

误差功率谱系数加权法在半捷联制导信息提取中的应用

阎胜利¹, 明宝印², 高慧斌¹, 王涛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. 空军装备研究院装备总体论证研究所, 北京 100076)

摘要: 为了解决半捷联成像导引头视线角速率直接提取噪声大的问题, 首先分析了半捷联导引头视线角速率随机噪声的来源, 建立半捷联稳定跟踪控制回路的模型, 推导出各种误差与输出之间的传递特性。在主要的随机误差源统计分析的基础上, 得出主要噪声的功率谱响应, 依据功率谱响应对半捷联视线角速率各构成部分进行加权得出加权视线角速率。为了验证加权视线角速率的有效性, 在制导回路中进行分析仿真, 结果表明, 加权方法能够有效抑制导引头测量信息的噪声。以半实物的方式实现半捷联电视导引头, 在电视导引头完成双闭环后进行扰动隔离及跟踪靶标, 将加权视线角速率提取方法提取制导信息与直接提取方法进行比较, 实验结果表明, 加权提取方法的视线角速率噪声均方差为 0.098 (°)/s, 比直接合成噪声降低了 46%。综上所述, 加权方法可以很好地改善半捷联视线角速率噪声大的问题。

关键词: 视线角速率提取; 半捷联稳定; 半实物仿真; 电视导引头

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0211-07

Application of noise PSD proportion principle on line-of-sight extraction of imaging semi-strapdown seeker

Yin Shengli¹, Ming Baoyin², Gao Huibin¹, Wang Tao¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;
2. The Research Institute on General Development and Evaluation of Equipment, EAAF of PLA, Beijing 100076, China)

Abstract: To depress the guidance message noise of air-to-surface semi-strapdown imaging seeker, the control loop model of stability tracking was established, the transform characteristic of various error and output was derived. The power spectrum response of main noise was obtained. Then, the weighted angular rate of line of sight was gained. In order to verify the validity of the weighted angular rate of line of sight, the simulation were completed in the guidance loop. The results show that the weighted method can effectively compressed the noise measurement information of seeker. The semi-strapdown TV seeker was achieved with semi-physical way, the double closed-loop was completed in TV seeker to make disturbance isolation and track the target. The methods for extracting guided information through weighted angular rate of line of sight and direct extraction methods were compared. The experimental results show that the weighted extraction method of line of sight angular rate noise variance is 0.098 (°)/s, which is lower than the direct synthesis of noise of 46%. The weighted method can improve the problem of large semi-strapdown sight angular rate noise.

Key words: line-of-sight rate extraction; semi-strapdown stabilization; hardware-in-loop simulation; TV imaging seeker

收稿日期: 2011-05-21; 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 中国科学院第三期知识创新工程(2010834456)

作者简介: 阎胜利(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事光电精确末制导总体方面的技术研究工作。Email: yinls@ciomp.cas.cn

0 引言

成像导引头以其精确的制导精度在国内外的导弹武器系统中应用越来越多,而半捷联成像导引头在空地导弹、空空导弹及防空导弹上都有应用。

在空空导弹上应用半捷联技术的有美国第四代空空导弹 AIM-9X^[1],利用半捷联技术减小了负载空间,从而使导引头有极大的离轴角,使导弹的攻击包线扩大。另外,英国的 ASRAAM 空空导弹、德国的 IRIS-T 空空导弹也采用了半捷联技术,第四代空空导弹导引头很多都采用了滚摆式半捷联红外成像导引头^[2-3],典型的空空导弹半捷联导引头如图 1 所示;在空地导弹上应用半捷联技术的有德国的 KEPD-350 防区外发射导弹^[4]。

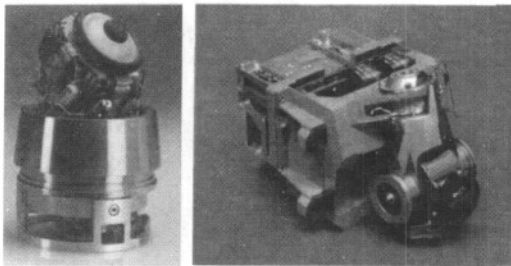


图 1 AIM-9X 空空及 KEPD-350 空地弹红外成像半捷联导引头

Fig.1 Semi-strapdown seeker of AIM-9X and KEPD-350

导引头输出弹目相对运动信息,以形成控制指令给舵机操纵导弹飞行,因此,如何精确提取弹目相对运动信息是导引头控制系统需要考虑的首要问题。导弹制导系统一般采用比例导引规律,需要提取视线角速率,对于平台式导引头,跟踪器输出的误差信号可近似为视线角速率。对于半捷联导引头,直接提取的目标角位置或角速率信息不是相对于惯性空间的,因此不能直接用于比例导引。

半捷联导引头提取相对于惯性空间的光轴视线角速率的方法,是将导引头传感器直接测量得到相对于弹轴目标角位置或角速率,结合弹体惯性器件测量的弹体姿态角或弹体姿态角速率的信息,采用合适的滤波融合算法获取相对惯性空间的视线角速率。

1993 年,美国 Singer 公司和 Kearfott 分部提出了一种采用全捷联仪表的一体化系统设计方案^[5]。

我国近年来才开展捷联制导信息提取的研究,哈尔滨工业大学姚郁教授对于全捷联技术应用于大气层外防空导弹上的问题进行了研究^[6],着重研究了扩展 Kalman 理论用于视线角速率提取的问题。

1 半捷联导引头视线角速率提取

1.1 半捷联光学成像导引头模型

电视导引头主要由头罩、光学系统、探测器、图像跟踪器及双框架陀螺稳定跟踪控制平台组成。光学系统及探测器固定在双框架陀螺稳定平台的内框,半捷联陀螺稳定平台隔离弹体扰动并接受图像跟踪器指令对目标进行跟踪,最后将跟踪的制导信息送到弹体进行制导控制。半捷联光学成像导引头采用双框架稳定控制。

导引头要发现和捕获目标的前提是保持光轴的稳定,而隔离度的大小是影响比例导引制导精度的主要因素,导引头隔离度小,就会将弹体运动角引入导引头,从而进一步影响制导回路的控制性能,有时甚至使制导回路失稳。为了减小隔离度差对制导回路稳定性的影响,必须增加导引时间常数,而时间常数的增加又会增加由目标机动引起的脱靶量^[7]。建立如图 2 的模型。

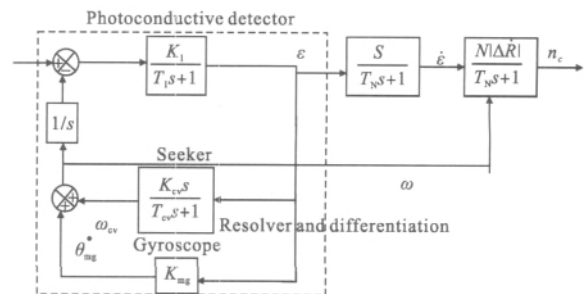


图 2 光学成像导引头系统原理框图

Fig.2 Structure of imaging seeker

1.2 半捷联光学成像导引头直接合成制导信息

寻的导弹实现比例导引需要视线角速率信息。而视线角速率一般是通过微分导引头的跟踪脱靶量 ε 和导引头速率陀螺的输出相加产生。

这样,与平台式导引头相比,半捷联导引头产生比例制导信号的方法为:首先是半捷联导引头的相对测角传感器相对导弹轴线测量平台角速率,然后将视线角速率经过弹体惯导进行坐标变换得到相对于惯性空间的平台角速率,最后再和平台式一样与

脱靶量的微分信号相加,经过比例导引律产生一个垂直于视线的加速度指令送给自动驾驶仪。另外,导引头跟踪目标时,一般误差(脱靶量)很小,当忽略这个小量时,导引头光轴的速率近似为视线速率。如公式(1)所示,导引头光轴速率对视线速率的传递函数可以由图 3 所示的几何关系得到:

$$\dot{q} = \dot{\varepsilon} + \dot{\omega} = \dot{\varepsilon} + \dot{\theta}_{mg} + \omega_{cv} \quad (1)$$

对于攻击固定或者机动能力小的地面目标时,空地导弹成像导引头一般采用比例导引,使过载合理分配并实现高精度打击。而比例导引所需的视线角速率的物理意义是弹目连线在惯性坐标系中的转动速度,弹目运动关系如图 3 所示。

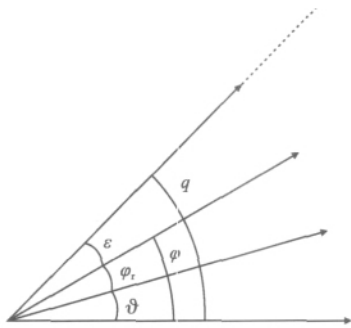


图 3 导引头弹目视线角之间的关系

Fig.3 Relationship between target and missile

图 3 中 ε 是电视脱靶量通过电视跟踪器直接送出, φ_r 是平台框架角通过平台位置传感器直接测量, ϑ 是弹体运动角度可以通过弹体陀螺直接测量, q 是弹目视线角, φ 是光轴角。 $q = \varphi + \varepsilon$, $\varphi = \varphi_r + \vartheta$ 。比例导引的制导信息就是弹目视线角速度,而 $\dot{q} = \dot{\varphi} + \dot{\varepsilon}$,对于传统陀螺稳定平台式导引头,安装在平台框架上的陀螺可以直接获得光轴角速度 $\dot{\varphi}$,再与脱靶量微分合成就可以得到视线角速率。半捷联式稳定导引头不能直接获得光轴角速率,但是可以直接获得 ε , φ_r 及 ϑ ,通过微分的方法获得视线角速率, $\dot{q} = \dot{\varphi}_r + \dot{\varepsilon} + \dot{\vartheta}$ 。

半捷联稳定的视线角速率主要受到弹体扰动,跟踪误差以及传感器误差的影响,关于半捷联稳定视线角速率误差源的构成,需要通过原理框图进行理论推导。半捷联导引头的视线角速率由 3 项构成,而产生这 3 项信号的传感器噪声水平不同,这些传感器噪声对系统的影响也各异。若直接合成三者,必然会引入很大的视线角速率噪声,进而影响弹体的

飞行控制稳定。

1.3 随机误差功率谱响应分析方法

误差功率谱系数加权法是以噪声对闭环系统的响应为基础,设定各种传感器的随机误差水平,以误差为输入,根据闭环系统对随机误差的带通特性,求误差响应的功率谱系数,将视线角速率信号中各组份按照误差功率谱系数加权,以降低视线角速率中的噪声。

线性系统的输出谱密度等于输入谱密度乘以系统的功率增益因子 $|G_c(j\omega)|^2$,设线性系统输入随机信号为 $\mu(t)$,输出为 $y(t)$,从 $\mu(t)$ 到 $y(t)$ 的闭环传递函数为 $G_c(s)$,则系统的输出谱密度和输入谱密度的关系如公式(2)所示:

$$\phi_y(\omega) = |G_c(j\omega)|^2 \cdot \phi_\mu(\omega) \quad (2)$$

输出均方差为:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_y(\omega) d\omega \quad (3)$$

输入噪声可近似为一个带限白噪声,考虑其随机噪声的统计特性表示为:

$$N(\tau) = \frac{1}{2} N_0 \delta(\tau) \quad (4)$$

可以求出输入的谱密度为:

$$\phi_\mu(\omega) = \frac{\varepsilon^2}{2\omega_g} \quad (5)$$

在白噪声作用下,系统输出性能采用等效噪声带宽表征。令 $S=j\omega$,则 $G_c(s)$ 可化为:

$$G_c(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\xi(j\omega) + \omega_n^2} \quad (6)$$

所以带限白噪声作用下系统输出角速度均方误差为:

$$\sigma_v^2 = \int_{-\omega_g}^{+\omega_g} \phi_y(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} |G_c(j\omega)|^2 \cdot \phi_\mu(\omega) d\omega \quad (7)$$

根据图 4 所示的随机噪声功率谱响应原理,进一步推导得:

$$\sigma_v^2 = \frac{\varepsilon^2}{2\omega_g} \int_{-\omega_g}^{+\omega_g} \frac{\omega_n^4}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2} d\omega \quad (8)$$

式中: ω_g 代表输入信号的带宽。速度稳定回路的等效角速度噪声带宽为:

$$\omega_c = \int_{-\omega_g}^{+\omega_g} \frac{\omega_n^4}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 \omega_n^2} d\omega \quad (9)$$

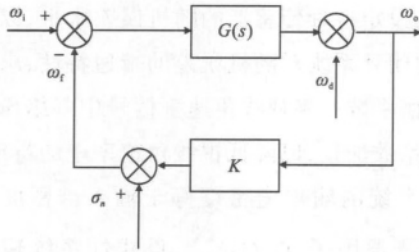


图 4 随机信号响应原理

Fig.4 Response of residual signal

同理可得噪声对系统角度输出的影响，其传递函数为：

$$G_w(s) = \frac{\omega_n(s)}{\varphi(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (10)$$

输出角度均方差为：

$$\sigma_w^2 = \frac{\varepsilon^2}{2\omega_g} \int_{-\omega_g}^{+\omega_g} |G_w(j\omega)|^2 d\omega \quad (11)$$

由输出角速度均方误差和输出角度均方差公式可以看出，经过适当的简化和近似之后，输入噪声对系统角速度和角度输出的影响受控于输入信号带宽 ω_g 、速度环截止频率 ω_n 及阻尼系数 ξ 的综合作用。

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_n^2}{2\omega_g} \int_{-\omega_g}^{+\omega_g} \frac{\omega_n^4}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 \omega_n^2} d\omega \quad (12)$$

2 基于误差功率谱响应系数的半捷联加权视线角速率提取

可以将上节推导结果中误差功率谱响应的系数作为各项的加权系数，将误差功率谱响应系数合理加权配置才能够达到更高的视线角速率精度。将统计得到的各个传感器的随机误差，以 1.3 节分析为基础，对半捷联稳定回路作相应的分析，通过公式(8)~(11)得到几种传感器的加权系数 σ_{D_i} σ_ε σ_{Ncv} σ_G σ_{M_i} ，误差综合求其均方根得 $\sigma = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_{Ncv}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{M_i}^2}$ ，在提取过程中加入系数进行优化组合，得到下面的加权方法提取视线角速率公式：

$$q = \frac{\sigma_\varepsilon \dot{\varepsilon} + \sigma_{mg} \dot{\theta}_{mg} + \sigma_{Ncv} \omega_{cv}}{\sqrt{\sigma_{mg}^2 + \sigma_{Ncv}^2 + \sigma_\varepsilon^2}} \quad (13)$$

3 基于加权制导信息提取的半捷联制导控制模型及其仿真分析

3.1 基于加权制导信息提取的半捷联制导控制回路模型

在半捷联导引头稳定控制模型的基础上建立其制导控制回路模型。图 5 是加入导引头环节的纵向通道制导控制模型，其中虚线框代表简化的导引头，导引头的速度回路和位置回路经过部分简化，导引律采用比例导引规律，弹体稳定回路简化为典型二阶环节，弹目相对运动关系简化为二维平面的位置到角度的关系。

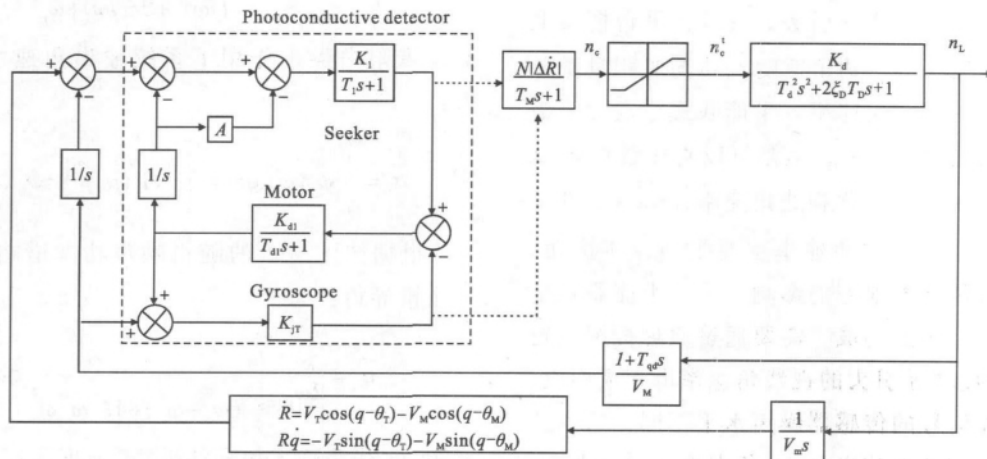


图 5 半捷联导引头制导控制结构框图

Fig.5 Block diagram of guidance and control structure of semi-strap down

由公式可以看到,传递函数主要由导引头跟踪回路动态特性所决定,而且光轴转动速率滞后于视线速率。因为位标器输出的脱靶量 ε 与导引头光轴速率成比例,视线速率信息隐含在脱靶量中。因此,视线速率中的另外一部分可由微分脱靶量得到 $\dot{\varepsilon}$,由于理想微分是做不到的,所以方程必须借助于一个微分网络微分 ε 来实现。瞄准误差的导数与速率陀螺的输出组合在一起。导引系统总传递函数为:

$$\frac{n_c}{\dot{q}} = \frac{N\Delta\dot{R}[1+(T_1+T_N)]}{(1+T_1s)(1+T_Ns)^2} \quad (14)$$

进一步讨论半捷联视线角速率提取问题、对隔离残差影响和进行制导回路稳定性分析。忽略光学头罩斜率和陀螺加速度灵敏度影响,所有参数均参照图 3,其中 n_{cy} 是需用法向过载; \dot{q} 是视线角速率; N 是有效导航比; $\Delta\dot{R}$ 是弹目相对运动速度;而 V_M 是导弹运动速度; T_1 是简化的跟踪时间常数(导引时间常数); K_1 是位标器位置环增益; K_{D1} 是速度环开环增益; K_R 是陀螺增益; T_N 是导引滤波时间常数; T_{qd} 是弹体转动(弹体攻角滞后)时间常数; $\xi_D T_D$ 是弹体过渡过程的参数。系统开环传递函数可以写为:

$$\frac{n_{yc}}{\dot{q}} = \frac{N\Delta\dot{R}T_1}{K_{D1}V_MK_1} \cdot \frac{K_1s^2 - (T_{qd}s+1)T_NK_{fs} - K_R}{(\frac{T_1}{K_1K_{D1}}s^2 + \frac{K_{fs}T_1}{K_1}s+1)(T_Ns+1)^2(T_{qd}s+1)(T_D^2s^2 + 2\xi_D T_Ds+1)} \quad (15)$$

3.2 加权提取方法对制导回路影响分析及仿真

由于半捷联与平台式最大的区别在于稳定回路反馈构成及视线角速度提取的方法,因此借用图 2,反馈回路不变,将平台角速率的构成由原来的陀螺直接提取变为弹上陀螺与测速元件的合成,由于弹体陀螺的非线性比导引头上的小很多,因此只考虑输出的视线角速率噪声。分别采用直接提取和加权方法在 6 自由度弹道上进行仿真,对比俯仰姿态角变化曲线如图 6 所示。

图中,Data 1 是加权视线角速率提取时的曲线,Data 2 是直接合成视线角速率提取的曲线,可以看出:直接合成的姿态角变化剧烈,两条曲线最大姿态角相差为 0.21° 。

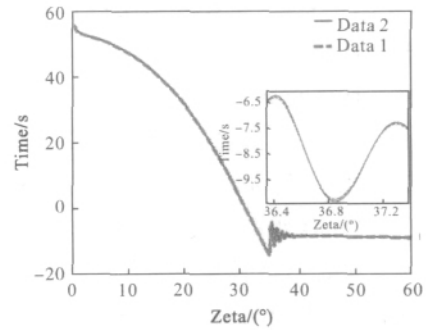


图 6 直接提取与加权提取下的姿态角曲线比较
Fig.6 Construct of direct and weighted extract way

因此,在直接合成半捷联视线角速率提取的情况下,会引起攻角、姿态角等的剧烈变化,而加权视线角速率提取的脱靶量小且姿态变化小;所以文中提出的误差加权半捷联视线角速率提取方法能够有效抑制制导信号中的噪声。

4 半捷联导引头视线角速率提取实验

4.1 基于半实物的半捷联电视导引头实现

半捷联半实物仿真测试系统的功能是完成导引头的速度环和位置伺服控制,在转台配合下进行隔离度摇摆测试;在数字弹道配合的情况下,完成半捷联导引头的制导控制半实物仿真。实验系统结构及实物如图 7 所示。整个系统包括:三轴飞行仿真转

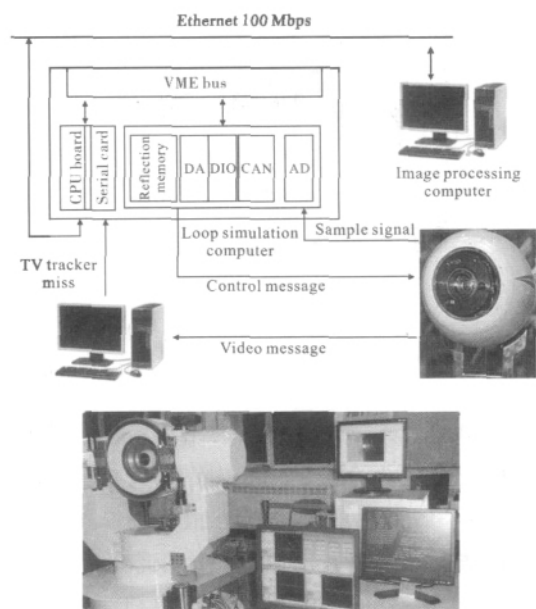


图 7 基于半实物的半捷联电视导引头实现
Fig.7 Hardware in loop based semi-strapdown TV seeker realization

台、高速半实物仿真机、电视导引头以及将它们连接起来的星型光纤网络。

半实物仿真机与导引头平台、基座陀螺、图像跟踪系统构成导引头的稳定跟踪系统,以半实物仿真机为核心,AD 板卡负责电位计、陀螺的模拟信号采集,串口接受从图像跟踪器传送的脱靶量,同时仿真机运行 4 元素坐标转换模块、微分滤波程序模块、速度和位置回路的 PID 校正模块,形成导引头的双通道半捷联稳定及跟踪功能。

4.2 半捷联电视导引头加权视线角速率提取实验

考虑实际电视跟踪器、电位计、陀螺的硬件水平,确定各传感器的随机误差及微分噪声。对于 756 像素、 4° 视场的光学系统来说,像元分辨率 0.0053° ,电视帧频 25 Hz,通过统计得到的结果,可以假定脱靶量微分误差为 $0.256^\circ/\text{s}$;对于 0.2% 线性度的电位计微分,根据统计可以假定进测角微分误差 $0.04^\circ/\text{s}$;挠性速率陀螺由于零偏及比例因子非线性,假定引起测速误差为 $0.06^\circ/\text{s}$ 。

将统计得到的各个传感器的随机误差,以第 2 节分析为基础,对半捷联稳定回路作相应的分析,得到 3 种传感器的加权系数,加权方法提取公式(13),并与原来的直接合成提取方法 $\dot{q} = \dot{\varepsilon} + \dot{\theta}_{\text{mg}} + \dot{\omega}_{\text{cv}}$ 比较,得到下列曲线(见图 8、图 9)。

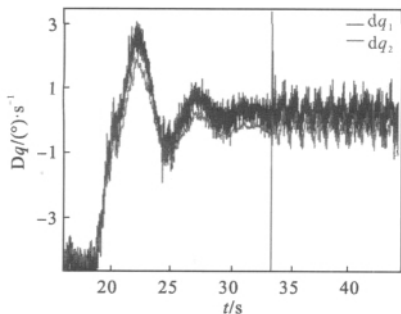


图 8 稳定条件下直接提取与加权提取方法的比较

Fig.8 Comparison of direct and portion extract way when stabilization

其中, dq_1 是直接合成提取的结果,一个周期内的噪声均方根值为 $0.211^\circ/\text{s}$; dq_2 是加权合成提取的结果,一个周期内的噪声均方根值为 $0.098^\circ/\text{s}$ 。因此得出结论:由图 8 可以看出,仅仅在稳定条件下,由于测速噪声的存在,半捷联提取视线角速率由于测速元件的噪声会使提取效果变差;由图 9 可以看出:在跟踪时,噪声水平相差更大是由于脱靶量微

分也会引入很大的噪声;从数据结果看,直接提取方法的噪声水平是加权提取方法的 2 倍以上,所以直接 3 种传感器合成视线角速率的方法不可取,而采用加权系数的方法合成视线角速率比较好。

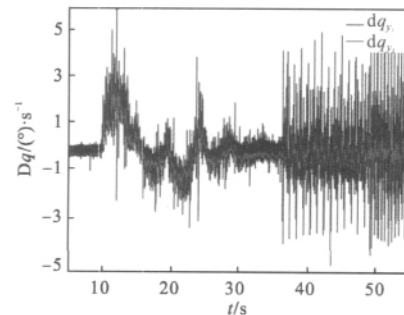


图 9 跟踪条件下直接提取与加权提取方法的比较

Fig.9 Comparison of direct and portion extract way when tracking

5 结论

文中应用随机噪声功率谱响应原理,针对半捷联式导引头的特点,推导了半捷联稳定跟踪回路的模型,采用考虑传感器误差的加权视线角速率提取方法获取制导信息,为了验证算法的有效性,进一步建立半捷联制导回路模型,开展仿真研究。最后在基于半实物的半捷联电视导引头上将加权提取算法进行了实验研究。结果表明:加权合成视线角速率的噪声得到了抑制,说明加权视线角速率提取方法能够有效地抑制由器件噪声引进的误差。该视线角速率提取算法对工程实现有参考意义。

参考文献:

- [1] Yin Shengli, Jia Hongguang, Gao Huibin. Semi-strapdown stabilization of optical imaging seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011(1): 25-27. (in Chinese)
阎胜利, 贾宏光, 高慧斌. 光学成像导引头半捷联稳定 [J]. *红外与激光工程*, 2011(1): 25-27.
- [2] Kennedy P J, Kennedy R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization[C]//IEEE Trans on Control Systems Technology, 2003, 11(1): 3-15.
- [3] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573. (in Chinese)
罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 565-573.
- [4] Zhou Ruiqing, Lv Shanwei, Liu Xinhua. Study of digital

- stabilization technique and simulation for strapdown antenna platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(10): 2234–2247. (in Chinese)
- 周瑞青, 吕善伟, 刘新华. 捷联式天线平台数字稳定技术及仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2234–2247.
- [5] Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, Fan Shixun, et al. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt Precision Eng*, 2006, 14(4): 673–680. (in Chinese)
- 范大鹏, 张智永, 范世珣, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 673–680.
- [6] Riedl G, Assel M, Fendt A, et al. IR focal plane array seekers for ground-to-ground and air-to-ground missiles [C]//SPIE, 2001, 4369: 201–209.
- [7] Peter H Z. Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics [M]. Florida: America Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.

下期预览

二维圆柱层状复周期光子晶体的透射谱

汤晓舟^{1,2}, 王刚³

- (1. 连云港师范高等专科学校 物理与电子工程系, 江苏 连云港 222006 ;
2. 南开大学 信息科学学院, 天津 300071 ;
3. 江苏大学 通信工程系, 江苏 镇江 212003)

摘要: 提出了由圆柱柱体粗细及介电常数差异间隔构成层状复合周期结构二维光子晶体, 用平面波展开方法数值研究了其传输特性, 数值结果表明: 在不同二维圆柱半径层状复周期结构光子晶体透射谱中, 禁带位置、宽度、传导模的出现与间隔层柱体的粗细差异有关, 差异越大, 光子禁带越小, 中心频率位置向低频方向移动; 在不同介电常数构成的层状复周期结构中, 介电常数差异越大, 光子禁带宽度越小, 同样, 中心频率向低频方向移动; 当间隔的层状柱体层数达到一定值时, 没有传导模式出现, 在相同差异条件下, 禁带与传导模式相关, 还与晶格结构类型、电磁波入射面柱体的摆放顺序相关。相关结论为扩展二维光子晶体的应用提供了新的理论依据。