

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.003

单通道防空导弹电子稳像过程中的噪声分析及处理

朱华勇, 卜彦龙, 沈林成

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对单通道防空导弹电子稳像过程中的噪声干扰问题进行研究。通过对各种成像噪声成因、特性的分析, 首先将闪烁噪声和抖动噪声分别进行建模, 随之建立了含噪声稳像模型。基于该模型提出了基于小波滤波与加权平滑的去噪处理方法, 利用小波保持时域局部特性的优点达到去噪。仿真实验表明, 该方法能够有效去除影响稳像的成像噪声。

关键词: 导弹电子稳像; 成像噪声; 小波

中图分类号: TP79;V241 **文献标识码:** A

Noises Analyzing and Processing for Digital Image Stabilization in Single Channel-Controlled Air Defense Missile

Zhu Huayong, Bu Yanlong, Shen Lincheng

(School of Electromechanical Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Noise processing method in the course of digital image stabilization for single channel-controlled air defense missile was studied. Through analyzing the reason and characteristics of image noise, firstly model of glint noise and fluctuating noise was established based on the analysis of basic process of missile digital image stabilization, afterward, image stabilization model on the consideration of imaging noises was constructed. On the basis of the model, denoise algorithm based on the wavelet was proposed, through which local characteristic of signal was kept and imaging noise was cut down effectively. Simulation experiment validates the algorithm can effectively cur down noise.

Keywords: digital image stabilization for missile; imaging noises; wavelet

0 引言

采用单通道控制方式的红外寻的防空导弹, 利用尾翼偏角产生气动力使导弹以一定转速绕纵轴旋转。导弹自旋创造了用一个通道同时完成俯仰方向和偏航方向控制的条件, 可以有效减少弹上设备。但在红外寻的制导时, 弹体的自旋会对导引头成像产生耦合作用, 使图像序列不能真实反应出目标相对于导弹质心的运动, 继而影响到控制信号的生成, 使导弹不能精确跟踪目标。目前, 解决弹旋耦合问题成熟的方法是通过陀螺等硬件装置, 导引头光轴固定于一个二自由度进动陀螺转子上, 利用陀螺定轴性隔离外界扰动, 从而消除弹体绕质心角运动的耦合影响。为了提高处理速度并减轻重量, 可通过电子稳像技术来解决弹旋解耦问题, 但精确性会受到导引头成像面上不同噪声的干扰。算法应用较困难。故对导弹电子稳像过程中, 噪声对自转角速度的影响及滤除方法进行研究。

1 导弹电子稳像技术

单通道红外寻的防空导弹电子稳像技术, 其实

质是基于图像的弹旋解耦, 首先要求将导引头固连于弹体头部, 使其随导弹纵轴同步旋转, 以带有旋转耦合的目标图像序列作为输入信号。电子稳像解耦流程如图 1, 先利用图像算法从耦合轨迹中实时估计出自转角速度, 再结合导弹实时的角速度信息和相位信息对图像进行反转补偿, 从而形成能反映目标相对导弹质心位置的新的图像序列, 同时, 提供用于比例导引规则的视线角速度参数。

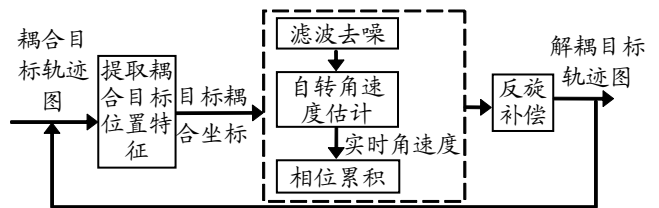


图 1 导弹电子稳像解耦流程

由于单通道防空导弹运动方式的特殊性, 导弹旋转将对图像造成极大的影响。故在运动估计与补偿中需要依靠导弹—目标相对运动成像模型。文献[1-2]建立了单通道导弹成像模型, 并推导了解耦算法。研究中发现, 自转角速度估计是导弹电子稳像过程的核心和难点, 其估计方法一方面依靠成像模

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-04-14

资助项目: 国家安全重大基础研究项目(6138101001); 湖南省自然科学基金(07JJ3127)。

作者简介: 朱华勇(1971-), 男, 浙江人, 从事智能控制、任务规则、图像处理与飞行器任务规划研究。

型，另一方面与导弹的真实角速度值紧密相关。估计自旋角速度 ω 是分 2 个过程进行的。首先，按照圆周运动规律得到自旋角速度近似值 $\hat{\omega}'$ ，但由于真实轨迹并不为圆周，因此近似值与 $\omega(t)$ 是存在算法误差的；然后将轨迹按照 $-\hat{\omega}'$ 反转，得到新的轨迹图像，在新轨迹图中通过几何关系，求取角速度补偿值 $\hat{\omega}_1$ ，用关系式 $\hat{\omega} = \hat{\omega}' + \hat{\omega}_1$ 作为自旋角速度的最终估计值。

2 噪声分析与建模

文献[1]中的稳像解耦是在理想情况下进行的，即成像面上运动轨迹完全由模型生成，不存在任何噪声干扰。但在图像解耦的实际应用中，会遇到各种噪声的干扰。按照产生原因的不同，噪声主要分为：成像元件的颗粒噪声、热噪声等内部噪声，目标点热源变化产生的闪烁噪声（glint）以及弹体振动产生的抖动噪声。内部噪声通过中值滤波等技术可以有效地去除，故重点研究闪烁噪声和抖动噪声的处理方法。

2.1 闪烁噪声分析

实际的红外跟踪系统中，由于目标像点的闪烁会使目标位置量测受到非常复杂的非高斯噪声干扰，其中目标闪烁的表现为：由于目标不同部位的反射干扰，对其量测位置的一种非常明显的随机摆动，使目标的量测表现出非高斯噪声特性，一般假定目标的量测噪声为 glint 噪声^[3-5]。glint 噪声是一种具有很长拖尾特性的非高斯分布噪声，其概率密度函数可以通过 t 分布或者高斯分布与其它分布的合成加以表征^[5]。这种非平稳的、非高斯的量测噪声会影响图像中目标位置的确定，继而影响到图像旋转中心的准确估计。

对 glint 噪声一种比较常用的描述方法是高斯分布和拉普拉斯分布的合成，其密度函数可表示为：

$$f(x) = (1 - \varepsilon)f_g(x) + \varepsilon f_l(x) \tag{1}$$

其中， ε 为一小于 1 的正常数，表示闪烁出现的概率； $f_g(x)$ 、 $f_l(x)$ 分别表示高斯分布和拉普拉斯分布的密度函数，在一维零均值情况下可表示为：

$$f_g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad f_l(x) = \frac{1}{2\eta} \exp\left(-\frac{|x|}{\eta}\right) \tag{2}$$

式中， σ 、 η 分别为高斯分布的标准偏差和拉普拉斯分布的分布参数。

2.2 抖动噪声分析

导弹的振动特性主要包括 2 方面的内容：一是固有特性，即固有频率、振型、阻尼比以及振型斜率等；二是动响应、动载荷分析等。其中，对固有特性的研究占主导地位^[6]。而弹体的振动会叠加到导引头图像中，将这种振动对目标像点的影响也看作是一种噪声，称之为抖动噪声^[7]。通常，抖动噪声都带有明显的周期特性，将利用这个性质去除主要的抖动干扰。

2.3 含噪声稳像模型

将成像面上 2 个方向的噪声看作 2 个独立量 y_n 与 z_n ，分别添加文献[1]给出的耦合模型中，得出含噪声的电子稳像模型如下：

$$\begin{bmatrix} y_G \\ z_G \end{bmatrix} = f \cdot L(\omega(t) \cdot t) \begin{bmatrix} (y_s'' - R \cos \Omega(t) \cdot t) / x_s + y_n \\ (z_s'' - R \sin \Omega(t) \cdot t) / x_s + z_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中， $y_n = y_{glint} + y_{vibrate}$ ， $z_n = z_{glint} + z_{vibrate}$ ，表示噪声干扰； y_G 、 z_G 表示成像面上目标的实时位置； x_s 、 y_s'' 、 z_s'' 表示目标解耦后的坐标； f 表示镜头焦距； $\omega(t)$ 表示导弹实时自旋角速度； $\Omega(t)$ 表示进动角速度； R 表示弹头处由进动引起的圆周半径。

3 基于小波滤波与加权平滑的去噪处理

闪烁噪声和抖动噪声都会使目标在成像面上的像点位置与实际值发生偏差。设目标在成像面上的理想坐标为 $I = [y_c, z_c]^T$ ，被噪声干扰后，实际观测坐标为 $I' = [y_c', z_c']^T$ ，闪烁噪声为 w_1 ，抖动噪声为 w_2 ， I 、 I' 、 w_1 、 w_2 都是二维坐标点，则各参量满足下式：

$$I' = I + w_1 + w_2 \tag{4}$$

小波分解思想是将信号通过不同的高通与低通滤波器族，分别得到信号的高频与低频成分。通常，噪声表现为信号的高频成分，因此保留小波分解后的低频成分，同时抑制其高频成分，就实现了去噪的目的。由于运动的连续性，理想信号序列 $I(n)$ 变化相对稳定，运动轨迹比较光滑，成为观测序列 $I'(n)$ 的低频部分。而噪声信号序列 $w_1(n) + w_2(n)$ 则变化相对剧烈，从噪声模型来看，其幅度不大，成为观测序列 $I'(n)$ 的高频部分。由于式 (4) 各参量中二维数据是相互独立的，在设计滤波器时，可以将其视作 2 个独立的一维样本集合分别进行滤波处理。

对信号 $I'(n)$ 小波去噪的方法如图 2， $I'(n)$ 经过 i 层分解，将每次的高频分量 $g_i(n)$ 置零，并利用其低

频分量 $h_i(n)$ 进行延拓并重构后的结果作为实际信号 $I(n)$ 的估计值, 得到估计信号 $\hat{I}(n)$ 。

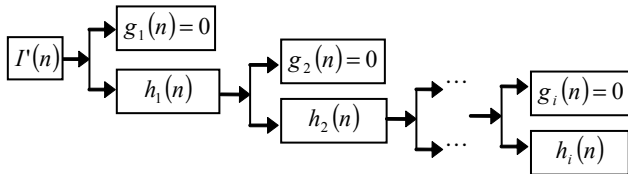


图 2 观测信号的小波去噪示意图

但这样的结果并不能直接用于补偿角速度的计算, 由于补偿值 $\hat{\omega}_i$ 的计算完全根据其运动间的几何关系得出, 所以对坐标的偏差非常敏感。原始信号经小波滤波以后虽然去除了主要的高频噪声, 但曲线并不光滑, 必须做相应的平滑处理之后, 才能将轨迹信息运用于运动估计中去。选择既有效又简单的加权平滑方法, 即将小波滤波后的两组一维信号

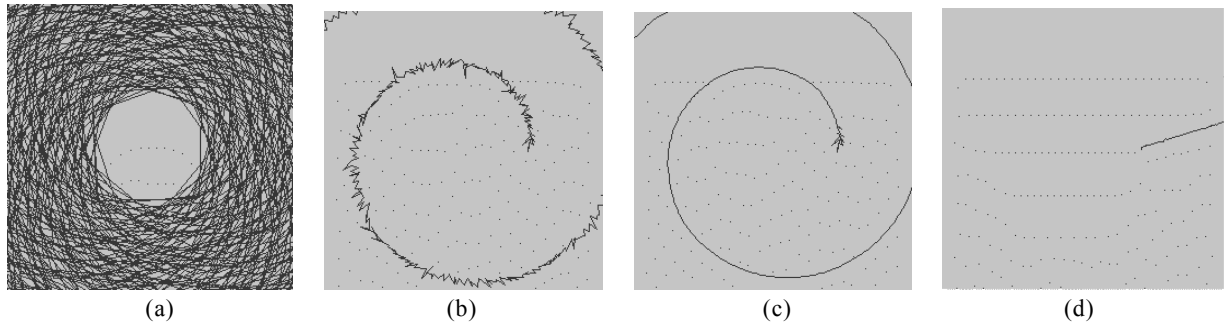


图 3 滤波前后轨迹图

图 3(a) 是原始轨迹图, 既存在运动耦合, 也存在噪声耦合, 因此轨迹非常杂乱, 图 3(b) 是经过近似估计后的轨迹, 去除了主要的运动耦合, 但轨迹还有旋转趋势, 并且其中显示出严重的噪声干扰, 导致角速度精确估计算法不能应用, 图 3(c) 是采用基于小波滤波与加权平滑的方法对图 3(b) 去噪后的结果, 图 3(d) 是根据图 3(c) 的轨迹点对角速度

分别进行一次加权平均处理, 加权时每次去相连的 10 个信号, 各信号权重由中心向两边线性减小, 权重总和为 1, 由此实现了对闪烁噪声和抖动噪声的去除。

4 仿真实验与结论

为验证去噪方法的可行性, 下边对含有运动耦合和噪声耦合的轨迹图进行角速度跟踪实验。角速度跟踪采用文献[1]提出近似估计与精确估计相结合的算法, 含噪声轨迹图由式 (3) 含噪声稳像模型仿真生成。为了不影响核心问题, 假设目标作匀速直线运动, 依照式 (1) 在目标像点运动过程中添加 glint 噪声, 参数为 $\sigma = 3, \eta = 3, \varepsilon = 0.5$, 并加入形式为 $A \sin 2\pi \bar{f} t$ 的抖动噪声, $A = 3 \text{ pix}, \bar{f} = 300 \text{ Hz}$ 。首先进行滤波前后轨迹图的比较, 如图 3。

精确估计并完成电子稳像后的结果, 可以看出, 此时, 目标轨迹已经恢复出直线运动, 同时实现了弹旋角速度较精确的跟踪。

下边对角速度跟踪结果进行分析。图 4(a) 给出不进行去噪处理的角速度跟踪结果, 图 4(b) 是经过小波滤波与加权平滑去噪的跟踪结果。实验中, 真实角速度变化幅度为 0.05 r/s , 采用 9-7 小波系数。

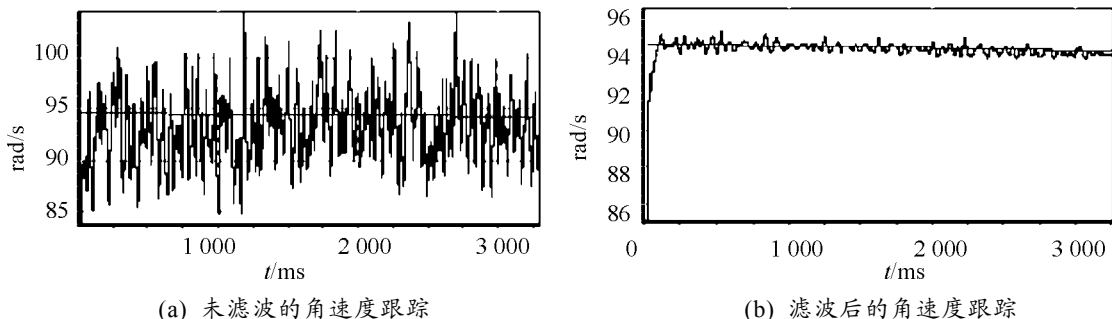


图 4 存在成像噪声后 $\hat{\omega}$ 跟踪曲线

从图 4 中可看出, 当目标运动耦合原始轨迹已经被成像噪声严重干扰后, 若不使用滤波器, 由于补偿角速度对目标点坐标的敏感性, 估计角速度将

出现大幅度的抖动, 已不能作为控制系统的输入, 如图 4(a), 而通过滤波处理如图 4(b), 主要的估计噪声已被消除, 对 ω 的跟踪能够稳定在 0.3 r/s 之内。

(下转第 12 页)

表 2 3 种型号雷达干扰弹效能的模型解

参数	型号		
	落地式 干扰弹	悬浮式 干扰弹	箔条 干扰弹
θ	1	0.875	0.563
S_1^-	0	0.35	0
S_2^-	0	0	0.113
S_1^+	0	0.6	0.5
S_2^+	0	0	0
S_3^+	0	1.1	0.6
S_4^+	0	0.4	0.6
λ_1	1	1.4	0.9
λ_2	0	0	0
λ_3	0	0	0

2.3 结果分析

由表 1 可知, DMU₁ 为 DEA 有效, DMU₂、DMU₃ 为非 DEA 有效。由 $X = \theta \cdot X_j - S^-$, $Y = Y_j + S^+$, 可以算出 DMU₂、DMU₃ 的投影值。

对于 DMU₂, $S_1^- > 0$, S_1^+ 、 S_3^+ 、 $S_4^+ > 0$, 说明投掷偏差过大, 最大投掷距离、最大干扰时间、频段覆盖范围没有达到最大值。 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1.4 > 1$, 说明 DMU₂ 为规模效益递减, 当投掷偏差和支出费用递增, 干扰效能会低于输入的增长倍数。其投影值为:

$$X = \theta \cdot X_2 - S^- = 0.875 \times \begin{pmatrix} 2 \\ 16 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0.35 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.4 \end{pmatrix},$$

$$Y = Y_2 + S^+ = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1.4 \\ 0.3 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0 \\ 1.1 \\ 0.4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.4 \\ 1.4 \\ 1.4 \end{pmatrix}$$

这说明 DMU₂ 要 DEA 有效, 投掷偏差、支出费用分别要减小 0.6 和 0.2。

对于 DMU₃, $S_2^- > 0$, S_1^+ 、 S_3^+ 、 $S_4^+ > 0$, 说明支出费用过大, 最大投掷距离、最大干扰时间、频段覆盖范围没达到最大值。 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 0.9 < 1$, 说明 DMU₃ 为规模效益递增, 指当投掷偏差和支出费用递增时, 干扰效能会高于输入的增长倍数。其投影值为:

$$X = 0.563 \times \begin{pmatrix} 1.6 \\ 1.8 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0.113 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix},$$

$$Y = Y_2 + S^+ = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.9 \\ 0.3 \\ 0.3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0.6 \\ 0.6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix}$$

这说明 DMU₃ 要 DEA 有效, 投掷偏差、支出费用分别要减小 0.2 和 0.4。

3 结束语

由于该模型进行了定量计算, 因此, 根据 DEA

模型计算出的结果与实际使用效果比较相似。该模型仅是针对某几种特定弹种建立的指标体系, 对于其他单元, 可视具体情况建立有效模型。

参考文献:

[1] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [2] 刘广军, 左小勇. 防空导弹武器系统的综合评价[J]. 兵工自动化, 2009, 28(10): 21-23.
 [3] 邵国培, 曹志耀, 何俊, 等. 电子对抗作战效能分析[M]. 北京: 解放军出版社, 1998.
 [4] 鲍鸿飞, 赵祚德, 杜毅. DEA 方法在水雷障碍效能评估中的应用[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 66-68.

(上接第 9 页)

仿真实验的环境是 Pentium4 1.4G CPU, BCB 编程。在这种环境下, 系统中相邻两解耦目标点的输出时差不超过 11 ms, 解耦目标点与其对应的真实目标点时差不超过 9 ms, 基本做到了同步。通过实验可以看出, 跟踪过程中误差主要来自 2 个方面, 其一是 glint 噪声及抖动噪声带来的误差, 这是主要的误差来源; 其二是真实角速度变化的幅度对跟踪结果的影响。以上实验及分析证明, 该滤波算法对噪声耦合图像进行去噪是可行的, 无论从速度上还是精度上均可达到较好的结果。

5 结束语

仿真实验表明, 该方法能够有效去除影响稳像的成像噪声, 且具有速度快、精度高的特点。

参考文献:

[1] 卜彦龙, 牛轶峰, 沈林成. 单通道防空导弹导引头图像的弹旋解耦新方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1164-1168.
 [2] 卜彦龙, 沈林成. 单通道红外防空导弹图像解耦方法研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(12): 97-103.
 [3] Hower G.A, Martin R.D, Zeh J. Robust Preprocessing for Kalman Filtering of Glint Noise[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23, 1987, 1: 120-128.
 [4] Wu W.R. Target Tracking with Glint Noise[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 23(1): 174-185.
 [5] 左东广, 韩崇昭, 卞树檀, 等. 闪烁噪声机动目标跟踪的模型集交互跟踪算法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 767-771.
 [6] 黄怀德, 等. 振动工程[下][M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
 [7] 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 259-263.
 [8] 张炜栋, 马林立. 电控罗经航向数据噪声[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 53-55.