

基于角速度补偿的捷联天线稳定系统设计

赵超

(北京华航无线电测量研究所,北京 100013)

摘要:研究了半捷联末制导系统中捷联天线稳定系统的设计原理和控制算法。首先分析了捷联稳定和陀螺稳定的本质区别与联系;然后基于弹体、导引头、天线的三维运动关系,提出了一种新型捷联天线稳定系统控制方案。使用框架角测量和惯导信息重构天线的绝对空间运动信息,并采用角速度补偿方法和数学稳定平台实现导引头天线的间接稳定,能够解决导引头在纯稳定和目标跟踪两种工作模式下的天线控制问题。最后通过数学仿真验证了所提方法的有效性。

关键词:末制导;捷联稳定;数学平台;视线角速度;目标跟踪

中图分类号: V448.133

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2010)09-0060-05

Design of an Angular-Rate Compensation Based Strap-down Antenna Stabilization System

ZHAO Chao

(Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The design principle and control algorithms for strap-down antenna stabilization system of a seeker's tracking system were studied. First, the essential difference and similarity between strap-down stabilizing method and rate-gyro method was discussed. Then, a new design scheme of strap-down antenna stabilization system was proposed based on the analysis to 3D movement relationship of missile body, seeker, and antenna. The measurement of seeker gimbals angle and missile INS information were used to reconstruct the absolute angular-rate imformation of antenna. And the stabilization of seeker antenna was implemented by using angular-rate compensation method and a mathematical stabilization platform. The proposed scheme was adaptable to the seeker's antenna control applications both in pure stable mode and in target tracking mode. The effectiveness of the method was verified through computer simulations of an actual seeker's antenna servo control system.

Key words: terminal guidance; strap-down stabilization; mathematical control platform; LOS rate; target tracking

0 引言

捷联末制导是各种低成本、小型化制导武器的首选技术方案,它分为全捷联和半捷联两种方式^[1]。全捷联方式彻底取消了机械回转机构,体积、成本大幅降低,可靠性提高,但导引头需要较大的瞬时视场。半捷联方式综合了全捷联和传统陀螺稳定平台的优点,保留了机械回转框架,取消了导引头上独立配置的陀螺,利用弹上捷联惯导的姿态信息,实现天线平台的间

接稳定。半捷联末制导系统的技术核心是捷联天线稳定算法,它们大都采用以坐标变换为基础的角位置补偿控制方案,通过矢量的惯性指向不变性原理得出理想的伺服系统控制指令^[2-3],缺点是技术难度较大,控制精度不高,且用于制导的视线角速度信息提取困难。文献[1,4-5]研究了基于速度补偿的捷联稳定方案,提出采用天线伺服框架角速度和弹体角速度重构天线空间角速度的思想,并设计了匹配滤波器来提高稳定系统对弹体姿态的去耦能力。但是这些研究仅考虑了一维角运动的简单情况,实际上弹体和框架角都是框架三维运动,天线的空间运动关系远比该模型复杂得多。文献[6]考虑了三维运动情况,给出了能够使天

收稿日期:2009-08-09

修回日期:2009-10-14

作者简介:赵超(1972—),男,陕西西安人,博士,高工,主要研究方向为导弹制导与控制。

线指向惯性空间稳定的伺服系统速度补偿指令。但是没有给出天线稳定控制系统的整体控制结构,没有建立末制导系统跟踪回路和稳定回路的衔接关系,所以只能解决天线的纯稳定问题,而无法处理目标跟踪情况下的天线控制问题。

本文研究了半捷联末制导系统中捷联天线稳定系统设计的问题,提出了一种新的基于角速度补偿的捷联天线稳定控制算法,给出了末制导系统天线稳定平台的完整实现方案,该方案能够解决天线的纯稳定和目标跟踪两种工作模式下的天线控制问题。

1 天线稳定系统工作原理

1.1 陀螺稳定方案

弹载末制导系统的天线稳定系统一般采用两轴回转框架结构,通过直流力矩电机带动天线盘运动以实现俯仰、航向双平面跟踪能力。在导弹飞行过程中,弹体姿态的变化会通过框架摩擦力矩作用在回转框架上,造成天线指向的偏差,因此天线稳定系统还必须能够隔离弹体姿态扰动的影响。在传统的速率陀螺稳定系统中,两个陀螺正交地安装在天线盘背面,可以直接敏感出天线的空间运动角速度,从而实现天线空间指向稳定和对弹体姿态扰动的解耦。天线陀螺稳定系统的原理框图如图1所示,其中: G_s 为天线伺服系统传递函数; G_r 为速率陀螺传递函数; ε 为跟踪回路误差信号; u_c 为稳定回路指令信号; u_f 为稳定回路反馈信号; $\vartheta, \lambda, \theta$ 分别为弹体姿态角、伺服框架角、天线空间指向角,它们之间的关系如图2所示(一维相对运动情况)。

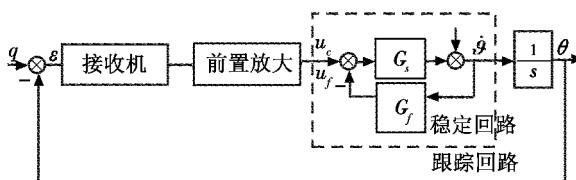


图 1 天线陀螺稳定系统原理图

Fig. 1 Schematic of the gyro stabilization system

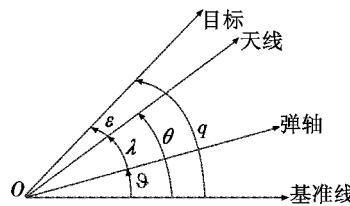


图2 空间角位置关系示意图

Fig. 2 Schematic of spatial angles

可以看出,天线稳定系统是一个双回路控制系统,外环为跟踪回路,用来检测目标跟踪过程中的角误差,内环为稳定回路,用于控制天线伺服机构电机转速,消

除天线指向误差,同时补偿弹体姿态扰动的影响。一般利用速率陀螺输出目标视线角速度信息,采用比例导引方法控制导弹飞向目标。

根据图 1, 可求出天线稳定回路(虚框中的部分)的传递函数为

$$\dot{\theta} = \frac{G_s}{1 + G_s G_f} u_c + \frac{1}{1 + G_s G_f} \dot{\vartheta} \quad (1)$$

可见,天线运动不仅取决于稳定回路指令信号(与跟踪回路误差有关),还受到弹体姿态运动的影响。理想情况下要求天线指向对弹体姿态解耦,为此控制系统设计中一般希望天线伺服系统前向通道的增益尽可能大,当 $|G_s| >> 1$ 时,稳定系统可实现弹体姿态扰动的去耦。

1.2 捷联稳定方案

根据图 2, 有 $\dot{\theta} = \dot{\lambda} + \dot{\vartheta}$, 据此可将图 1 中的稳定回路变换为图 3a 中的等效形式。可见, 稳定系统需要同时反馈框架角速度 $\dot{\lambda}$ 和弹体角速度 $\dot{\vartheta}$, 其中框架角速度信号用于跟踪稳定回路指令, 弹体角速度信号用于补偿弹体姿态运动。只不过在陀螺稳定系统中, $\dot{\lambda}$ 和 $\dot{\vartheta}$ 同时被速率陀螺所敏感。假设 $\dot{\lambda}$ 和 $\dot{\vartheta}$ 分别由不同的传感器来敏感, 即稳定回路进一步变换为图 3b 的形式, 其中 G_s 为与天线同轴的测速元件, G_g 为捷联陀螺, 显然从物理意义上仍然可以实现天线的指向稳定和弹体姿态解耦功能, 这就是捷联稳定的原理。

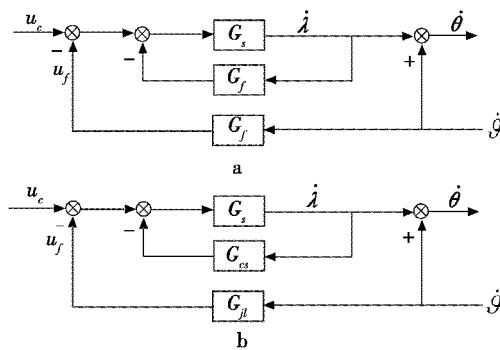


图3 稳定回路等效图

Fig. 3 Equivalent diagram of stabilization loop

在捷联末制导系统中,导引头中取消了陀螺,天线稳定系统中所需的空间绝对角速度信息无法直接测量,此时可以利用弹上捷联惯导给出的弹体姿态运动信息,以及导弹、导引头、天线之间的相对运动关系,使用运动合成方法来重构天线空间运动信息,最终实现天线平台的间接稳定。

需要指出在陀螺稳定方案中,导弹制导所用的
目标视线角速度信息可以通过速率陀螺直接提取,而在
捷联稳定方案中,惯导陀螺并不跟随视线运动,视线角
速度信息只能通过数学方法间接提取。

2 捷联天线稳定系统控制方案

2.1 捷联稳定系统原理与组成

捷联天线稳定系统的原理框图如图 4 所示, 其中测角元件敏感天线框架角运动, 捷联惯导敏感弹体姿态运动, 这些信息同时送给 DSP 控制模块, 完成天线伺服系统控制量计算, 再通过功率放大带动天线伺服

机构运动。DSP 控制模块是捷联稳定系统的核心, 它包括伺服系统校正网络、稳定回路反馈量计算、视线角速度估算 3 种功能。可见, 捷联天线稳定平台本质上是一种数学稳定平台, 它依靠数学解算实现天线稳定控制与目标跟踪, 同时利用坐标变换关系对目标视线角速度信息进行估算用于比例导引。

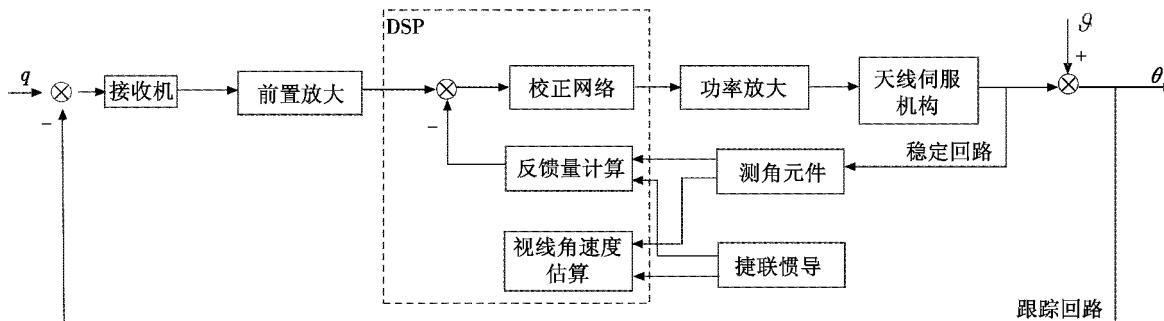


图 4 捷联天线稳定系统原理图

Fig. 4 Schematic of the strap-down stabilization system

根据 1.2 节中的分析, 可以画出捷联天线稳定系统中稳定回路的控制方块图如图 5 所示。其中: G_s 为天线伺服系统; G_{es} 为与天线同轴的测速元件; G_{jl} 为捷联陀螺; N 为测速环节的传感器噪声; u_f 为稳定回路反馈信号; \hat{q} 为目标视线角速度估计输出(用于比例导引); $\vartheta, \lambda, \theta$ 分别为弹体姿态角、伺服框架角、天线空间指向角。

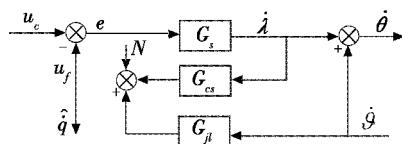


图 5 捷联稳定系统原理图

Fig. 5 Schematic of strap-down stabilization

根据图 5 可知, 在捷联稳定方案中, 天线空间角速度为

$$\dot{\theta} = \frac{G_s}{1 + G_s G_{es}} u_e + \frac{1 + G_s (G_{es} - G_{jl})}{1 + G_s G_{es}} \dot{\vartheta} - \frac{G_s}{1 + G_s G_{es}} N \quad (2)$$

忽略传感器噪声 N 的影响, 当陀螺通道与测速环节的传递函数完全匹配(即 $G_{es} = G_{jl}$)时, 上式简化为

$$\dot{\theta} = \frac{G_s}{1 + G_s G_{es}} u_e + \frac{1}{1 + G_s G_{es}} \dot{\vartheta} \quad (3)$$

对比式(1)可见, 此时捷联方案和陀螺方案的效果完全相同, 当 $|G_s| \gg 1$ 时, 稳定系统可以实现弹体姿态去耦功能。

2.2 角速度补偿信号解算

必须指出: 前面的分析仅仅为了说明天线稳定系统的控制原理, 其中各种空间角位置的关系(参考图 2)只有在一维情况下才是有效的, 实际上, 因为导弹弹

体同时存在俯仰、航向、滚动 3 个通道姿态运动, 导引头天线伺服系统也同时进行俯仰、航向两个通道的运动, 这样实际的天线空间运动合成关系就不能按照 $\dot{\theta} = \dot{\lambda} + \dot{\vartheta}$ 的简单关系来表示。下面讨论在空间三维运动的情况下, 如何确定捷联稳定系统的速度补偿信号 u_f 。

设天线坐标系和弹体坐标系的转换关系如图 6 所示。

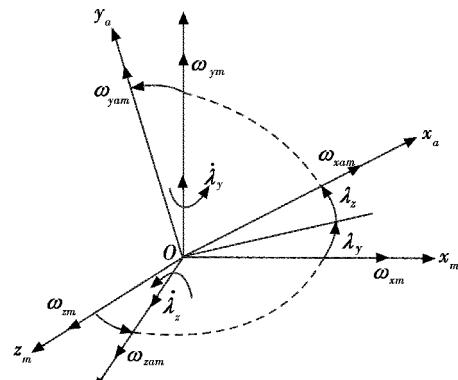


图 6 坐标系转换关系

Fig. 6 Conversion of coordinate system

图中: $Ox_m y_m z_m$ 为弹体坐标系; $Ox_a y_a z_a$ 为天线坐标系(假定两坐标原点相同); λ_y, λ_z 为天线平台伺服框架角; $\dot{\lambda}_y, \dot{\lambda}_z$ 为框架角速度; $\omega_{xm}, \omega_{ym}, \omega_{zm}$ 为导弹角速度的弹体坐标系分量。设天线绝对角速度在天线坐标系中的分量为 $\omega_{xas}, \omega_{yas}, \omega_{zas}$, 显然天线在惯性空间的运动由天线伺服系统的运动和弹体姿态的牵连运动两部分组成, 令 $\omega_{xas}, \omega_{yas}, \omega_{zas}$ 表示前者引起的天线角速度分量, $\omega_{xam}, \omega_{yam}, \omega_{zam}$ 表示后者引起的天线角速度分量。

根据坐标变换关系有：

$$\begin{cases} \omega_{xam} = \omega_{xm} \cos \lambda_y \cos \lambda_z + \omega_{ym} \sin \lambda_z - \omega_{zm} \sin \lambda_y \cos \lambda_z \\ \omega_{yam} = -\omega_{xm} \cos \lambda_y \sin \lambda_z + \omega_{ym} \cos \lambda_z + \omega_{zm} \sin \lambda_y \sin \lambda_z \\ \omega_{zam} = \omega_{xm} \sin \lambda_y + \omega_{zm} \cos \lambda_y \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \omega_{xas} = \dot{\lambda}_y \sin \lambda_z \\ \omega_{yas} = \dot{\lambda}_y \cos \lambda_z \\ \omega_{zas} = \dot{\lambda}_z \end{cases} \quad (5)$$

于是：

$$\begin{cases} \omega_{xa} = \omega_{xam} + \omega_{xas} \\ \omega_{ya} = \omega_{yam} + \omega_{yas} \\ \omega_{za} = \omega_{zam} + \omega_{zas} \end{cases} \quad (6)$$

为简化分析，暂时忽略传感器噪声 N 的影响，并假定图 5 中两个测速通道的传递函数为匹配环节，即 $G_{es} = G_{jl} = G_f$ 。

1) 天线俯仰通道，取：

$$u_{zf} = G_f(\omega_{zas} + \omega_{zam}) = G_f(\dot{\lambda}_z + \omega_{zam}) \quad (7)$$

因为 $e_z = u_{zc} - u_{zf}$, $\dot{\lambda}_z = G_s e_z$, 可得 $\dot{\lambda}_z = \frac{G_s}{1 + G_s G_f} u_{zc}$

$\frac{G_s G_f}{1 + G_s G_f} \omega_{zam}$ 。于是有：

$$\theta_z = \omega_{za} = \lambda_z + \omega_{zam} = \frac{G_s}{1 + G_s G_f} u_{zc} - \frac{1}{1 + G_s G_f} \omega_{zam} \quad (8)$$

2) 天线航向通道，取：

$$u_{yf} = G_f(\omega_{yas} + \omega_{yam}) = G_f(\dot{\lambda}_y \cos \lambda_z + \omega_{yam}) \quad (9)$$

因为 $e_y = u_{ye} - u_{yf}$, $\dot{\lambda}_y = G_s e_y$, 可得 $\dot{\lambda}_y = \frac{G_s}{1 + G_s G_f \cos \lambda_z} u_{ye} - \frac{G_s G_f}{1 + G_s G_f \cos \lambda_z} \omega_{yam}$ 。于是有：

$$\dot{\theta}_y = \omega_{ya} = \dot{\lambda}_y \cos \lambda_z + \omega_{yam} = \frac{G_s \cos \lambda_z}{1 + G_s G_f \cos \lambda_z} u_{ye} - \frac{1}{1 + G_s G_f \cos \lambda_z} \omega_{yam} \quad (10)$$

将式(8)、式(10)和式(1)对比，可见采用上述速度补偿信号后，捷联稳定方案在最终的控制效果上完全等效于陀螺稳定方案。于是式(4)~式(10)就构成了基于速度补偿的捷联稳定控制算法。

2.3 目标视线角速度估算

在陀螺稳定系统中，速率陀螺所敏感的天线坐标系角速度分量就是目标视线角速度。类似地，在捷联稳定系统中可以按照如下方法得到视线角速度的估计值：

$$\begin{cases} \hat{q}_y = \omega_{ya} = \dot{\lambda}_y \cos \lambda_z + \omega_{yam} \\ \hat{q}_z = \omega_{za} = \dot{\lambda}_z + \omega_{zam} \end{cases} \quad (11)$$

在捷联稳定控制算法中必须注意以下问题：

1) 理想的速度补偿效果要求稳定系统的陀螺通道与测速环节的传递函数完全匹配（即 $G_{es} = G_{jl}$ ），而实际上的测速环节动态特性一般比陀螺要快，要使两者匹配，最实用的方法是设计适当的数字匹配滤波器对测速环节进行处理以提高稳定回路对弹体姿态运动的去耦能力^[3~4]。

2) 捷联算法中需要对伺服框架角 λ 进行微分运算，这将会放大传感器的测量噪声，因此天线框架角的测量需要采用高精度低噪声的测角元件（必要时进行滤波处理），或者选用带有角速度输出功能的旋变解调器，如果确需进行微分运算，最好对微分器的输出进行低通滤波后再使用，以免产生过大的控制量超出伺服系统响应范围，最终导致较差的控制效果。

3 仿真结果

对图 4 所示的捷联天线稳定系统进行数学仿真，有关参数如下：接收机信号处理延迟为 0.1 s，前置放大倍数为 8，伺服系统电机带载时间常数为 0.1 s，校正网络采用 PID 校正，测角元件的噪声模型取方差为 10^{-6} 的白噪声，为了克服微分运算对噪声的放大作用，增加一个传递函数为 $\frac{1}{0.01 s + 1}$ 的数字滤波器，同时假设陀螺通道与测速环节的传递特性完全匹配。此外，弹体姿态运动参数取为： $\vartheta_x = 1 \cdot \sin 2\pi t$, $\vartheta_y = 1.5 \sin 10t$, $\vartheta_z = 1.2 \sin 5t$ 。

捷联天线稳定系统在纯稳定方式下的仿真结果如图 7~图 8 所示。在角速度补偿控制算法的作用下，天线指向表现出较强的弹体姿态解耦能力，其中航向耦合系数约为 3.3%，俯仰耦合系数约为 4.2%。另假设目标机动为 1°的阶跃运动，末制导系统在目标跟踪方式下的仿真结果如图 9~图 10 所示，相应的伺服框架角速度的仿真结果如图 11~图 12 所示。可见，在捷联稳定系统作用下，天线能够较快地跟踪目标角运动，跟踪过程超调量适中、静差不大，能够满足末制导系统的要求。

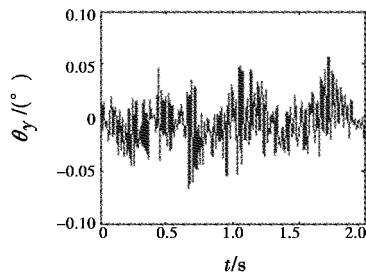


图 7 天线指向误差(航向通道)

Fig. 7 Antenna pointing error (azimuth)

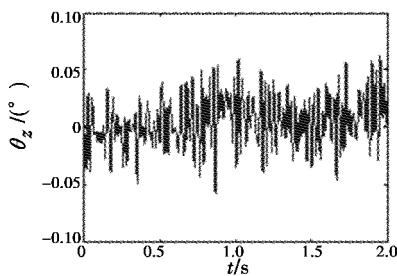


图 8 天线指向误差(俯仰通道)

Fig. 8 Antenna pointing error (elevation)

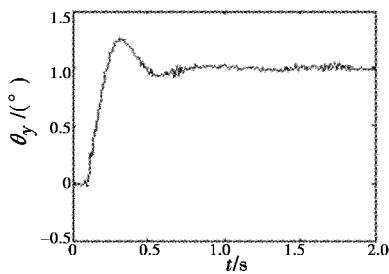


图 9 天线空间指向(航向通道)

Fig. 9 Antenna pointing direction (azimuth)

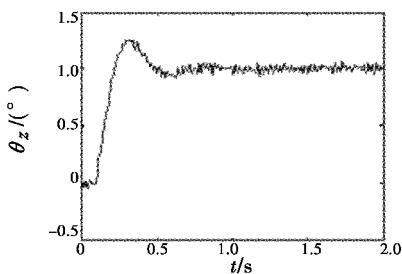


图 10 天线空间指向(俯仰通道)

Fig. 10 Antenna pointing direction (elevation)

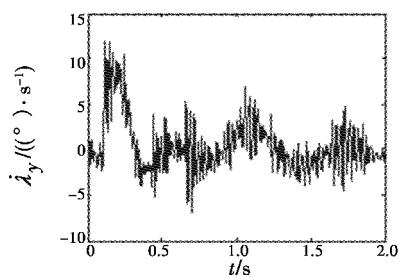


图 11 框架角速度(航向通道)

Fig. 11 Gimbal angular rate (azimuth)

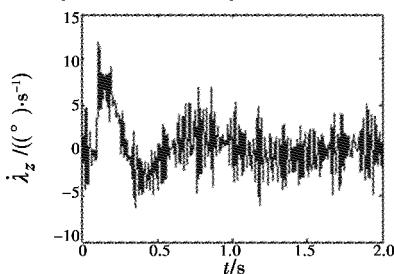


图 12 框架角速度(俯仰通道)

Fig. 12 Gimbal angular rate (elevation)

4 结论

在捷联末制导系统中,导引头中取消了陀螺,天线稳定系统所需的空间绝对角速度信息无法直接测量,此时可以利用弹上捷联惯导给出的弹体姿态运动信息,以及导弹、导引头、天线之间的相对运动关系,使用运动合成方法来重构天线空间运动信息,最终实现天线平台的间接稳定,这就是基于角速度补偿的捷联天线稳定方案。捷联天线稳定系统本质上是一种数学稳定平台,其核心是基于 DSP 的解算控制模块,它包括伺服系统校正网络、稳定回路反馈量计算、视线角速度估算 3 种功能。

因为导弹弹体同时存在俯仰、航向、滚动 3 个通道姿态运动,导引头天线伺服系统也同时进行俯仰、航向两个通道的运动,这样实际的天线空间运动合成关系就不能按照 $\dot{\theta} = \lambda + \vartheta$ 的简单关系来表示,需要根据坐标变换关系和运动合成原理通过数学解算来获取,同时用于制导的目标视线角速度信息也可以通过数学方法间接提取。

在理想条件下,当陀螺通道与测速环节的传递函数完全匹配时,捷联稳定方案可以获得与陀螺稳定方案完全等效的控制效果,但是实际的测速环节动态特性一般都比陀螺系统要快,所以需要设计适当的匹配滤波器来平衡二者特性。此外,捷联算法中需要对伺服框架角 λ 进行微分运算,这将会放大传感器的测量噪声,需要采用高精度低噪声的测角元件,对传感器输出进行滤波处理以克服噪声的影响。

参 考 文 献

- [1] RUDIN R T. Strapdown stabilization for imaging seekers [R]. AIAA-93-2660, 1993; 1-10.
- [2] KENNEDY P J, KENNEDY R L. Direct versus indirect Line of Sight (LOS) stabilization [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2003, 11(1): 3-15.
- [3] 周瑞青, 吕善伟, 刘新华. 捷联式天线平台的角跟踪系统设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25 (10): 1200-1202.
- [4] 周瑞青, 吕善伟, 刘新华. 捷联式天线平台的稳定性研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(6): 509-511.
- [5] 张聘义, 邱载康, 崔莹莹. 一种匹配滤波方法在导引头捷联稳定平台中的应用研究 [J]. 红外技术, 2005, 27 (1): 6-11.
- [6] 周瑞青, 吕善伟, 刘新华. 弹载捷联式天线平台两种稳定实现方法的比较 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (8): 1397-1400.

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>