航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 25 2019 Vol. 30 No.04 31-35

直升机海上悬停海浪滤波器研究

巩鹏潇*，王鹏
中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘　要：基于直升机海上悬停飞行试验数据，使用对差分GPS数据和无线电高度数据综合对比的方法，进行了海浪噪声的识别，将其从无线电高度数据中分离了出来。基于此，进行了海浪滤波器的研究，对无线电高度表测得的高度信号和垂直加速度计测得的垂直加速度信号进行组合滤波，构成互补式卡尔曼滤波器，获得了质量比较好的高度信号。

关键词：飞行试验；直升机；海上悬停；海浪噪声；海浪滤波

中图分类号：V24　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.04.006

直升机在海上进行“自动悬停”时，其高度控制采用无线电高度表来测量直升机距海面的高度，与装订高度进行比较，再根据高度控制方程进行高度控制。在海面上悬停时，无线电高度表的测量高度中混有较强的海浪噪声干扰[1]，信噪比很差，从而使直升机随海浪起伏而颠簸，海况过大时甚至有引发振荡的风险。因此，必须在高度通道中加入海浪滤波器，以抑制海浪对高度的影响[2]。真实可靠的海浪噪声数据是进行海浪滤波器设计的前提。国内目前进行相关研究使用的海浪噪声数据，一般通过建立随机海浪模型来获得[3,4]。本文使用飞行试验得到的飞行数据，对海浪噪声进行了识别，并基于海浪噪声数据对直升机海上悬停海浪滤波器的设计进行了研究。

1 海浪噪声识别

海浪是海面由风引起的波动现象，主要包括风浪和涌浪。波高是指相邻的波峰和波谷间的垂直距离，将某一时段连续测得的所有波高按大小排列，其中最大的1/3部分波高的平均值称为有效波高。0~5级海况对应的有效波高分别为：0m、0～0.1m、0.1～0.5m、0.5～1.25m、1.25～2.5m、2.5～4m。有效波高大于等于4m的海浪称为灾害性海浪。

为了进行海浪滤波器的设计研究，首先应当从飞行试验得到的飞行数据中识别出海浪噪声。本文利用差分GPS高度来确定直升机高度真实变化情况，将其和无线电高度数据进行对比，从而得出海浪噪声的时间曲线。具体数据处理分为三步：(1)差分GPS数据和无线电高度数据时间一致性检验和校正；(2)截取海上悬停数据段；(3)分离海浪噪声数据。

本文采用的无线电高度和差分GPS数据时间一致性检验方法是，直升机出航前在跑道上空进行动态“自动悬停”检查，在直升机高度回调过程中，差分GPS数据相对无线电高度数据不应有相位超前或延迟，其差值应该为一个定值。图1为某次飞行差分GPS数据时间修正情况。H_{GPS}和H_R分别为差分GPS数据和无线电高度数据，截取直升机在跑道上空悬停的数据段，对该段差分GPS数据进行竖移，竖移量A为(向下移动为正)：

$$A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(H_{GPSi} - H_{Ri}) \tag{1}$$

式中：n为数据段的数据长度。

从图1中可以清晰地看出，无线电高度数据有一定滞后，对差分GPS数据和无线电高度数据做减法运算，其高度差也出现了明显的波动。将差分GPS数据向右平移0.4s后，这个波动消失，且差分GPS数据和无线电高度几乎完全重叠，说明时间修正是有效的。

截取海上悬停数据段后，采用相同的方法对差分GPS数据进行竖移，并将其和无线电高度数据进行减法运算，某次三级海况直升机海上悬停数据处理结果如图2所示。

从图中可以看出，无线电高度数据刻画的直升机运动趋势总体上和差分GPS高程信息是一致的，只是叠加了一个最大幅值约为1.8m的高频信号。由于无线电高度表此

收稿日期：2019-01-31；退修日期：2019-02-18；录用日期：2019-03-15
*通信作者. Tel.：15029753665　　E-mail：gpxiao999@163.com
引用格式：Gong Pengxiao, Wang Peng. Research on the design of helicopter maritime hovering wave filter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(04): 31-35. 巩鹏潇，王鹏. 直升机海上悬停海浪滤波器研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(04): 31-35.

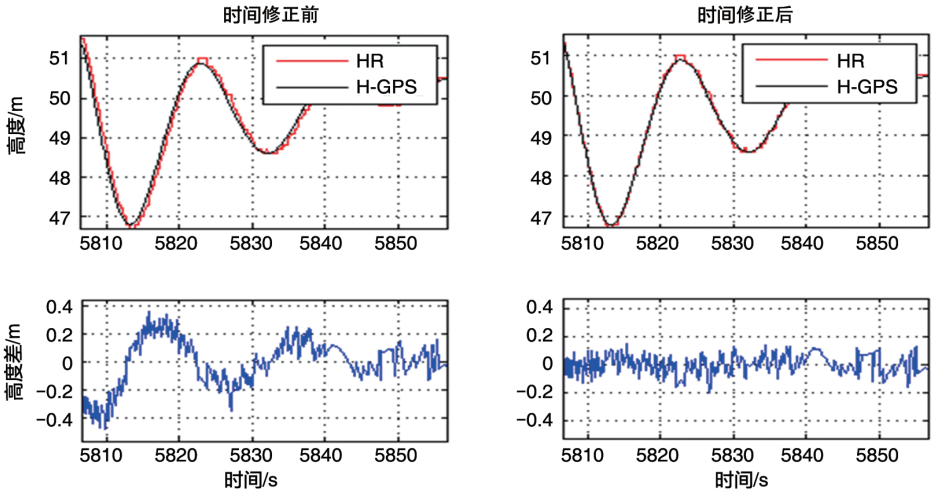

图1 差分GPS数据时间修正

Fig.1 Time correction of differential GPS data

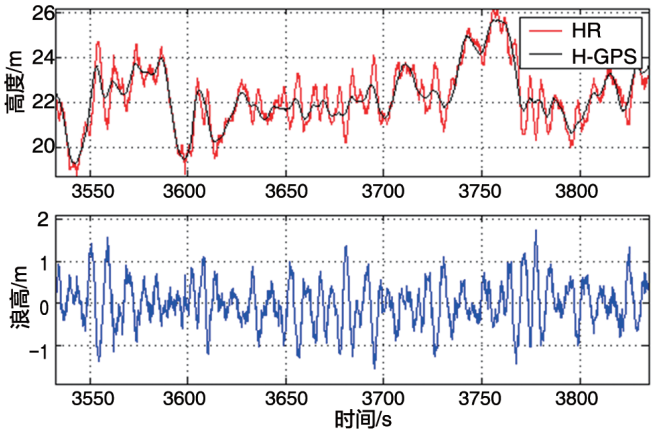

图2 海浪识别情况

Fig.2 Wave height identification

时自身的随机误差在0.2m以内，故可以认为这个高频信号的主要成分是海浪噪声。需要强调的是，图2中得到的海浪噪声是直升机悬停时感受到的正下方海面随时间波动的情况。

使用本方法对不同海况进行了海浪噪声识别，图3为识别结果。从图中可以看出，随着海况增大，海浪曲线浪高波动幅度也随之加大。这进一步证明本文的海浪噪声识别方法是有效的。

2 海浪滤波器的设计

无线电高度信号是直升机悬停控制的主反馈信号，由于海浪起伏等因素的影响而含有大量噪声，信噪比较差。本文借鉴互补滤波[5]的思想来处理高度信号，对无线电高度表测得的高度信号和垂直加速度计测得的垂直加速度信号进行组合滤波，构成卡尔曼互补滤波器来获得高质量的高度信号。首先对这两种信号的误差情况进行分析，然后再介绍本文滤波器的设计原理。

2.1 信号误差分析

无线电高度表是测量飞机到地面垂直距离的机载无线电设备，直升机海上悬停时其误差包含自身不可校准的随机误差和海面波动引起的高度误差两部分。本文采用的某型直升机无线电高度数据，在低于100m时，无线电高度表自身的随机误差小于悬停高度的1/100，可以通过滤波进行平滑。飞行试验表明，直升机在海面低空悬停时，无线电高度表对海浪波动非常敏感，可以捕捉到轻微的海面波动，海面波动引起的误差随海况变高而变大，如图3所示。

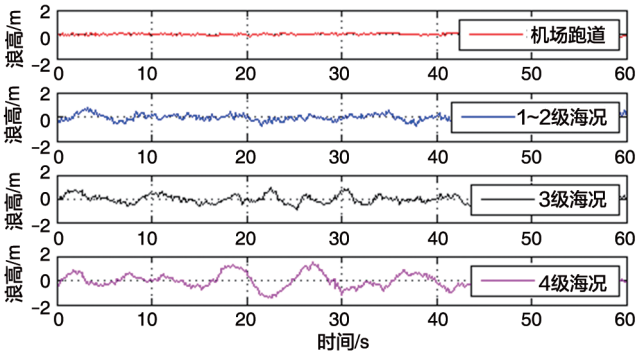

图3 不同海况海浪识别情况

Fig.3 Wave height identification under different sea conditions

垂直加速度计一般使用线位移式加速度传感器，其误差源主要有外界振动干扰带来的测量误差和零漂误差。外界振动干扰带来的误差频率高、幅值小，可以通过滤波进行平滑，而零漂误差无法通过简单的滤波去除。

2.2 设计原理

卡尔曼滤波是一种通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法，由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的影响，所以最优估计也可看作是滤波过程。卡尔曼滤波是目前应用最为广泛的滤波方法，在通信、导航、制导与控制等领域都得到了较好的应用，其基本原理是：在滤波器中动态的模拟测量过程，把可用的测量数据同估计值进行比较，再把估计误差反馈给滤波器。由于垂向加速度、垂向速度和高度是通过明确的积分关系相互关联的，所以很适合用卡尔曼滤波来得到优质的高度信号。在进行卡尔曼滤波器设计的过程中发现，在直升机悬停时垂直加速度零漂误差太大。本文最终采用准实时修正的方法，对一小段悬停状态垂直加速度求取平均值，将其叠加到将要进行滤波的数据中，从而减小零漂误差的影响。基于卡尔曼滤波原理的海浪滤波器的设计框图如图4所示。

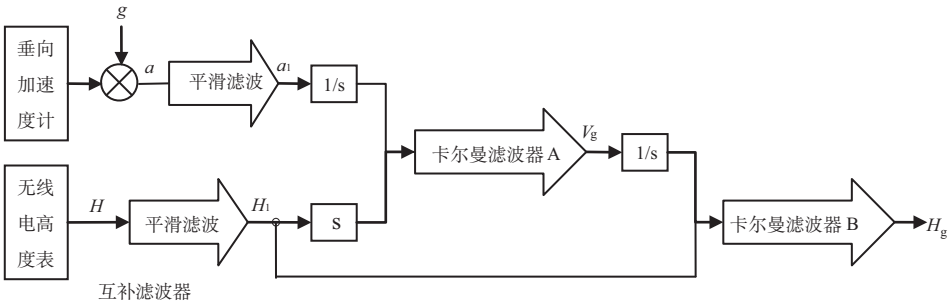

图4 海浪滤波器设计框图

Fig.4 Wave filter design block diagram

图4中a_1、H_1代表平滑滤波后的垂向加速度和无线电高度，V_g、H_g代表最优估计值。首先对垂直加速度信号和无线电高度信号进行一次平滑滤波；然后将垂直加速度积分信号作为预测值，将无线电高度信号微分信号作为测量值，进入卡尔曼滤波器A，进行垂直速度的卡尔曼滤波，其内部递推结构为：

$$\begin{cases} V_y(k)=V_g(k-1)+\det T\cdot a(k-1) \\ P_y(k)=P_g(k-1)+Q \\ K_g(k)=P_y(k)\div(P_y(k)+R) \\ V_g(k)=V_y(k)+K_g(k)\cdot(V_C(k)-V_y(k)) \\ P_g(k)=(1-K_g(k))\cdot P_y(k) \end{cases} \tag{2}$$

式中：Q和R分别代表系统过程噪声协方差和系统测量噪声协方差，假定其不随系统状态变化而变化。V_y和V_g分别代表垂向速度预测值和最优估计值，V_c为测量值，P_y和P_g分别代表预测值和估计值协方差，K_g为卡尔曼增益。滤波器初值需要确定$V_g(1)$和$P_g(1)$，在初值确定的情况下，滤波器的滤波效果主要取决于Q和R。从式(2)中可以看出，R为0时(即认为系统无测量噪声)，K_g值恒为1，即完全相信测量值，R为无穷大时，完全相信预测值；Q越大(即认为系统过程噪声越大)，K_g越靠近1，即越相信测量值。由于有真实值(差分GPS高度数据)可以进行对比，本文通过不断优化R和Q的值，最终得到了稳定性好、滤波误差小的垂向速度滤波器。

最后将垂直速度最优估计值积分量作为预测值，将平滑滤波后的无线电高度信号作为测量值，进入卡尔曼滤波器B，进行高度的卡尔曼滤波，得到无线电高度的最优估计值。卡尔曼滤波器B和A的内部结构类似，不再详细说明。

3 基于飞行数据的模拟滤波

使用直升机海上悬停飞行试验数据，将无线电高度数据、垂直加速度数据输入给海浪滤波器，滤波结果表明，海浪滤波器能够解算出较好的垂向速度信号和高度信号，海浪滤波器是有效的。图5为卡尔曼滤波器A输出结果对比情况，从图中可以看出，对平滑滤波后的垂直加速度信号直接进行积分计算垂向速度的话，存在数据发散的问题，其主要原因是加速度信号仍有一定的零漂误差。通过采用高度信号微分量作为测量值，垂直加速度积分信号作为估计值，进行卡尔曼滤波，得到的垂直速度估计值和真实值符合得非常好。

卡尔曼滤波器B采用平滑滤波后的无线电高度作为测量值，采用卡尔曼滤波器A得到的垂直速度最优估计值

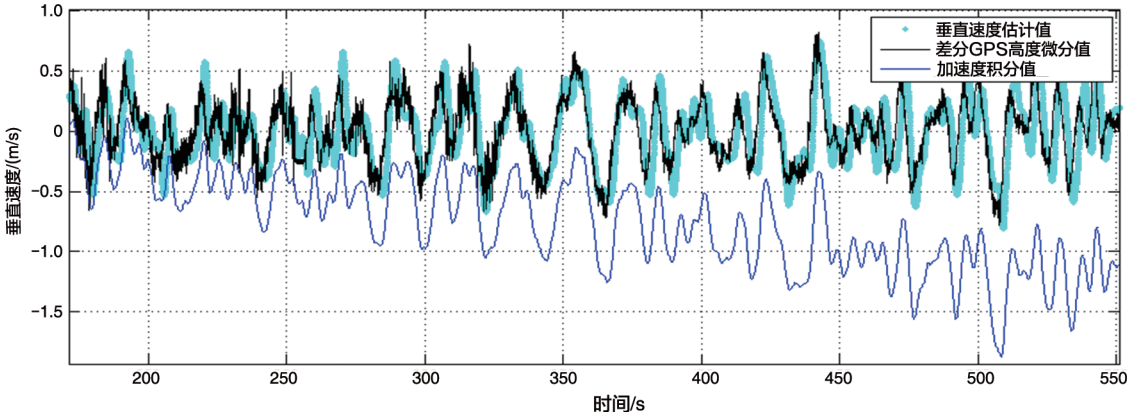

图5 滤波后的垂直速度曲线

Fig.5 The filtered vertical velocity curve

的积分量作为预测值，进行高度滤波，得到高度最优估计值，图6为其滤波结果。从图中可以看出，得到的高度估计值和真实值符合情况较好，基本上已经将海浪噪声滤除掉。

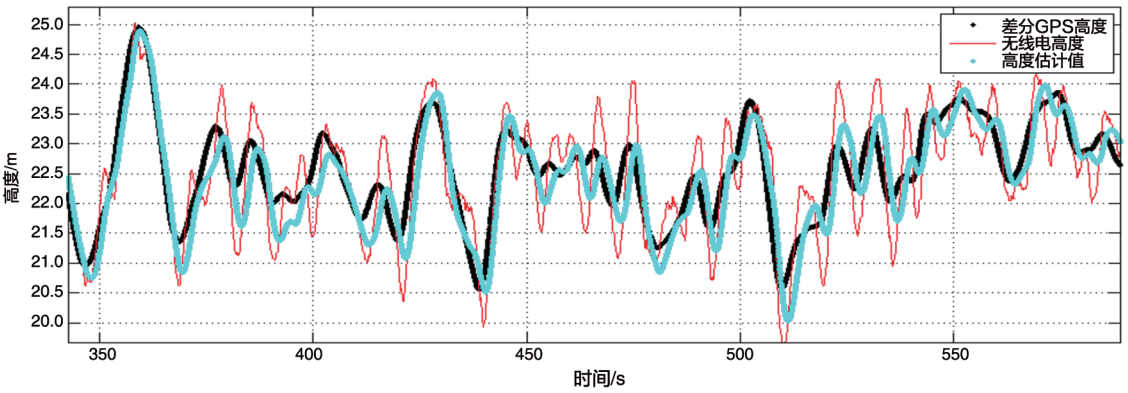

图6 滤波后的高度曲线

Fig. 6 The height curve after filtering

由于试验机的“自动悬停”功能未进行海浪滤波，其总距作动对海浪非常敏感，而直升机对海浪的响应又存在一定滞后，造成的结果是，无线电高度和差分GPS高度在相位上不一致，如图7所示。从图6的滤波结果来看，高度估计值在幅值上已经同真实值几乎一样，但是在相位上，仍然存在0.8s左右的滞后，这是由于本文采用的卡尔曼滤波是测量值和估计值共同作用的结果，在一定程度上相信包含海浪噪声的测量值是不可避免的，高度估计值的相位滞后是高度测量值相对于真实值相位滞后的真实反映，不影响本文互补式卡尔曼海浪滤波器的有效性。

4 结束语

本文基于直升机海上悬停飞行试验数据，使用对差分GPS数据和无线电高度数据综合对比的方法，进行了海浪噪声的识别，通过和国际波级表关于海况的定义进行对

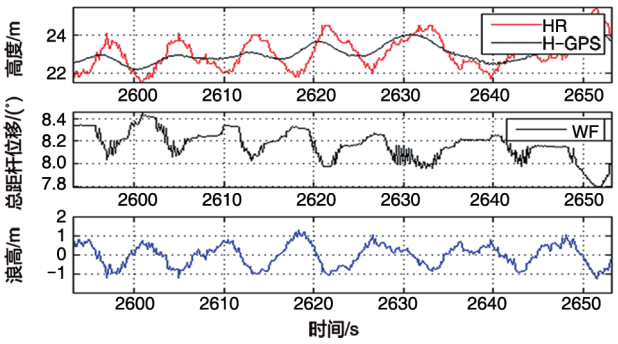

图7 试验机对海浪响应的时间曲线

Fig.7 The response time curve of the test helicopter to sea waves

比，证明识别结果是可信的。对直升机海上悬停海浪滤波器进行了设计研究，采用的互补式卡尔曼滤波器可以对海浪噪声进行较好的滤除，高度估计值相对于真实值存在一定相位延迟，这是对高度测量值相位滞后的真实反映，这种滤波后仍然存在相位延迟的现象不影响本文海浪滤波器的有效性。

参考文献

[1] 李广文，唐永哲，王冬.直升机掠海飞行海浪滤波器研究[J].空军工程大学学报：自然科学版,2004(05)：18-20.
Li Guangwen, Tang Yongzhe, Wang Dong. Study of the seawave filter for the helicopter skimming-over-the sea flight [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2004(05)：18-20.(in Chinese)

[2] 戴宁.直升机海上搜潜控制的设计与仿真[J].直升机技术，2003(2)：23-26.
Dai Ning. Design and simulate the helicopter anti- submarine control system[J]. Helicopter Technique, 2003 (2)：23-26. (in Chinese)

[3] 邱宏安.随机海浪模型的建立及仿真分析[J].系统仿真学报，2000，12(3)：226-228.
Qiu Hong'an. Establishing and simulation for random ocean state model[J]. Journal of System Simulation, 2000，12 (3)：226-228.(in Chinese)

[4] 刘彦涛，赵鹏轩，卢京潮.海浪滤波及其在直升机缆高控制中的应用[J].计算机测量与控制，2015，23(11)：3793-3796.
Liu Yantao, Zhao Pengxuan, Lu Jingchao. Application of wave filter in helicopter's cable-height control system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23 (11)：3793-3796. (in Chinese)

[5] 梅劲松，屈蔷.基于互补滤波的全数字拖靶高度控制系统[J].南京理工大学学报：自然科学版，2008, 32(1)：65-68.
Mei Jinsong, Qu Qiang. Digital tow target altitude control system based on complementary Kalman filter[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 32(1)：65-68.(in Chinese)

作者简介

巩鹏潇(1988—)男，工程师。主要研究方向：飞机飞控系统试飞。

Tel：15029753665

E-mail：gpxiao999@163.com

王鹏(1988—)男，工程师。主要研究方向：飞机飞行品质试飞。

Research on the Design of Helicopter Maritime Hovering Wave Filter

Gong Pengxiao*, Wang Peng

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: Based on the data of the helicopter's maritime hover flight test, the method of comprehensive comparison of differential GPS data and radio altitude data was used to identify the sea wave noise and separate it from the radio altitude data. Based on this, the wave filter is studied. The height signal measured by the radio altimeter and the vertical acceleration signal measured by the vertical accelerometer are combined and filtered to form a complementary Kalman filter, and a high quality signal with good quality is obtained.

Key Words: flight test; helicopter; hover on the sea; wave height; wave filter

Received: 2019-01-31； **Revised:** 2019-02-18； **Accepted:** 2019-03-15

***Corresponding author.Tel. :**15029753665 **E-mail:** gpxiao999@163.com