

直升机掠海飞行海浪滤波器研究

李广文, 唐永哲, 王冬

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要:研究了直升机掠海飞行时海浪滤波器和高度组合系统设计问题,给出了运动坐标系下海浪谱,借鉴直升机海面悬停时精确高度的维纳滤波提取法,利用伯特-香农法设计了掠海飞行海浪滤波器,给出了高度组合系统,结合某型直升机做了仿真,验证了海浪滤波器和高度组合系统的有效性。

关键词:掠海飞行;运动坐标系;海浪谱;伯特-香农法;维纳滤波器;高度组合系统

中图分类号:V24 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)05-0018-03

现代直升机的一个重要的应用环境是海洋,当直升机以较低高度掠海飞行时,无线电高度表测得的高度信息中有较强的海浪噪声干扰,如果直接将无线电高度表测出的高度信号加到高度通道中,会导致直升机高度的变化,使直升机随海浪起伏而颠簸,降低定高的精度。所以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。本文针对直升机掠海飞行时海浪滤波器和高度组合系统的设计问题进行探讨。

1 海浪谱

经实验和观测,海浪可看作由很多随机正弦波叠加而成的平稳随机过程,利用海浪谱描述海浪是当代海浪研究的主要方法^[1]。本文所采用的由我国近海海洋观测推出深水文圣常谱见文献[2]公式(1),文献[3]给出了运动坐标系下的海浪谱的推导方法。

设在广阔的海域内有一深水表面重力波在传播,观测者A位于静止坐标系OXYZ中,其中OXY平面与静止海平面重合,另一观测者B位于相对静止坐标系以水平速度U运动的坐标系O'X'Y'Z'中。海浪运动由Longuet-Higgins给出的线性模型描述,则A观测到的海浪起伏由式(1)描述。式中: a_n 、 k_n 、 ω_n 、 ε_n 分别为第n个组成波的振幅、波数、圆频率和初相位。 k_n 的方向角为 θ_n , ε_n 为随机量,在 $(0 \sim 2\pi)$ 上均匀分布; r 为水平面内的位置矢量。 a_n 由式(2)限定。式中 $S(\omega, \theta)$ 为海浪方向谱。假设静止坐标系中的海浪组成波只沿一个方向传播,得式(3)。式中 $\delta(\cdot)$ 为Dirac函数,则在此情况下B观测到海浪谱为见式(4)。式中:U为运动坐标系相对静止坐标系的运动速度; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

$$\zeta = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n r - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (1) \quad \sum_{\omega} \sum_{\theta} \frac{1}{2} a^2 = S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (2)$$

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \delta(\theta - \theta_0) \quad (3) \quad S'(\omega') = S(\omega) / |1 - 2\omega U/g| \quad (4)$$

以文圣常谱为例,当U分别取0 m/s、10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s时,所得海浪谱见图1。随着运动坐标系运动速度的增加,海浪谱的谱峰频向高频移动,同时海浪谱的谱值变小,频谱的分布变宽。

2 掠海飞行海浪滤波器和高度组合系统的设计

2.1 维纳滤波器设计的伯特-香农法

收稿日期:2004-03-17

基金项目:航天科技创新基金资助项目(2001CH0901)

作者简介:李广文(1978-),男,河北献县人,硕士生,主要从事飞行器控制研究;
唐永哲(1950-),男,陕西西安人,教授,主要从事飞行器控制研究。

在文献[4]所述的直升机悬停时的精确高度维纳滤波提取法及所用的高度组合系统中,在直升机不变的情况下,海浪滤波器的形式和参数取决于所用海浪谱,所以如果已知海浪谱和直升机运动速度的关系,就可以按照文献[4]所述的维纳滤波器的设计方法来设计直升机掠海飞行时的海浪滤波器。

伯特-香农设计法是求解频域维纳-霍甫方程的特例,简述如下:

设有用信号 $S(t)$ 和干扰信号 $N(t)$ 都是平稳随机过程,且相互独立,其功率谱 $S_S(\omega)$ 和 $S_N(\omega)$ 具有有理分式的形式,现在要从混有干扰信号的量测量 $Z(t) = S(t) + N(t)$ 中提取出有用信号 $S(t)$ 。实现上述滤波要求的维纳滤波器的传递函数为

$$H_f(S) = \frac{1}{H_1(S)} [H_0(S)H_1(S)]_{\text{左极}} \quad (5) \quad H_0(j\omega) = \frac{S_S(\omega)}{S_S(\omega) + S_N(\omega)}, |H_0(j\omega)|^2 = S_S(\omega) + S_N(\omega) \quad (6)$$

式中: $[\cdot]_{\text{左极}}$ 表示只取 $H_0(S)H_1(S)$ 的部分分式展开式中极点仅位于 $[S]$ 平面左半平面内的部分分式和。

2.2 海浪谱的有理化

为了能采用伯特-香农法设计滤波器,需要对海浪功率谱密度进行有理化。由于功率谱偶对称,所以可设近似有理谱为

$$S_{n_i}(\omega) = (b_4\omega^4 + b_2\omega^2 + b_0)/(\omega^8 + a_6\omega^6 + a_4\omega^4 + a_2\omega^2 + a_0) \quad (7)$$

对应于某一频率 ω_i ,海浪功率谱应与式(7)确定的谱值相等,当 $i=1,2,L,N(N>4)$ 时,可得 N 个方程,写成矩阵形式为

$$\Phi = \begin{bmatrix} -S_{n_1}(\omega_1)\omega_1^6 & -S_{n_1}(\omega_1)\omega_1^4 & -S_{n_1}(\omega_1)\omega_1^2 & -S_{n_1}(\omega_1)\omega_1 & \omega_1^4 & \omega_1^2 & 1 \\ -S_{n_2}(\omega_2)\omega_2^6 & -S_{n_2}(\omega_2)\omega_2^4 & -S_{n_2}(\omega_2)\omega_2^2 & -S_{n_2}(\omega_2)\omega_2 & \omega_2^4 & \omega_2^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -S_{n_i}(\omega_i)\omega_i^6 & -S_{n_i}(\omega_i)\omega_i^4 & -S_{n_i}(\omega_i)\omega_i^2 & -S_{n_i}(\omega_i)\omega_i & \omega_i^4 & \omega_i^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Theta = [a_6 \ a_4 \ a_2 \ a_0 \ b_4 \ b_2 \ b_0]^T \quad (9) \quad \Gamma = [\omega_1^8 S_{n_1}(\omega_1) \ \omega_2^8 S_{n_2}(\omega_2) \ \dots \ \omega_i^8 S_{n_i}(\omega_i)]^T \quad (10)$$

简记为 $\Phi\Theta = \Gamma$, 按最小二乘法求取 $\Theta = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T\Gamma$

2.3 高度组合系统原理和滤波器的设计

无线电高度表的输出中包含直升机的真实高度 h 和噪声信号 n ($n = n_s + n_r$, n_s 为海浪的噪声, n_r 为无线电高度表的噪声)。在无线电高度表的量测输出经过海浪滤波器时,真实高度 h 不可避免的要衰减,所以用直接在无线电高度表后串联海浪滤波器的方法很难获得直升机的真实高度。因此要采用组合的方式。高度组合系统的结构图见图2。图2中: h_r 为无线电高度表的量测输出; n_s 为海浪的噪声; n_r 为无线电高度表的噪声; a 为直升机垂直加速度; W_A 为垂直加速度计的白噪声; h 为直升机真实高度。

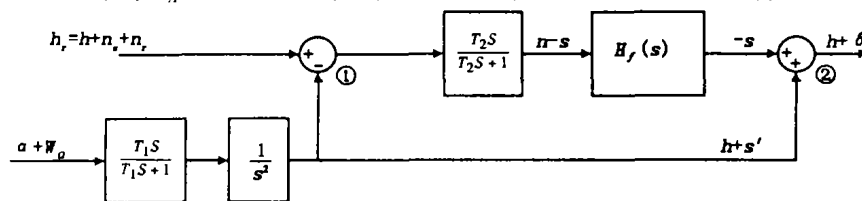


图2 高度组合系统工作原理图

该组合系统的工作原理为:当直升机偏离定高值时,垂直加速度计输出 a 随时间变化,经高通滤波器后两次积分,得到含有随机误差的 s' 的惯性高度输出 $h+s'$,该输出与无线电高度表的输出 $h+n_s+n_r$ 在比较点①处比较,经 $T_2S/(T_2S+1)$ 高通滤波后只含 n ($n = n_s + n_r$) 和 s , $H_f(s)$ 是根据伯特-香农法设计的维纳滤波器,设计中将 s 看作保留信号,将 n 看作干扰滤除。维纳滤波器的输出在比较点②与惯性高度输出 $h+s'$ 叠加后,得滤波高度值 $h+\delta$,其中 δ 是由于滤波不彻底引起的误差。

设加速度计白噪声 W_A 的功率谱为 s_a ,则噪声 s 的功率谱见式(11)。无线电通道高度噪声是由海浪干扰 n_s 和无线电高度表本身的白噪声 n_r 构成的,即 $n = n_s + n_r$,设无线电高度表本身的白噪声 n_r 的功率谱为 S_r ,则

n 的功率谱见式(12)。式中 $S_{n_s}(\omega)$ 为海浪在运动坐标系下的功率谱。将式(11)、(12)代入式(5),即可得所求的维纳滤波器。

$$S_i(\omega) = S_a T_1^2 T_2^2 / (T_1^2 \omega^2 + 1)(T_2^2 \omega^2 + 1) \quad (11)$$

$$S_i(\omega) = [S_{n_s}(\omega) + S_r] T_2^2 \omega^2 / (T_2^2 \omega^2 + 1) \quad (12)$$

3 仿真结果

本文采用深水中文圣常谱,取有效波高 $H_{1/3} = 2$ m,海浪有效周期 $T_{1/3} = 5$ s;直升机飞行高度 15 m,相对海面运动速度 U 分别取 20 m/s、30 m/s、40 m/s 和 50 m/s;高度组合系统中取 $T_1 = 1000$, $T_2 = 2000$, $S_r = (0.5)^2$, $S_a = (10^{-4}g)^2$ 。仿真结果见图 3。

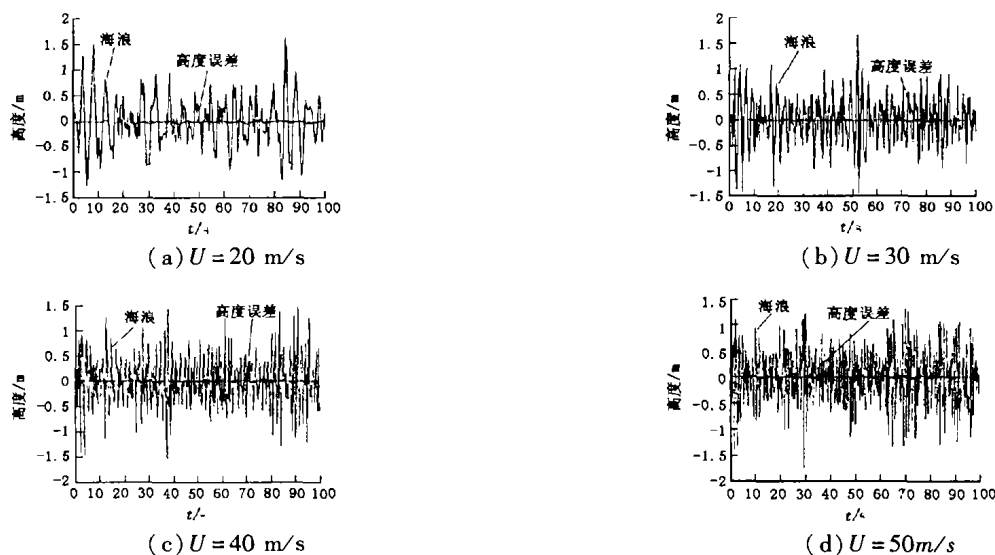


图3 直升机相对海面运动速度

4 结束语

当直升机掠海飞行时,所感知的海浪谱会随飞行速度而变化,相应地,高度组合系统中的维纳滤波器参数也要随速度而变化,所以要根据不同的飞行速度设计出若干组参数,以适应速度变化给定高精度的影响。由仿真结果可以看出,直升机加装本文所述的高度组合系统后能够获得较高的定高精度。

参考文献:

- [1] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [2] 竺艳蓉,谢 峻,龚佩华. 各种波浪谱在海洋工程中的适用性研究[J]. 海洋学报,1995,17(6):126-131.
- [3] 管长龙,梁楚进. 论运动坐标系中的海浪谱[J]. 青岛海洋大学学报,1996,26(3):261-265.
- [4] 秦永元,俞济祥. 直升机海面悬停时精确高度的维纳滤波提取法[J]. 航空学报,1994,15(11):1341-1347.

(编辑:姚树峰)

Study of the Seawave Filter for the Helicopter Skimming - over - the Sea Flight

LI Guang - wen, TANG Yong - zhe, WANG Dong

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: This article studies the problem of designing a seawave filter and a high integrative system for the helicopter skimming - over - the sea flight. In order to research this question, a sea spectrum in the kinetic coordinate system is derived. Based on Bode - Shanon method, the Wiener filter and the high integrative system are designed. A simulation by a kind of helicopter is made to test the validity of the designed method.

Key words: skimming - over - the sea flight; kinetic coordinate system; Bode - Shanon method; Wiener filter; sea spectra; high integrative system