

微波着陆系统角误差数字滤波器的设计与仿真

刘明, 张辉, 刘守义
(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:依据 MLS 的角误差滤波器的 ICAO 标准,用双线性变换法设计数字滤波器,利用数据分析软件 MATLAB 对设计的数字滤波器和模拟原型滤波器进行仿真,并对其仿真结果进行分析和比较。

关键词:角误差;PFE 数字滤波器;CMN 数字滤波器;双线性变换法;MATLAB 仿真。

中图分类号:V241 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)03-0015-04

1 MLS 角误差测量方法

微波着陆系统 MLS(Microwave Landing System)是机上导出引导数据的精密引导系统。为待着陆飞机提供航向信息、下滑信息和距离信息。微波着陆系统的引导精度是飞机安全着陆的关键性因素,能够帮助飞行员成功完成每次进场和着陆。

国际民航组织 ICAO 在 1980 年公布了微波着陆系统的精度标准。该精度标准是按照飞机的实际着陆动态过程将角误差分解为航迹跟随误差 PFE(Path Following Error)、航迹跟随噪声 PFN(Path Following Noise)和控制运动噪声 CMN(Control Motion Noise)分量。

PFE 指的是预定飞行航线与飞机跟随制导信号而形成的实际飞行航线之间的误差,这种误差会使飞机偏离航向道或下滑道。CMN 是由较高的角频率信号产生的误差,这种误差影响飞机的舵面和操纵杆的抖动,并有可能影响飞机姿态的摆动。

系统的精度用 PFE 和 CMN 来确定,这些参数直接反映了系统制导误差。ICAO MLS 精度标准规定了系统误差的 PFE 和 CMN 分别用 PFE 滤波器和 CMN 滤波器来测量。

PFE 和 CMN 误差测量方法:指挥驾驶员按预定航向飞行,同时记录下机载设备从角数据输出滤波器输出的制导指示数据与激光跟踪系统或精密雷达跟踪系统测得的飞机绝对基准位置之间的差别,两者相减后分别用 PFE 滤波器和 CMN 滤波器输出各自的误差值。

2 MLS 角误差频谱成分及系统函数

MLS 表征误差的方法是按误差的频率成分来划分的。SARP_s(Standard And Recommended Practices)规定以下内容:

为保证接收机输出信号在不影响飞行控制系统信号幅度和相位裕度的前提下有最大的频率响应,一般采用转折频率为 10 rad/s 的低通滤波器作为接收机输出滤波器,以滤除 10 rad/s 以上的高频成分。

PFE 规定为在方位上大于 0.5 rad/s,在仰角上大于 1.5 rad/s 的角误差,这时由于飞机的惯性,使它不会偏离预定航道。但在方位上不大于 0.5 rad/s,仰角上不大于 1.5 rad/s 的角误差成分,会导致飞机偏离预定航道。

CMN 规定为在方位上为 $0.3 \sim 10 \text{ rad/s}$, 仰角上为 $0.5 \sim 10 \text{ rad/s}$ 的角误差成分, 能够引起飞机姿态角偏移, 引起舵面和操纵杆的抖动。

ICAO 规定了角误差测试滤波器的模拟滤波器系统函数^[3]如下:

$$\text{接收机输出滤波器: } S = \frac{\omega_{\text{REC}}}{S + \omega_{\text{REC}}}$$

$$\text{PFE 滤波器: } S = \frac{\omega_p^2}{S^2 + 2\xi\omega_p S + \omega_p^2}$$

$$\text{式中: } \xi = 1, \omega_{\text{PFE}} = 0.64\omega_p$$

$$\text{CMN 滤波器: } S = \frac{S}{S + \omega_{\text{CMN}}}$$

3 根据系统函数设计数字滤波器并仿真

前面已了解模拟滤波器的系统函数 $H(S)$ 及其指标, 现在要将模拟滤波器离散化转变成数字滤波器, 且需逼近模拟滤波器的幅频特性。

设计思想:

1) 采用双线性变换法, 将复平面系统函数 $H(S)$ 转换成 Z 平面系统函数 $H(Z)$ 。

数字滤波器系统函数的标准格式为

$$H(Z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k Z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k Z^{-k}} = \frac{Y(Z)}{X(Z)}$$

2) 由 $H(Z)$ 可推导出表示输入输出关系的常系数线性差分方程

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k)$$

计算 $a_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 、 $b_k (k = 0, 1, \dots, M)$ 的值。

3) 通过 MATLAB 软件仿真, 绘出设计的数字滤波器和模拟原型滤波器的幅频特性曲线, 检验设计的数字滤波器是否满足系统指标要求。

4) 如果满足要求, 编制计算机软件实现其常系数线性差分方程。这样需要滤波的输入序列经过数字滤波软件的运算, 转成滤波后的输出序列。

3.1 设计 PFE 数字滤波器

$$\text{PFE 模拟滤波器的系统函数: } H(S) = \frac{\omega_p^2}{S^2 + 2\xi\omega_p S + \omega_p^2}$$

为使 PFE 数字滤波器的截止频率 $\omega_{\text{PFE}} T_{\text{S1}}$ 与模拟原型滤波器的截止频率 ω_{PFE} 严格对应^[2],

$$\text{应有: } \omega_{\text{PFE}} = C_{\text{PFE}} \tan\left(\frac{\omega_{\text{PFE}} T_{\text{S1}}}{2}\right), \text{ 所以 } C_{\text{PFE}} = \frac{\omega_{\text{PFE}}}{\tan\left(\frac{\omega_{\text{PFE}} T_{\text{S1}}}{2}\right)}$$

$$\text{此时, } S \text{ 平面到 } Z \text{ 平面的单值映射关系为: } S = C_{\text{PFE}} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}}$$

变换后的数字滤波器的系统函数是:

$$H(Z) = \frac{\omega_p^2}{\left(C_{\text{PFE}} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} + \omega_p\right)^2} = \frac{\frac{\omega_p}{(C_{\text{PFE}} + \omega_p)^2} (1 + Z^{-1})^2}{1 - \frac{2(C_{\text{PFE}} - \omega_p)}{C_{\text{PFE}} + \omega_p} Z^{-1} + \frac{(C_{\text{PFE}} - \omega_p)^2}{(C_{\text{PFE}} + \omega_p)^2} Z^{-2}}$$

$$\text{令 } b_0 = \left(\frac{\omega_p}{C_{\text{PFE}} + \omega_p}\right)^2, \quad a1 = 2 \frac{C_{\text{PFE}} - \omega_p}{C_{\text{PFE}} + \omega_p}, \quad a2 = \left(\frac{C_{\text{PFE}} - \omega_p}{C_{\text{PFE}} + \omega_p}\right)^2$$

则

$$H(Z) = \frac{b_0(1 + 2Z^{-1} + Z^{-2})}{1 - a_1Z^{-1} + a_2Z^{-2}} \quad (1)$$

其相应的差分方程为

$$y(n) = a_1y(n-1) - a_2y(n-2) + b_0[x(n) + 2x(n-1) + x(n-2)] \quad (2)$$

以方位 PFE 模拟滤波器为例, $\omega_{PFE} = 0.5 \text{ rad/s}$, $T_{S3} = 1/13 \text{ s}$ 时, 可算出数字滤波器的系数。

$$\begin{cases} a_1 = 1.883\ 932\ 74 \\ a_2 = 0.887\ 300\ 64 \\ b_0 = 0.000\ 841\ 98 \end{cases} \quad (3)$$

MATLAB 仿真后得到的数字和模拟滤波器的幅频特性曲线如图 1 所示。

在 $0 \sim 0.079577\ 47 \text{ Hz}$ 的范围内 2 者完全逼近。

以此类推, 设计并计算出了其他角度功能的 PFE 数字滤波器的系数, 得到了满意的仿真结果。

3.2 设计接收机角频率输出滤波器

同 PFE 数字滤波器设计过程, 推导出接收机数字滤波器系统函数为

$$H(Z) = \frac{b_0(1 + Z^{-1})}{1 - a_1Z^{-1}} \quad (4)$$

其中:

$$a_1 = \frac{C_{REC} - \omega_{REC}}{C_{REC} + \omega_{REC}} \quad b_0 = \frac{\omega_{REC}}{C_{REC} + \omega_{REC}}$$

常系数线性差分方程:

$$y(n) = a_1y(n-1) + b_0[x(n) + x(n-1)] \quad (5)$$

$\omega_{REC} = 10 \text{ rad/s}$, $T_{S1} = (1/39) \text{ s}$, 可算出:

$$\begin{cases} a_1 = 0.77\ 161\ 697 \\ b_0 = 0.11\ 419\ 152 \end{cases} \quad (6)$$

MATLAB 仿真得到的数字和模拟滤波器的幅频特性曲线如图 2 所示

在 $0 \sim 1.591\ 549\ 43 \text{ Hz}$ 的范围内 2 者完全逼近。

3.3 设计 CMN 数字滤波器

推导出 CMN 数字滤波器系统函数为

$$H(Z) = \frac{b_0(1 + Z^{-1})}{1 - a_1Z^{-1}} \quad (7)$$

其中:
$$a_1 = \frac{C_{CMN} - \omega_{CMN}}{C_{CMN} + \omega_{CMN}}, \quad b_0 = \frac{\omega_{CMN}}{C_{CMN} + \omega_{CMN}}$$

常系数线性差分方程:
$$y(n) = a_1y(n-1) + b_0[x(n) - x(n-1)] \quad (8)$$

以方位 CMN 模拟滤波器为例, 截止频率 $\omega_{CMN} = 0.3 \text{ rad/s}$, 抽样频率 $T_{S2} = (1/13) \text{ s}$ 时, 可算出:

$$\begin{cases} a_1 = 0.977\ 185\ 31 \\ b_0 = 0.988\ 592\ 66 \end{cases} \quad (9)$$

MATLAB 仿真得到的数字和模拟滤波器的幅频特性曲线如图 3 所示, 在 $0.047\ 746\ 48 \text{ Hz} \sim \infty$ 的范围内两者完全逼近。

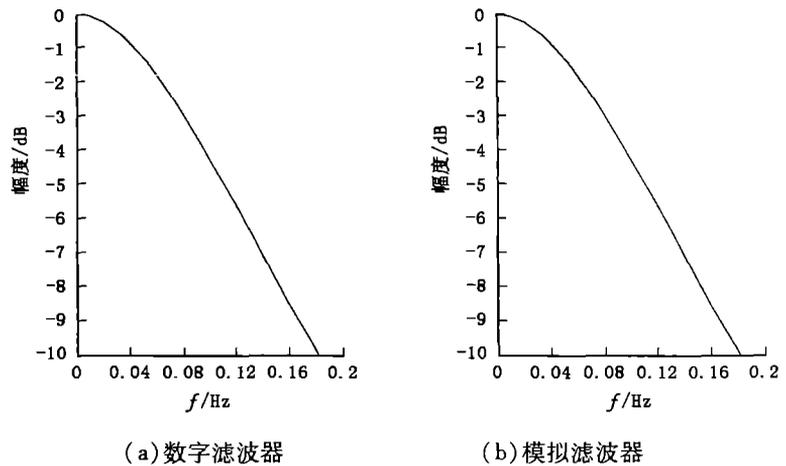


图 1 方位 PFE 滤波器幅频特性曲线

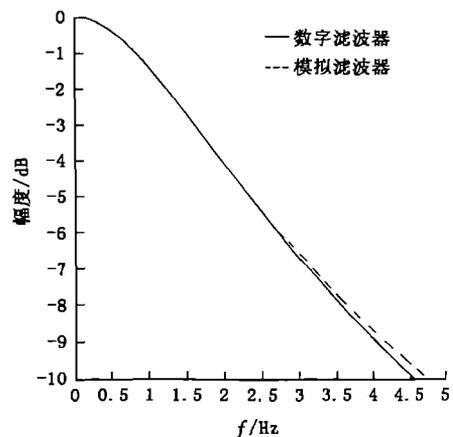


图 2 接收机输出滤波器幅频特性曲线

4 结论

论文依据 ICAO 规定,利用双线性变换设计计算了应用于工程设计的数字滤波器系统函数,并通过 MATLAB 仿真对比了原型模拟滤波器和数字滤波器的幅频特性曲线。从仿真结果可以看出,经过设计计算的数字滤波器与 ICAO 规定的 MLS 角误差滤波器的幅频特性曲线在所使用的频率范围内完全重合。因此,设计的各功能角误差数字滤波器可作为 MLS 角误差滤波器,应用于工程设计当中。

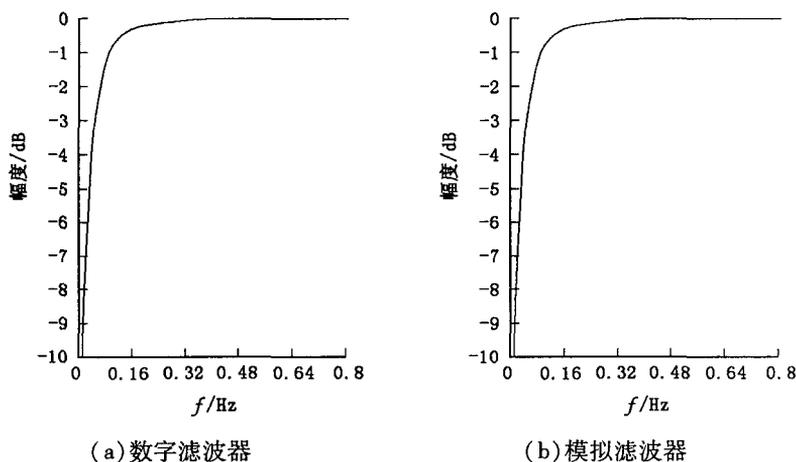


图3 方位 CMN 滤波器的幅频特性曲线

参考文献:

- [1] 周其焕,魏雄志,崔红跃.微波着陆系统[M].北京:国防工业出版社,1992.
- [2] 胡广书.数字信号处理——理论、算法与实现[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [3] Andrew Nelson. The Derivation of Path Following Error and Control Motion Noise Filters for The Reduction of Global Positioning System Flight Test Data[J]. IEEE Plans92, IEEE, 1992, 27(3): 23 - 27.
- [4] 楼顺天,李博菡.基于 MATLAB 的系统分析与设计——信号处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.

(编辑:门向生)

The Design and Simulation of Angle Error Digital Filter in Microwave Landing System

LIU Ming, ZHANG Hui, LIU Shou - yi

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: According to the standard of International Civil Aviation Organization (ICAO) about angle error in microwave landing system, a method of bilinear transformation is adopted in designing the digital filter. Then, by using MATLAB software the designed digital filter and the analog filter are simulated simultaneously, analysis and comparison are made for the results of the simulation.

Key words: angle error; PFE digital filter; CMN digital filter; Bilinear transformation; MATLAB simulation