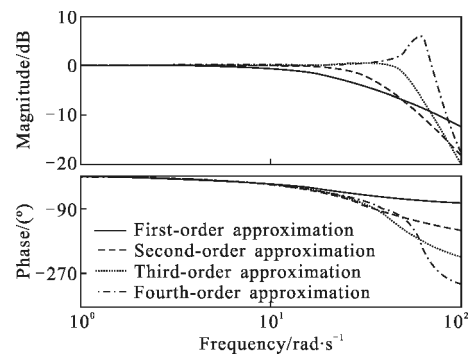


图 3 纯延时环节 Taylor 级数极点近似 Bode 图

Fig.3 Taylor series poles approximation Bode plot of pure delay loop

由图 3 可知, 二阶 Taylor 展开在 50 rad/s 频率范围内与四阶展开具有相同的精度, 为计算与分析简便, 采取二阶 Taylor 作为延时环节等效传递函数。

导引头环节传递函数可以线性化为:

$$\varepsilon^*(s) = K_s \frac{\frac{\tau_0^2 s}{2} \tau_0}{\left(\frac{(\tau_0 s)^2}{2} + \tau_0 s + 1\right) \left(\frac{(\tau_0 s)^2}{2} + \tau s + 1\right)} \quad (9)$$

3 视线角速率提取

3.1 视线角速率解耦算法

捷联导引头测量的体视线角中包括了目标相对于惯性空间的视线角和弹体姿态角两部分，而导弹制导所需惯性视线角速率需要从体视线角信号中去除弹体运动信息。可以通过不同坐标系之间的相对旋转关系推导视线角速率解耦算法^[9]。

根据弹目相对运动的几何关系，目标在视线坐标系和体视线坐标系中的坐标 X^l 与 X^s 均为 $[R \ 0 \ 0]^T$ ，则目标在弹体坐标系以及地理坐标系中的坐标 X^b 与 X^e 分别为：

$$X^b = C_1^b X^l \quad (10)$$

$$X^e = C_s^e X^s \quad (11)$$

且有：

$$X^e = C_b^e X^b \quad (12)$$

则：

$$C_s^e = C_b^e C_1^b \quad (13)$$

通过公式(13)可以分别求出视线高低角 q_γ 与视线方位角 q_λ 。

$$q_\gamma = \arcsin(R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta) \quad (14)$$

$$q_\lambda = -\arctan \frac{R_{31} \cos q_\beta + R_{32} \tan q_\alpha - R_{33} \sin q_\beta}{R_{11} \cos q_\beta + R_{12} \tan q_\alpha - R_{13} \sin q_\beta} \quad (15)$$

从图 1 可以看出，由地理坐标系转换到视线坐标系可以通过下面两条途径来实现。

第一条途径由地理系经弹体系、体视线系到视线坐标系，视线坐标系相对于地理坐标系的旋转角速度在地理坐标系中表示为 Ω_{es}^e ，

$$\Omega_{es}^e = C_b^e (\Omega_{eb}^b + \Omega_{bl}^b) + C_s^e \Omega_{ls}^s \quad (16)$$

式中： Ω_{ls}^s 为视线坐标系相对于体视线坐标系的旋转角速度在视线坐标系中的表示，

$$\Omega_{ls}^s = [-\dot{q}_c \ 0 \ 0]^T \quad (17)$$

Ω_{bl}^b 为体视线坐标系相对于体坐标系的旋转角速度在体坐标系中的表示，

$$\Omega_{bl}^b = [\dot{q}_\alpha \sin q_\beta \ \dot{q}_\beta \ \dot{q}_\alpha \cos q_\beta]^T \quad (18)$$

Ω_{eb}^b 为弹体坐标系相对于地理坐标系的旋转角速度在弹体坐标系中的表示，

$$\Omega_{eb}^b = [\omega_{x1} \ \omega_{y1} \ \omega_{z1}]^T \quad (19)$$

(2) 直接根据视线坐标系与地理坐标系之间的旋转关系可得：

$$\Omega_{es}^e = [\dot{q}_\gamma \sin q_\lambda \ \dot{q}_\lambda \ \dot{q}_\gamma \cos q_\lambda]^T \quad (20)$$

综合以上公式(16)~(20)，并利用公式(14)与公式(15)，经过计算求得惯性视线角速率 \dot{q}_γ 与 \dot{q}_λ 。

$$\begin{aligned} \dot{q}_\gamma = & \frac{1}{\sqrt{1 - (R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta)^2}} \times \\ & \{ (\omega_{x1} + \dot{q}_\alpha \sin q_\beta) [(R_{22} R_{31} - R_{11} R_{32}) \sin q_\alpha + (R_{11} R_{33} - R_{13} R_{31}) \times \\ & \cos q_\alpha \sin q_\beta] + (\omega_{y1} + \dot{q}_\beta) [(R_{11} R_{32} - R_{12} R_{31}) \cos q_\alpha \cos q_\beta + \\ & (R_{12} R_{33} - R_{13} R_{32}) \cos q_\alpha \sin q_\beta] + (\omega_{z1} + \dot{q}_\alpha \cos q_\beta) [(R_{11} R_{33} - \\ & R_{13} R_{31}) \cos q_\alpha \cos q_\beta + (R_{12} R_{33} - R_{13} R_{32}) \sin q_\alpha] \} \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_\lambda = & \frac{1}{\sqrt{1 - (R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta)^2}} \times \\ & \{ (\omega_{x1} + \dot{q}_\alpha \sin q_\beta) [R_{21} - (R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - \\ & R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta) \sin q_\alpha] + (\omega_{y1} + \dot{q}_\beta) [R_{22} - (R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + \\ & R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta) \sin q_\alpha] + (\omega_{z1} + \dot{q}_\alpha \cos q_\beta) [R_{23} - \\ & (R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta) \sin q_\alpha] \} \quad (22) \end{aligned}$$

要求解惯性视线角及视线角速率，需要知道 $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}, \psi, \vartheta, \gamma, q_\alpha, q_\beta, \dot{q}_\alpha, \dot{q}_\beta$ 这 10 个量。其中，弹体角速度 $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ 可由惯性测量单元直接测量得到，姿态角 ψ, ϑ, γ 可通过捷联惯导算法直接解算得到，体视线角 q_α, q_β 由导引头图像跟踪器直接测量得到。而对于体视线角速率 $\dot{q}_\alpha, \dot{q}_\beta$ 可以通过光流法、微分网络或滤波器等方法估计。

3.2 体视线角速率估计

光流法不仅携带了弹体与目标的运动信息，还携带了有关景物三维结构的丰富信息，它能够在不知道场景的任何信息的情况下，检测出运动目标。但在实际应用过程中，由于遮挡性、多光源、透明性和噪声等原因，使得亮度恒定、小运动及空间一致等假设条件不能满足，故不能求解出正确的光流场，同时光流法计算复杂，计算量巨大，不能满足实时的要求。针对光流法存在不能实时应用的问题，故提出微

分+稳态 Kalman 滤波算法估计体视线角速率。

稳态 Kalman 滤波器传递函数^[10]为:

$$G_k(s) = \frac{1 + 2s/\omega_0 + 2s^2/\omega_0^2}{1 + 2s/\omega_0 + 2s^2/\omega_0^2 + s^3/\omega_0^3} \quad (23)$$

式中: ω_0 为 Kalman 滤波器的自然频率。

从导引头体视线角估计体视线角速率的结构框图如图 4 所示。

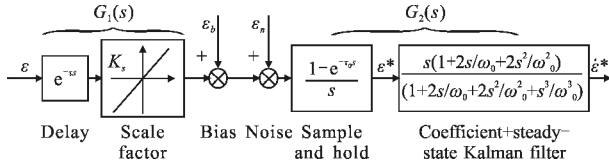


图 4 体视线角速率估计原理图

Fig.4 Schematic of BLOS rate estimation

体视线角速率计算公式可以表示为:

$$\dot{\epsilon}^*(s) = G_2(s)(G_1(s)\epsilon + \epsilon_b + \epsilon_n) \quad (24)$$

式中: $G_1(s)$ 为延时环节与刻度因数环节的传递函数,

$$G_1(s) = \frac{K_s}{\frac{(\tau s)^2}{2} + \tau s + 1} \quad (25)$$

$G_2(s)$ 为采样保持环节与微分+稳态 Kalman 滤波器的传函,

$$G_2(s) = \frac{\tau_0 \left(\frac{\tau_0 s}{2} + 1 \right)}{\left(\frac{(\tau_0 s)^2}{2} + \tau_0 s + 1 \right)} \frac{s(1 + 2s/\omega_0 + 2s^2/\omega_0^2)}{(1 + 2s/\omega_0 + 2s^2/\omega_0^2 + s^3/\omega_0^3)} \quad (26)$$

体视线角速率精度可以用均方根误差表示,由图 4 可知,体视线角速率均方根误差为体视线角均方根误差、零位误差、图像处理误差等综合形成的均方根误差,即

$$\sigma_\epsilon = \sqrt{\sigma_\epsilon^2 + \sigma_{\epsilon_b}^2 + \sigma_{\epsilon_n}^2} \quad (27)$$

系统输出的均方根值可用系统的传函 $G(\omega)$ 与输入功率谱密度 $G_X(\omega)$ 表示为^[11]:

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_X(\omega) |G(\omega)|^2 d\omega \quad (28)$$

假定白噪声的单边功率谱密度 $\phi_a(\omega) = K_a^2$, 输出功率谱密度可以通过等效噪声带宽方法进行计算^[12], 可得:

$$\sigma^2 = K_a^2 I \quad (29)$$

式中: I 为等效噪声带宽。

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega \quad (30)$$

积分 I 在现代控制理论中等于系统 G 的 H_2 范数的平方, 即

$$I = \|G\|^2 \quad (31)$$

根据公式(27), 公式(29)与公式(31), 体视线角速率精度表示为:

$$\sigma_{\dot{\epsilon}} = \sqrt{\|G_2\|^2 (\|G_1\|^2 K_\epsilon^2 + K_{\epsilon_b}^2 + K_{\epsilon_n}^2)} \quad (32)$$

在导引头硬件系统确定后, 传函 G_1 与 G_2 中的采样保持环节即可确定, 可通过设计稳态 Kalman 滤波器的自然频率 ω_0 使体视线角速率精度在要求范围内, 同时保证其具有一定的带宽。

4 实验与分析

4.1 仿真实验原理

为验证视线角速率估计算法的正确性及估计精度, 建立如图 5 所示的视线角速率解耦算法验证系

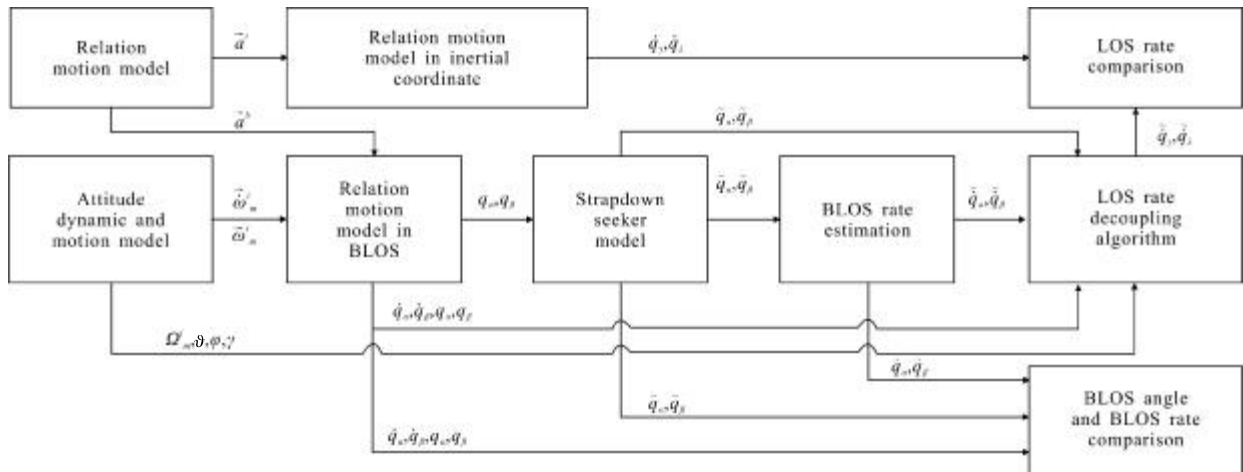


图 5 视线角速率解耦算法验证框图

Fig.5 Verification block diagram of LOS rate decoupling algorithm

统^[13]。弹目相对运动模块产生惯性系与弹体系下的弹目相对运动加速度 \vec{a}^i 与 \vec{a}^b ，惯性坐标系下弹目相对运动学关系可直接求解得到视线角速率 \dot{q}_γ 与 \dot{q}_λ ；惯性系弹体姿态动力学模块根据弹体动力学模型输出三轴角加速度 $\vec{\omega}_m^i$ ，角速度 $\vec{\omega}_m^i$ 及姿态角 ϑ 、 φ 、 γ ；根据以上姿态动力学信息与弹体坐标系下运动加速度，体视线系下弹目运动学模块可以计算体视线角 q_α 、 q_β 与体视线角速率 \dot{q}_α 、 \dot{q}_β ；全捷联电视导引头只能测量得到估计体视线角 \hat{q}_α 与 \hat{q}_β ，再利用微分+稳态 Kalman 滤波器进行体视线角估计可得 $\dot{\hat{q}}_\alpha$ 与 $\dot{\hat{q}}_\beta$ ；视线角速率解耦算法利用以上信息估计视线角速率 \dot{q}_γ 与 \dot{q}_λ ；最后，通过对比即可验证解耦算法的正确性与估计精度。

全捷联导引头参数如表 1 所示。假设弹体三轴角加速度均为幅值 19.1(°)/s²，角频率为 1 Hz 的正弦运动，角速度与姿态角初值均为 0，弹目初始相对位置为 3 937 m，初始相对速度为 170 m/s，初始相对加速度为 8.3 m/s²。同时考虑估计精度与滤波器带宽，设定稳态 Kalman 滤波器输出精度与输入精度比为 0.8，则自然频率 ω_0 取为 19.2 rad/s，Kalman 滤波器带宽为 54.3 rad/s。

表 1 捷联导引头参数表

Tab.1 Strapdown seeker parameters table

Index	Parameters
Camera delay	0.02 s
Resolution ratio	0.028 (°)/pix
Zero-order-hold	0.02 s
Bias error	Uniform distribution U(0,0.028°)
Image processing uncertainty	Normal distribution N(0,0.028°)
Quantized error	Uniform distribution U(0,0.028°)
Scale factor K_s	Uniform distribution U(0.66,1.33)

4.2 结果与分析

在不考虑全捷联导引头模型与体视线角速率估计算法时(即图 5 中两个环节均为 1)，视线角速率的计算曲线如图 6 所示，理论计算与解耦算法解算的视线角速率结果一致，绝对误差小于 5×10^{-5} rad/s，相对误差小于 0.3%，验证了视线角速率解耦算法的

正确性。

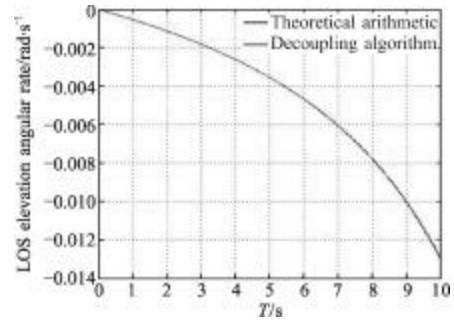


图 6 视线角速率解耦算法曲线

Fig.6 LOS angular rate decoupling algorithm curve

在仿真中加入全捷联电视导引头模型，分别利用直接微分算法与直接微分+稳态 Kalman 滤波算法进行视线角速率估计，图 7 与图 8 分别为体视线角速率与视线角速率估计曲线，图 9 为视线角速率误差曲线，采用直接微分+稳态 Kalman 滤波算法估计视线角速率误差小于 0.004 rad/s，较直接微分算法估计结果 0.04 rad/s 提高近一个数量级，保证了视线角速率估计精度。同时稳态 Kalman 滤波器的带宽为 54.3 rad/s，能够满足一般空对地制导武器采用比例制导视线角速率动态特性需求^[14]。

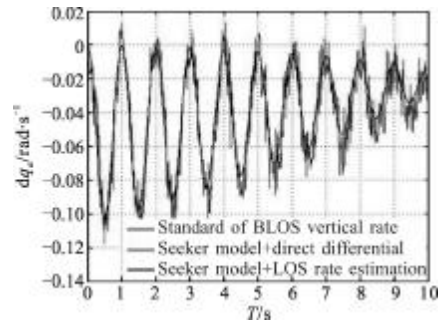


图 7 体视线高低角速率估计曲线

Fig.7 BLOS elevation angular rate estimated curve

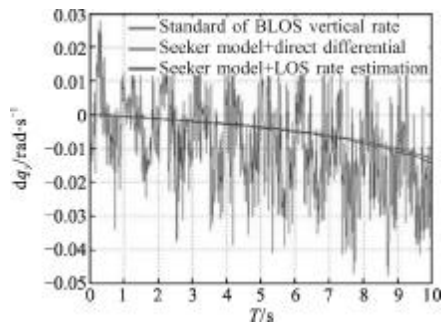


图 8 视线高低角速率估计曲线

Fig.8 LOS elevation angular rate estimated curve

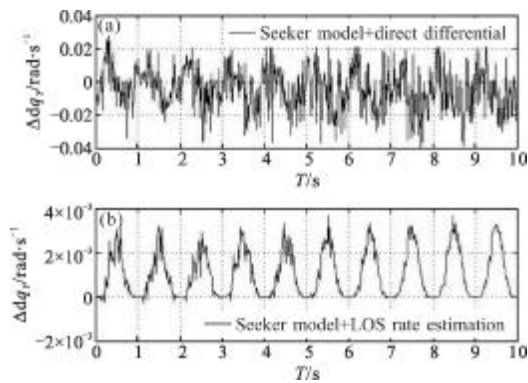


图9 视线高低角速率估计误差曲线

Fig.9 LOS elevation angular rate estimation error curve

5 结论

捷联式光学导引头因其结构简单、可靠性高、成本低等特点已经得到实际应用,但其无法直接输出制导所需的视线角速率。文中对捷联式光学导引头进行数学建模与线性化分析,推导了全模型视线角速率解耦算法,并采用微分+稳态 Kalman 滤波器估计捷联导引头体视线角速率及其精度。仿真实验表明,视线角速率解耦算法与理论计算值的绝对误差小于 5×10^{-5} rad/s,验证了解耦算法的正确性;加入捷联导引头模型,并采用稳态 Kalman 滤波器后估计得到的视线角速率误差小于 0.004 rad/s,且其动态特性能够保证制导要求。文中提出的视线角速率解耦与估计算法可为全捷联式光学导引头在制导系统中应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] Ehrich R D, Vergez Lt P. Strapdown seeker technology for the terminal guidance of tactical weapons[R]. AD-A092606, 1980.
- [2] Emmert R I, Ehrich R D. Strapdown seeker guidance for air-surface tactical weapons[R]. ADB030995, 1978.
- [3] Smita Sadhu, Ghoshal T K. Sight line rate estimaion in missile seeker using disturbance observer-based technique[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(2): 449-454.
- [4] Jacques Waldmann. Line-of-sight rate estimation and linearizing control of an imaging seeker in a tactical missile guided by proportional navigation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 556-567.
- [5] Jiao Yingjie, Wang Xiao, Chen Zhijian. Application of strap-down homing guidance technology in short-range guided rocket[J]. Journal of Project, Rocket, Missiles and Guidance, 2012, 32(1): 13-17. (in Chinese)
焦迎杰, 王潇, 陈志坚. 捷联寻的制导技术在近程制导火箭中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 13-17.
- [6] Zhang Yiguang, Yang Jun, Zhu Xueping, et al. Uncooled Infrared Imaging Seeker[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009. (in Chinese)
张义广, 杨军, 朱学平, 等. 非制冷红外成像导引头[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- [7] Daniel Raviv, Djaja Eddy W. Technique for enhancing the performance of discretized controllers [J]. Control Systems, IEEE, 1999, 19(3): 52-57.
- [8] Partington J R. Some frequency-domain approaches to the model reduction of delay systems [J]. Annual Reviews in Control, 2004, 28(1): 65-73.
- [9] Yao Yu, Zhang Guojiang. Discussion on strapdown imaging guidance system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 1-6. (in Chinese)
姚郁, 章国江. 捷联成像制导系统的若干问题探讨 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 1-6.
- [10] Paul Zarchan, Howard Musoff. Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, Third Edition [M]. US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2009.
- [11] Garnell P. Guided Weapon Control Systems. Royal Military College of Science [M]. Revised by Qi Z K, Xia Q L. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [12] Wang Guangxiong, He Lian. Gontrol System Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
王广雄, 何联. 控制系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [13] Zhang Yue, Chu Hairong. Strapdown optical seeker characteristics and multi-dimension optimal guidance law[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 2967-2973. (in Chinese)
张跃, 储海荣. 捷联式光学导引头特性与多维度最优制导律[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2967-2973.
- [14] Wang Jiaxin, Lin Defu, Qi Zaikang. Effect of strapdown seeker disturbance rejection rate on stability of PNG system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2608-2613. (in Chinese)
王嘉鑫, 林德福, 祁载康, 等. 全捷联导引头隔离度对制导稳定性的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2608-2613.