

## 移动卫星天线的自适应鲁棒控制系统

李 果, 胡剑飞, 余达太

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了改善移动卫星天线的控制性能和稳定性, 本文进行移动卫星天线的自适应鲁棒控制系统的研究. 首先针对移动卫星天线数学模型, 设计自适应鲁棒控制器和控制系统. 所提出的自适应鲁棒控制律和控制系统不仅保证了闭环系统的稳定性, 而且实现了所期望的性能. 最后通过试验结果证明该控制算法的有效性. 尽管外界环境道路条件的变化不同, 移动卫星天线控制系统表现了满意的控制性能.

**关键词:** 移动卫星天线; 自适应控制; 鲁棒控制

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Adaptive robust controller of mobile satellite antenna systems

LI Guo, HU Jian-fei, YU Da-tai

(College of Information Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The use of the adaptive robust controller for improving control performance and stability of mobile satellite antenna systems is investigated in this paper. An adaptive robust control system of mobile satellite antennas is presented. The adaptive robust controller is designed according to the mobile satellite antenna systems model. The proposed adaptive controller and the corresponding robust adaptive law not only keep the closed-loop system robustly stable, but also provide the expected performance. Finally, the effectiveness of the algorithm is verified by experimental results, demonstrating that the control performance and stability of mobile satellite antenna systems are improved, and the control system maintains satisfactory control performance despite the change of road surface condition.

**Key words:** mobile satellite antennas systems; adaptive control; robust control

### 1 引言(Introduction)

信息技术深刻的改变着人们的生活和工作方式, 先进的通讯手段已经成为信息社会中必不可少的一部分. 移动卫星通讯是卫星通讯的发展方向, 它不但是未来军事斗争中的主要通讯手段, 也是日益发展的民用卫星通讯所追求的目标. 目前国外关于移动卫星天线系统的鲁棒性研究正在深入展开<sup>[1,2]</sup>, 而我国在这方面研究的还处于初期阶段. 上海交通大学、西北工业大学等在研制移动卫星通讯和电视接收系统方面, 做了一些有益的探索. 关于移动卫星天线数学模型方面, 目前采用是直流电动机线性定常模型. 模型中没有考虑系统参数不确定性变化、互相耦合关联作用和外界环境的干扰力矩<sup>[3~5]</sup>. 而控制方法大都采用经典控制, 控制器设计回避了系统中参数不确定性变化和外界环境带来的干扰力矩的影响因素, 因而对系统参数不确定性变化、互相耦合关联作用和由于车船运行中的振动、摇摆、路

面不平所带来的干扰力矩没有好的抑制作用. 移动卫星天线跟踪系统所担负的是对时效性要求较高的任务, 它需要在载体不停的摇摆以及转向中实时地保证天线对准卫星. 载体在运动过程中的不确定性变化使得系统具有时变非线性和不确定性、容易受到外界干扰因素影响, 因此, 如何提高天线系统鲁棒自适应是移动卫星天线控制工程中的一个重要研究课题.

本文在移动卫星天线数学模型的基础上, 设计一种基于自适应鲁棒控制的移动卫星天线控制系统, 它对天线系统具体参数的不确定性非线性变化、互相耦合关联作用和外界各种干扰力矩影响的敏感性较低, 它改善系统动态响应特性, 提高系统自适应能力, 因此具有较好的鲁棒性. 所提出的控制算法在移动卫星天线试验平台上进行了试验, 有试验结果验证了这种方法的有效性. 尽管外界各种环境路面、海洋状况变化不同, 移动卫星天线控制系统

表现了满意的控制性能。

## 2 移动天线系统模型(System models for satellite antennas)

移动卫星天线具有水平方位角 $\beta$ 和垂直俯仰角 $\varepsilon$ 两个自由度, 每个自由度分别由一套直流电动机伺服系统加以驱动。每套机构组成见图1。在图1中,  $U_a$ 为加在直流电动机电枢上的电压,  $R_d$ 为电枢绕组电阻,  $L_d$ 为电枢绕组电感,  $K_m$ 为电动机力矩系数,  $K_e$ 为直流电动机反电动势常数。

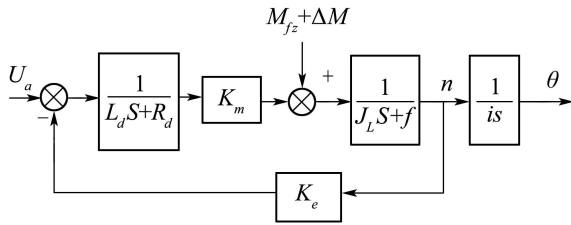


图1 卫星天线模型

Fig. 1 Satellite antennas system models

$J_L$ 为电机变速机构和负载折合到电动机轴上的转动惯量,  $f$ 为电机变速机构和负载折合到电动机轴上的粘性摩擦系数,  $n$ 为转速,  $\theta$ 为角位移, 代表天线旋转方位角 $\beta$ 和高低俯仰角 $\varepsilon$ 。  $M_{fz}$ 是由于道路路面凹凸不平 and 系统振动带来的等效到电动机输出轴上的干扰力矩和负载力矩。  $\Delta M$  是考虑天线旋转方位角 $\beta$ 和高低俯仰角 $\varepsilon$ 之间互相耦合关联的干扰力矩。  $f, M_{fz}, \Delta M$  是非线性不确定变化干扰量。系统由于饱和、摩擦、齿隙、非线性弹性形变、路面不平、互相耦合关联作用、车辆运行振动、负载不确定性等等因素, 直接通过参变量 $f, M_{fz}, \Delta M$ 表现出复杂非线性不确定性变化, 从而对移动卫星天线跟踪控制系统的稳态、动态性能产生较大的影响, 使控制跟踪性能变坏。由图1可得其微分方程为

$$\begin{aligned} & \theta^{(3)}(t) + \theta^{(2)}(t) * (J_L R_d + f L_d) / J_L L_d + \\ & \theta^{(1)}(t) * (f R_d + K_m K_e) / J_L L_d = \\ & K_m U_a(t) / J_L L_d + [R_d * (M_{fz} + \Delta M) + \\ & L_d (M_{fz}^{(1)} + \Delta M^{(1)})] / J_L L_d. \end{aligned}$$

式中:  $M_{fz}^{(1)}, M_{fz}, f, \Delta M^{(1)}, \Delta M$  均是非线性不确定变化量, 有些量值很大, 影响不能忽略。上式可写成状态方程形式

$$E^{(1)}(t) = AE(t) + BU_a(t) + B_0(\Psi^T \Phi + \theta_d^{(3)}). \quad (1)$$

式中:

$$E(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\tau \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \theta^{(1)}(t) \\ \theta^{(2)}(t) \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$e_1(t) = \theta_d - \theta(t), \quad e_2(t) = \theta_d^{(1)} - \theta^{(1)}(t),$$

$$e_3 = \theta_d^{(2)} - \theta^{(2)}(t), \quad \tau = K_m / J_L L_d,$$

$$P_0 = (f R_d + K_m K_e) / J_L L_d,$$

$$P_1 = (J_L R_d + f L_d) / J_L L_d,$$

$$P_2 =$$

$$[R_d * (M_{fz} + \Delta M) + L_d (M_{fz}^{(1)} + \Delta M^{(1)})] / J_L L_d,$$

$$B = -\tau B_0,$$

$\tau, U_a(t), P_0, P_1, P_2$  均为实数;  $\theta_d, \theta_d^{(1)}, \theta_d^{(2)}, \theta_d^{(3)}$  为期望的角位移、角速度、角加速度、角加加速度值;  $P_0, P_1, P_2$  为非线性不确定变化量, 无法测定。

## 3 移动天线跟踪系统(Control system for satellite antennas)

系统组成见图2, 它是由GPS接收计算机车载天线控制系统组成。

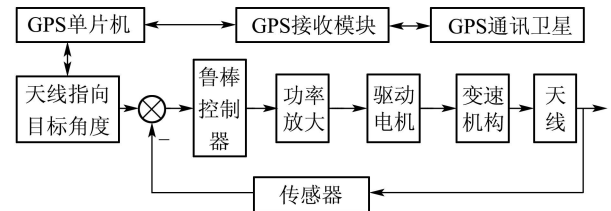


图2 卫星天线控制系统

Fig. 2 Satellite antennas control system

移动卫星天线控制系统由GPS接收部份和跟踪控制部份组成。GPS接收部份的接收模块接收GPS发来的车船此刻的位置、速度和加速度状态量, 通过异步串口通讯传给GPS单片机。GPS单片机进行数据筛选、滤波、整理和计算后, 将结果通过异步串口通讯传给跟踪控制计算机。跟踪控制计算机用此值计算出车船上的卫星天线对准卫星的期望水平方位角 $\beta_d$ 和垂直方向上的期望俯仰高低角 $\varepsilon_d$ 。同时将期望值与用传感器测量的车船行驶水平方位角 $\beta$ 和垂直俯仰角 $\varepsilon$ 两个自由度上的实际角度、角速度、角加速度量进行比较得到误差, 计算机对此误差用自适应鲁棒控制算法处理, 得到控制信号 $U_a(t)$ 后功率放大控制伺服系统驱动电动机, 转动天线使得天线中心轴始终对准卫星, 确保车船在行驶过程中完好接收卫星信号。

## 4 自适应鲁棒控制器(Adaptive robust controller)

自适应鲁棒控制器如图3所示。从移动卫星天线系统模型可以看出, 这是一个含有不确定性的时变数学模型。其中 $M_{fz}^{(1)}, M_{fz}, f, \Delta M^{(1)}, \Delta M$  均是非线

性不确定变化量, 且不易测量. 针对这样的控制对象采用自适应鲁棒控制器的目的是在控制器中引入与不确定性参数对应的可调参数, 通过在线修正该参数来保证整个闭环系统的动态品质. 这种设计思想与经典的自适应控制相似, 但是它并不是建立在对被控对象参数的准确估计上. 实际上, 这种控制器的可调参数可以解释为控制器的一个状态变量. 因此, 所设计的自适应鲁棒控制器是一种动态控制器.

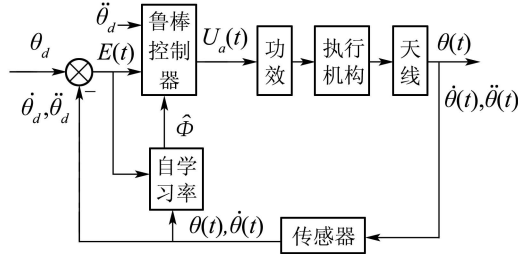


图3 自适应鲁棒控制器

Fig. 3 Adaptive robust controller

车载天线控制系统的核心是自适应鲁棒控制系统的设计. 首先针对系统式(1), 取控制器输入 \$U\_a\$ 为

$$U_a(t) = U(t) + K^T E(t),$$

则式(1)变成式(2):

$$E^{(1)}(t) = E(t)(A + BK^T) + BU(t) + B_0(\Psi^T \hat{\Phi} + \theta^{(3)}(t)). \quad (2)$$

其中: \$K^T\$ 为控制器增益行向量, \$K^T \in \mathbb{R}^{1 \times 3}\$, 对式(2), 取李雅普诺夫函数, 得式(3):

$$V(t) = E^T(t)PE(t)/2 + (\Phi - \hat{\Phi})^T R(\Phi - \hat{\Phi})/2. \quad (3)$$

其中: \$P > 0, R > 0\$ 均为正定对称矩阵, \$\hat{\Phi}\$ 为不确定参数列向量的估计值, \$\Phi\$ 为不确定参变列向量的真值, \$\Delta\Phi\$ 为对应误差, \$\Delta\Phi = \Phi - \hat{\Phi}\$.

$$\begin{aligned} V^{(1)}(t) = & [E(t)P\dot{E}^T(t) + \dot{E}(t)PE^T(t)]/2 - \dot{\hat{\Phi}}^T R\Delta\Phi = \\ & E^T(t)[(A + BK^T)^T + P(A + BK^T)]E(t)/2 + \\ & UB^T PE + (\Psi^T \hat{\Phi} + \theta_d^{(3)})B_0^T PE(t) - \dot{\hat{\Phi}}^T R\Delta\Phi. \end{aligned} \quad (4)$$

选择合适的 \$K^T\$, 对一任意正定对称阵 \$P\$, 总有正定对称阵 \$Q\$, 使得下式成立:

$$(A + BK^T)^T + P(A + BK^T) = -Q,$$

并令 \$\Delta\Phi = \Phi - \hat{\Phi}\$ 代入式(4)有

$$\begin{aligned} V^{(1)}(t) = & -E^T(t)QE(t)/2 + UB^T PE(t) + (\Psi^T \hat{\Phi} + \\ & \theta_d^{(3)})B_0^T PE(t) + \Psi^T \Delta\Phi B_0^T PE(t) - \dot{\hat{\Phi}}^T R\Delta\Phi. \end{aligned}$$

令

$$\dot{\hat{\Phi}} = (B_0^T PE(t))R^{-1}\Psi, \quad (5)$$

$$U = (\Psi^T \hat{\Phi} + \theta_d^{(3)})/\tau, \quad (6)$$

则

$$V^{(1)}(t) = -E^T(t)QE(t)/2 < 0,$$

因此有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0.$$

故系统是一致渐进稳定的. 有定理如下:

**定理** 对于系统(1), 若取自学习率如下:

$$\dot{\hat{\Phi}} = (B_0^T PE(t))R^{-1}\Psi. \quad (7)$$

控制输入量 \$U\_a(t)\$ 如下:

$$U_a(t) = K^T E(t) + (\Psi^T \hat{\Phi} + \theta_d^{(3)}), \quad (8)$$

则系统(1)是一致渐进稳定的, 且有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0.$$

控制系统框图见图3.

## 5 天线实验台(Experimental devices)

试验是在移动卫星天线性能试验台上进行(见图4). 试验台上共有方位角, 俯仰高低角二套控制系统, 分别对水平方位角, 俯仰高低角实施跟踪控制. 每套驱动执行机构由功率放大级、直流电动机和角度、角速度、角加速度传感器等组成. 每个控制系统算法都是基于自适应鲁棒控制算法设计. 控制系统核心是高速信号处理器TMS320F240 DSP专用芯片, 它不仅完成自适应鲁棒控制算法, 还对长时间行驶积累的误差进行修正. 图中天线转台的减速比为1:8. 系统中角位移、角速度、角加速度测量用陀螺、旋转变压器和应变式感应传感器等组合测量.

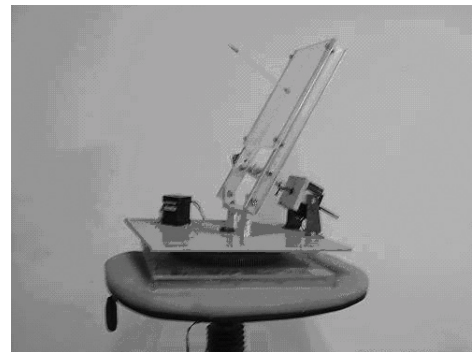


图4 实验移动卫星天线

Fig. 4 Experimental devices

## 6 试验结果(Experimental results)

将实验移动卫星天线安装在一辆中型面包车上. 试验场地分别是8000 m<sup>2</sup>凹凸不平的宽广土操场和平坦高速公路. 试验时, 通过让车辆在不同路面情况下转动方位角和高低俯仰角, 以此检验移动卫

星天线控制系统的控制效果. 需要说明的是在实际中方位角 $\beta$ 和俯仰角 $\varepsilon$ 有相互耦合关联影响, 见式(1). 处理方法是自适应鲁棒控制算法中引入与不确定性参数对应的可调参数, 通过在线修正该参数来补偿非线性不确定变化干扰量, 保证整个闭环系统的动态品质. 此外, 在同等情况下, 控制程序优先满足方位角精度要求, 而后再满足俯仰角精度要求. 这在实际中可以避免由于解耦而带来的大量繁琐计算, 实际调试时效果较好. 另外, 式(8)中的测量值二阶导数带来的噪声较大, 实际中采用硬件滤波和软件滤波处理. 实验台的基本参数见表1.  $K_i (i = 1, 2, 3)$  控制器参数绝对值选取一般不过大, 过大虽然增加了鲁棒性, 但使系统增加保守性, 使系统动态指标变坏, 超调量增大. 实际整定时结合常用工程方法扩充临界比例法和试凑法, 得到控制器参数 $K^T$ 的 $k_1, k_2, k_3$ 的数值为 $-1.38, -3.36, -1.16$ .  $R = 0.6I, P = 0.8I, I$ 是3阶单位矩阵. 自适应鲁棒控制器的控制输入的计算见式(7)(8). 实验时车辆先在平坦高速公路上用指定车速60 km/h行驶, 而后开始以水平匀速角速度 $n = \pi/4$  rad/s转动水平方位角. 图5是水平方位角和角速度变化实测曲线, 水平方位角转动90°的情况. 这时水平方位角角位移误差 $e_1(t)$ 变化很小, 性能满足要求. 垂直俯仰高低角角位移跟踪误差 $e_1(t)$ 同样变化很小, 性能满足要求. 用调整后的PID控制器控制移动卫星天线, 其水平方位角位移跟踪误差变化也很小, 性能满足要求.

表1 实验装置

Table 1 Experimental devices

| 参数               | 单位                | 数值        |
|------------------|-------------------|-----------|
| 电枢绕组电感 $L_d$     | H                 | 0.00373   |
| 电机力矩系数 $K_m$     | Nm/A              | 0.00313   |
| 输出轴上等效转动惯量 $J_L$ | kg·m <sup>2</sup> | 0.0000607 |
| 电枢绕组电阻 $R_d$     | $\Omega$          | 0.529     |

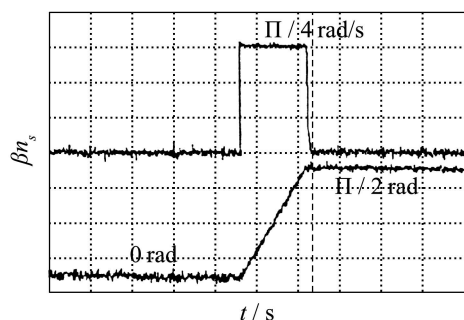


图5 方位角和角速度变化实测曲线

Fig. 5 Experimental results of the direction angle

当试验场地是8000 m<sup>2</sup>凹凸不平的宽广土操场时, 与在平坦高速公路上做同样实验进行比较, 这

时道路状况改变了, 路面起伏不平, 控制器所有控制器参数都不做任何改动. 实验时车辆先用指定车速60 km/h行驶, 而后开始以水平匀速转动角速度 $n = \pi/4$  rad/s转动水平方位角90°的情况. 这时采用自适应鲁棒控制的水平方位角位移跟踪误差变化实测曲线见图6中的曲线①. 可以看出这时的角位移跟踪误差 $e_1(t)$ 变化较小, 仍然满足性能指标的要求, 将结果用记忆存储示波器记录下来. 而后用PID算法控制的移动卫星天线系统的水平角位移跟踪误差 $e_1(t)$ 变化的实测曲线见图6中的曲线②. 可以看出这时的实测曲线摆动较大, 有些振荡, 不满足性能指标的要求. 由此可见, 基于自适应鲁棒控制的移动卫星天线性, 提高了天线系统对各种路面的适应能力.

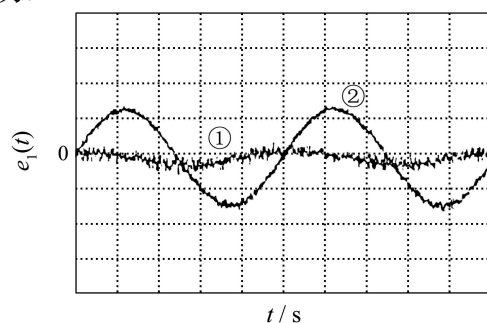


图6 方位误差变化实测曲线

Fig. 6 Experimental results of the errors

## 7 结论(Conclusion)

移动卫星天线自适应鲁棒控制系统, 对天线系统具体参数的不确定性非线性变化、互相耦合关联作用以及外界各种干扰力矩影响的敏感性较低, 具有较好的鲁棒性. 它改善系统的响应特性, 提高了系统对外界各种环境路面、海洋状况的适应能力. 试验结果证明这种方法是有效的. 尽管外界环境道路条件的变化不同, 移动卫星天线控制系统表现满意的控制性能.

## 参考文献(References):

- [1] MARTIN H. Directed antennas in the mobile broadband system[J]. *Proc of the Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 1996, 15(3): 1210 – 1221.
- [2] LUTZ D, CYGEN M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording statistics and channel model[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 1991, 40(2): 375 – 386.
- [3] 赵会平. 移动卫星接收天线跟踪控制系统[J]. *广播与电视技术*, 2002, 18(7): 119 – 121.  
(ZHAO Huiping. Following control system of mobile satellite antennas[J]. *Broadcasting and Television Technology*, 2002, 18(7): 119 – 121.)
- [4] 陈绍溴, 吴也文. 移动载体卫星电视天线跟踪系统[J]. *中国有线电视*, 2002, 22(7): 59 – 60.  
(CHEN Saoyu, WU Yewen. Following system of mobile satellite television antennas[J]. *China Wire Television*, 2002, 22(7): 59 – 60.)

- [5] 李果, 余达太. 电动车制动防抱死控制系统[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 134 – 138.  
(LI Guo, YU Dadai. Antilock brake fuzzy controller of electric vehicles[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 134 – 138.)

#### 作者简介:

**李 果** (1963—), 男, 教授, 1996年北京理工大学博士后出站, 主要研究领域为机器人控制与规划、智能控制、工业过程控制和鲁

棒自适应控制等, E-mail: guo6396@sina.com

**胡剑飞** (1978—), 男, 硕士生, 主要研究领域为智能控制、工业过程控制和鲁棒自适应控制等, E-mail: jianfei@sina.com;

**余达太** (1946—), 男, 教授, 博士生导师, 日本九州工业大学研究生院毕业, 主要研究领域为控制理论、工业自动化及智能控制, E-mail: datai@sina.com.

(上接第302页)

#### 作者简介:

**杨 政** (1978—), 男, 西北工业大学应用数学系博士研究生, 主要研究非线性时间序列与动态数据处理, E-mail: yzeagle@yahoo.com.cn;

**田 铮** (1948—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性时间

序列分析、多尺度非线性随机模型、计算机视觉与图像处理等研究, E-mail: zhtian@nwpu.edu.cn;

**党怀义** (1967—), 男, 中国飞行试验研究院测试技术研究所研究员, 主要从事飞行试验数据处理技术、飞行试验数据库技术及相关的应用软件技术研究, E-mail: hydang@sohu.com.

(上接第306页)

$$\begin{bmatrix} (A - H_1 C)^T P + P(A - H_1 C) & P(B - H_1 D) & P H_1 + C^T H_2^T W & C^T H_2^T W \\ (B - H_1 D)^T P & -\Gamma W & D^T H_2^T W & D^T H_2^T W \\ H_1^T P + W H_2 C & W H_2 D \delta I - W H_2 - H_2^T W - \gamma W & W - H_2^T W & \\ W H_2 C & W H_2 D W - W H_2 & -W & \end{bmatrix} < 0.$$

这就是定理2的结果.

#### 作者简介:

**缪银龙** (1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为鲁棒控制;

**王景成** (1972—), 男, 上海交通大学自动化系教授, 研究方向为实时系统控制与仿真, E-mail: jcwang@sjtu.edu.cn;

**吴 风** (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为抗饱和控制.