

捷联式天线平台的稳定性研究

周瑞青 吕善伟

刘新华

(北京航空航天大学 电子工程系)

(中国航天科工集团二院 25 所)

摘要: 将 Rudin 提出的红外成像捷联稳定模型用于天线平台的稳定, 并应用不变性原理, 采取匹配滤波方法, 提高了稳定平台的解耦精度。具体仿真结果表明在 0.5 Hz ~ 1.0 Hz 频段解耦精度提高了 35 dB。同时, 在考虑传感器测量噪声的情况下, 对天线平台的稳定误差进行了仿真分析, 结果显示, 传感器测量噪声对稳定误差有较大的影响, 但通过滤波稳定误差可减小 50% 左右。

关键词: 稳定平台; 捷联式陀螺仪; 匹配滤波器; 解耦**中图分类号:** V 448.133**文献标识码:** A**文章编号:** 1001-5965(2003)06-0509-03

天线平台的稳定方式有多种^[1~4], 常用的是带有速率陀螺的常平架结构形式, 该稳定方式目前已取得广泛应用, 但这种结构形式的缺点是需要导引头有足够的空间, 且成本较高。基于现代战术导弹体积小、自主性强、能对付大机动目标的发展需要及高性能数字信号处理器的快速发展, 捷联式平台的研究越来越成为研究热点之一。捷联式平台稳定的优点是减小了导引头体积, 且降低了研制成本, 尤其适用于空间上有限制的战术导弹应用中。这种捷联式的天线稳定平台可以利用导弹自动驾驶仪的高精度的陀螺传感器信息, 通过解算来稳定天线指向^[5,6], 为天线稳定平台与驾驶仪平台的一体化设计提供了可能性。

1993 年, Rudin^[1] 在对红外成像稳定性的研究中, 给出了红外成像位标器的捷联平台模型, 并得出了分别采用石英晶体速率陀螺和光纤陀螺作为惯性测量传感器时的解耦结果。但在实际工程中, 由于电机死区和伺服框架传动中的摩擦、齿隙等非线性因素的影响, 所给出的结果不能满足工程要求。为此, 本文在 Rudin^[1] 工作基础上, 应用不变性原理, 采取匹配滤波的方法, 使捷联式天线平台的解耦精度大大提高。分析结果表明, 在 0.5 Hz ~ 1.0 Hz 频带内, 解耦精度提高 35 dB。同时, 在考虑传感器测量噪声的情况下, 对天线的稳定误差进行了仿真分析, 结果显示, 传感器噪声对稳定误差有较大的影响, 但通过滤波稳定误差可减小 50% 左右。

1 常用的天线平台稳定方案

采用角速率陀螺反馈来稳定天线是导引头角跟踪回路最常用的稳定方案之一, 图 1 是这种角稳定回路的原理框图。其中, G_s 为天线伺服机构传递函数; G_g 为角速率陀螺传递函数; $\dot{\vartheta}$ 为弹体运动角速度信号(对稳定回路而言是一个扰动信号); u_z 为来自接收机的角误差电压信号; ω_p 为天线平台输出角速度信号。

稳定回路是一个速度控制系统, 在受到 u_z 的控制作用的同时也受到 $\dot{\vartheta}$ 的扰动作用。速率陀螺稳定回路传递函数为

$$\omega_p = \frac{G_s}{1 + G_s G_g} u_z + \frac{1}{1 + G_s G_g} \dot{\vartheta} \quad (1)$$

2 天线平台的捷联稳定

2.1 捷联稳定模型

常规的常平架天线稳定系统是将 2 个体积小、精度高的角速度陀螺, 沿导引头的方位轴和俯仰轴方向安装在天线的背面, 作为天线稳定回路的反馈通道, 与天线伺服系统闭合, 组成天线稳定回路(如图 1 所示)。捷联稳定方式下, 天线平台上没有惯性传感器, 天线的稳定是利用已有的自动驾驶仪陀螺来实现的, 从控制观点来看, 这是一种带有前馈稳定的复合控制方式, 控制原理见图 2。

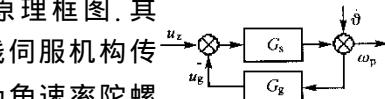


图 1 角速率陀螺稳定方案结构图

其中, G_g 为捷联速率陀螺传递函数; G_{cs} 为测速环节传递函数; N 为测量传感器输入噪声(一般认为是白噪声); 图中其它参数说明同图 1.

2.2 捷联稳定条件

由图 2 可得其传递关系为

$$\begin{aligned}\omega_p &= G_s(u_z - u_g) \\ u_g &= G_{cs}(\omega_p - \dot{\vartheta}) + G_g\dot{\vartheta} + N\end{aligned}\quad (2)$$

由(2)式得 捷联稳定方式下平台输出角速度为

$$\omega_p = \frac{G_s}{1 + G_s G_{cs}} u_z + \frac{G_s(G_{cs} - G_g)}{1 + G_s G_{cs}} \dot{\vartheta} - \frac{G_s}{1 + G_s G_{cs}} N \quad (3)$$

通常用下式表示弹体姿态扰动角速度 $\dot{\vartheta}$ 为

$$\dot{\vartheta}(t) = 2\pi f_m \vartheta_m \cos(2\pi f_m t) \quad (4)$$

式中 f_m —— 弹体扰动频率(Hz);

ϑ_m —— 扰动角的最大幅值(rad).

为了分析方便, 只考虑 $\dot{\vartheta}$ 的作用, 不考虑传感器测量噪声 N 时, 得到平台输出为

$$\omega_p \Big|_{\substack{u_z=0 \\ N=0}} = \frac{G_s(G_{cs} - G_g)}{1 + G_s G_{cs}} \dot{\vartheta} \quad (5)$$

在(5)式中, ω_p 是只有 $\dot{\vartheta}$ 作用下平台的角速度, 要消除弹体运动对天线指向的耦合作用, 即使 $\omega_p = 0$, 将该条件代入(5)式, 得出理想情况下捷联稳定(稳定解耦)的条件为

$$G_{cs} = G_g \quad (6)$$

即陀螺通道与测速环节传递函数完全匹配.

一般情况下, 测速环节动态性能比陀螺要快, 因此要使得两者匹配, 可以有 3 种方法^[1]: ① 对测速环节进行滤波来匹配低频的陀螺, 该方法相对比较容易, 便于工程实现; ② 通过补偿增加陀螺带宽来匹配快速的测速环节, 该方法也可以通过采用高性能、高频率的光纤陀螺来实现, 但是这种方法会放大惯性传感器的测量噪声; ③ 选择带宽介于陀螺和测速环节之间的传递函数, 然后分别对陀螺和测速环节传递函数进行校正来匹配选定的中间值, 该方法相对比较复杂. 考虑到实际工程的可实现性, 本文采用滤波的方法来进行传递函数匹配, 匹配效果将在下一部分的仿真结果中给出.

2.3 传感器测量噪声对稳定误差的影响

由图 2 和式(5)可以看出, 捷联稳定平台惯性角速度不能被速率陀螺直接测量, 而是通过弹体陀螺和测速环节的测量值间接合成的, 所以传感

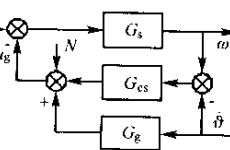


图 2 捷联稳定方案
控制原理框图

器测量误差对平台稳定性有一定的影响.

由(5)式还可知道, 增大测速环节 G_{cs} 的放大系数, 可以降低测量噪声对平台稳定误差的影响, 但不能无限制地增大放大系数来减小噪声的影响. 本文采用前向通道滤波的方法来消除噪声, 根据实际系统, 在假设传感器测量噪声 N 为具有一定功率谱密度的白噪声条件下, 本文对稳定误差进行了仿真, 具体结果将在下一部分给出.

3 仿真结果及分析

3.1 匹配滤波

本文对系统进行了传递函数匹配仿真, 具体方法为: 应用不变性原理, 对测速环节 G_{cs} 进行匹配滤波, 选择匹配滤波器传递函数形式为 $G_m = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$ ($T_1 < T_2$). 为比较方便, 采用文献[1]中给出的实例说明. 当选择不同的 T_1, T_2 时, 得到不同的匹配结果, 具体算例如下:

1) 给定 $T_2 = 0.004$, 改变 T_1 . 当 T_1 在 0.0005~0.002 范围内变化时, 得到如图 3 所示的解耦曲线;

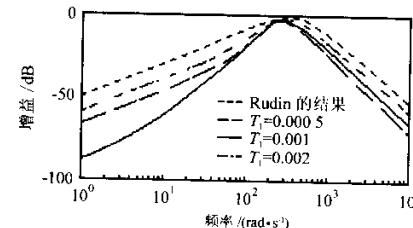


图 3 T_2 固定, T_1 变化时的解耦曲线

2) 固定 $T_1 = 0.001$, 改变 T_2 . 当 T_2 在 0.002~0.005 范围内变化时, 得到如图 4 所示的解耦曲线. 总结图 3、图 4 的仿真结果可以看出, T_1 在 0.0005~0.002 范围内变化, T_2 在 0.002~0.005 范围内变化时对系统均有不同程度的匹配效果, 平台扰动至少下降 10 dB, 但当 $T_1 = 0.001, T_2 = 0.004$ 时, 匹配效果最佳.

所以可以得出下面的结论: 选择匹配滤波器

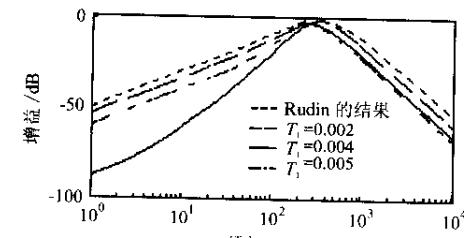


图 4 T_1 固定, T_2 变化时的解耦曲线

参数 T_1 在 0.001 附近, T_2 在 0.004 附近小范围内变化时, 均能得到较好的解耦特性; 当匹配滤波器 $G_m = \frac{0.001s + 1}{0.004s + 1}$ 时, 匹配效果是最优的, 得到的解耦结果与 Rudin 的结果相比, 在频率为 0.5 Hz ~ 1.0 Hz 时, 平台解耦精度提高了 35 dB.

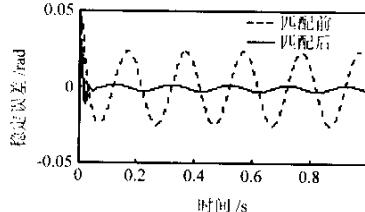


图 5 匹配前后稳定角误差比较结果

3.2 系统匹配前后的稳定角误差仿真

当匹配滤波器 $G_m = \frac{0.001s + 1}{0.004s + 1}$ 时, 给定系统

输入指令为脉冲信号, 幅度是 5 V, 采样周期为 0.002 s, 假定弹体姿态运动幅值 $\vartheta_m = 130 \text{ rad}$, 频率 $f_m = 5 \text{ Hz}$, 得到稳定误差曲线如图 5 中实线所示(虚线是匹配前角误差). 结果表明, 采用最佳匹配以后稳定误差减小了 80% 以上.

3.3 测量噪声对稳定角误差的影响

下面考虑噪声对稳定角误差的影响. 设测量噪声在系统频带内为白噪声, 功率谱密度为 0.01, 采样时间 0.05 s, 得到角误差曲线如图 6 中虚线所

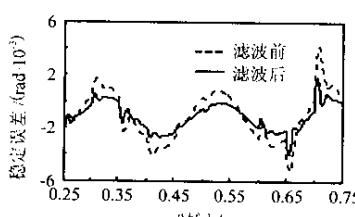


图 6 测量噪声滤波前后的角误差曲线(局部放大)

示. 为了减小测量噪声对稳定误差的影响, 在前向通路中加入一个噪声滤波器, 滤波后的稳定误差曲线如图 6 中实线所示. 与滤波前相比, 误差约降低 50%.

4 结 论

根据本文的研究, 结论如下: ①采用低性能速率陀螺时, 对测速环节进行匹配滤波, 在 0.5 Hz ~ 1.0 Hz 频带, 解耦精度提高 35 dB; ②为了减小测量噪声对稳定误差的影响, 在前向通路中加入一个噪声滤波器, 误差约降低 50%; ③本文的研究结果对实际工程具有指导意义, 但工程上具体如何实现, 还需要作进一步的研究.

参考文献 (References)

- [1] Rudin R T. Strapdown stabilization for imaging seeker [R]. AIAA-93-2660, 1993. 1 ~ 10
- [2] 穆 虹. 防空导弹雷达导引头设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996
- Mu Hong. Design of radar seeker for anti-aircraft missiles [M]. Beijing: Publishing House of Astronavigation, 1996 (in Chinese)
- [3] Stockum L A, Burge J, Plunk G. Electro-mechanical design for precision pointing and tracking systems [J]. Electromechanical System Interaction with Optical Design, SPIE, 1987, 779: 66 ~ 74
- [4] Masten M K, Hilkert J M. Electromechanical system configurations for pointing, tracking and stabilization applications [J]. Electromechanical System Interaction with Optical Design, SPIE, 1987, 779: 75 ~ 87
- [5] 高 烽 周 辉. 一种捷联式数字角信息处理系统 [J]. 制导与引信, 2000, 21(4): 1 ~ 11
- Gao Feng, Zhou Hui. A Strapdown digital system for angle signals Processing [J]. Guidance & Fuze, 2000, 21(4): 1 ~ 11 (in Chinese)
- [6] Debruin J C, Royalty J, Wand M, et al. Feedforward stabilization testbed [J]. SPIE, 1996, 2739: 204 ~ 214

Study of Stability for Strapdown Antenna Platform

Zhou Ruiqing Lü Shanwei

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Liu Xinhua

(No. 25 Institute of the Second Research Academy, CASIC)

Abstract: The strapdown stabilization model for imaging presented by Rudin was applied to antenna stabilized platform. Based on invariance principle, matching filter was used to stabilize antenna platform. The results show that decoupling precision is increased 35 dB at frequency 0.5 Hz ~ 1.0 Hz. The impact of sensor noise on stabilization error also was simulated. Simulating results show that filter is practical in eliminating noise, and stabilization error can be reduced almost 50%. The technique used and results obtained are instructive for engineering problems.

Key words: stabilized platform; strapdown gyroscope; matching filter; decoupling

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>