

# 前馈复合控制在提高遥测跟踪性能中的应用

曾铨璐, 王 威, 舒东升  
(中国酒泉卫星发射中心 酒泉 736200)

**摘要:** 由于 Ka 频段遥测设备天线波束较窄, 存在高速飞行目标跟踪困难的问题, 通过对遥测设备跟踪需求分析, 研究了前馈复合控制在遥测跟踪中的应用, 计算出前馈复合控制中开环增益的合理取值, 改善了遥测设备跟踪高速飞行 Ka 频段目标时跟踪迟滞情况, 缩短了捕获目标需要的时间, 提高了设备成功捕获、平稳跟踪目标的能力。

**关键词:** Ka 频段; 前馈复合控制; 遥测跟踪; 开环增益

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)01-0061-05

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20200316001

**引用格式:** 曾铨璐, 王威, 舒东升. 前馈复合控制在提高遥测跟踪性能中的应用[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 61–65.

## Application of feedforward compound control in improving the performance of telemetry and tracking

ZENG Chenglu, WANG Wei, SHU Dongsheng  
(Jiuquan Satellite Launch Center in China, Jiuquan 736200, China)

**Abstract:** Due to the narrow beam width of Ka-band telemetry equipment, it is difficult to track high-speed flying targets. Through the analysis of the tracking requirements of telemetry equipment, the application of feedforward compound control in telemetry equipment tracking is studied, and the reasonable value of open-loop gain in feedforward compound control is calculated in this paper. The tracking delay problem when tracking the high-speed flying Ka-band target is solved, the time of target acquisition is shorten, and the ability of the equipment to capture and track the target smoothly is improved.

**Key words:** Ka-band; Feedforward compound control; Telemetry equipment tracking; Open-loop gain

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20200316001

**Citation:** ZENG Chenglu, WANG Wei, SHU Dongsheng. Application of feedforward compound control in improving the performance of telemetry and tracking[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 61–65.

## 引 言

Ka 频段遥测设备的天伺馈分系统主要完成天线的驱动、控制和角度编码读取, 以及对目标的捕获和跟踪。在飞行试验任务中, 如何成功捕获目标并精确跟踪信号是设备的难点。当目标同时具备 Ka 和 S 频段信号时, 可通过 S 频段捕获目标。若只有 Ka 频段信号时, 因天线波束窄、目标动态大, 捕获难度较大。因此, 本文研究了前馈复合控制跟踪模式, 以提高 Ka 信号跟踪性能。

## 1 前馈复合控制原理分析

控制器都是按被控参数或其反馈值与给定值的偏差大小进行控制的, 这种控制系统称为反馈控制系统。对于反馈控制系统, 从干扰产生到被控量发生变化, 以及从偏差产生到控制作用产生, 再由控制量改变到被控量发生变化, 都需要一定的时间, 所以控制总是落后于干扰作用。由于反馈控制的作用机理决定了无法将干扰克服在被控量偏离设定值之前。为了解决上述问题, 可以采用按扰动直接进行控制, 即当扰动一出现, 控制器就直接按扰动的性质和大小, 以一定规律进行控制, 可使被控量还未变化之前, 就克服干扰对系统的影响, 从而使控制作用提前和控制精度进一步提高。这种按扰动进行控制的方式称

为前馈复合控制。

遥测设备的跟踪环路一般由接收机和伺服环路共同组成, 环路构成如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

当跟踪环路采用前馈复合控制后, 其原理框图如图 2 所示,  $W_b$ 、 $W_1$ 、 $W_2$  分别为前馈补偿装置、控制器和被控对象的传递函数。

原始跟踪环路为二型系统, 其开环传递函数为<sup>[2]</sup>:

$$W_K(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)}{s^2} \cdot \frac{K_v}{T_v s + 1} = \frac{K(T_i s + 1)}{s^2(T_v s + 1)} \quad (1)$$

其中,  $K_p$  为静态位置误差系数,  $K_v$  为加速度误差系数,  $K$  为系统的开环增益,  $T_i$ 、 $T_v$  为时间常数。二型系统对位置和速度无静差, 在目标有加速度时在角度上有动态滞后, 因此为实现对目标的稳定跟踪, 就需要提高系统的开环增益。图 2 所示添加前馈复合控制后的闭环传递函数、误差传递函数分别为

$$G(s) = \frac{W_b(s)W_2(s) + W_1(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (2)$$

$$\Phi(s) = \frac{1 - W_b(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (3)$$

在闭环系统中, 当前馈环节与闭环系统控制对象的传递函数之积为 1 时, 系统能实现输入与输出之间误差的完全补偿, 即  $W_b(s) \times W_2(s) = 1$ <sup>[3]</sup>。此时,  $G(s) = 1$ 、 $\Phi(s) = 0$ , 这就是不变性原理。伺服系统要实现完全不变性是不可能的, 而从提高开环增益  $K$  的角度考虑, 也不需要实现完全不变性, 能实现部分不变性或目标信号的较低阶导数实现不变性即可。

根据 Laplace 变换的终值定理和无静差度的定义, 系统无静差度的阶次等于误差传递函数中  $s$  因子的幂次数, 也等于前向通道中所含积分环节的个数, 对于单位反馈系统, 系统无静差度的阶次等于开环传递函数所含积分环节的个数<sup>[4]</sup>。设

$$W_b(s) = \frac{s}{K_2} \quad (4)$$

根据式 (3), 可以写出误差传递函数如下:

$$\Phi(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{s^3(b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (5)$$

式中,  $b_2 = T_1 T_2^2$ ,  $b_1 = 2\zeta T_1 T_2 + T_2^2$ ,  $b_0 = 2\zeta T_2 + T_1$ ,  $a_5 = T_1 T_2^2$ ,  $a_4 = 2\zeta T_1 T_2 + T_2^2$ ,  $a_3 = 2\zeta T_2 + T_1$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_1 = K_1 K_2 \tau_1$ ,  $a_0 = K_1 K_2$ , 其中  $b_0 \sim b_2$ 、 $a_0 \sim a_5$  分别为各分项比例系数,  $K_1$ 、 $K_2$  为传递系数,  $\zeta$  为阻尼比。式 (5) 中含有  $s$  的三次幂因子, 所以选择由式 (4) 表示的前馈补偿函数后, 把一个二阶无静差系统变成了一个等效的三阶无静差系统。如果式 (4) 的形式选择为

$$W_b(s) = \frac{s + (2\zeta T_2 + T_1)s^2}{K_2} \quad (6)$$

$W_1(s)$ 、 $W_2(s)$  保持不变, 这时误差传递函数的表达式为

$$\Phi(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{s^4(b_1 s + b_0)}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (7)$$

观察式 (7), 其中含有  $s$  的四次幂因子, 所以用式 (6) 进行前馈补偿可以把一个二阶无静差系统

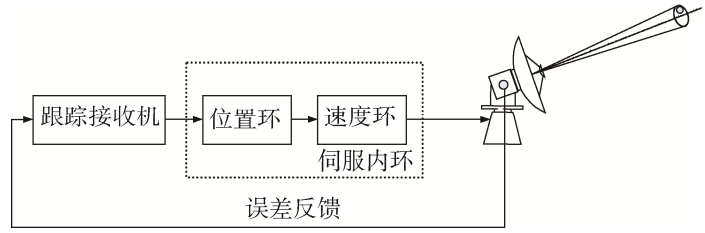


图 1 跟踪环路构成  
Fig. 1 Tracking loop composition

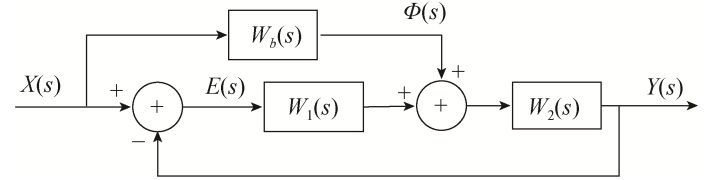


图 2 复合控制原理  
Fig. 2 Block diagram of compound control

变成等效的四阶无静差系统。式(5)、式(7)就是实现部分不变性的理论基础。通过式(5),可以实现对目标速度、加速度的不变性,通过式(7),可以实现对目标速度、加速度、加加速度的不变性。

$$\Phi(s) = \frac{s + (2\xi T_2 + T_1)s^2}{K_2} X(s) \quad (8)$$

在式(8)中, $\Phi(s)$ 为前馈信号在频域的表达式, $X(s)$ 为目标位置在频域的表达式。式(8)在时域的表达式为

$$f(t) = \frac{1}{K_2} X'(t) + \frac{2T_2 + T_1}{K_2} X''(t) \quad (9)$$

在式(9)中, $f(t)$ 为前馈信号在时域的表达式, $X'(t)$ 、 $X''(t)$ 分别为目标位置的一次导数和二次导数,即目标的速度和加速度。式(9)说明,要实现三阶无静差,就必须提供目标的速度信号。而要实现四阶无静差,就必须提供目标的速度信号和加速度信号<sup>[4]</sup>。

对于大多数情况,包括目标作等速直线飞行的情况在内,输入信号的许多次高阶导数都存在,这对球坐标系内的处理是很不利的。首先,这些导数都将引起动态滞后,尤其对于高速度、小航路捷径的目标,高阶导数造成的动态滞后误差分量在总误差中占有一定分量。其次,信号高阶导数的频谱、噪声频谱、误差频谱相互重叠,要想完整地保留有用的信号分量且干净地滤除噪声信号几乎是不可能的。如果采用直角坐标系,由于受飞行体动力学特征的限制,飞行器在直角坐标系中三个坐标分量仅具有有限次的导数,更高阶的导数项为零。因此在直角坐标系中,输入信号及其导数具有较窄的频谱,输入信号的导数项是接近于零的直流信号,而误差信号、噪声信号的变化要快得多,具有较宽的频谱。这样就可以用较低的低通滤波器提取有用的信号,而把噪声信号有效地滤除掉。在球坐标系内将得到的测量信息距离 $R$ 、方位 $A$ 、俯仰 $E$ 修正后,再利用转换公式转换到直角坐标系中去。只要知道目标在直角坐标系中的位置及各阶导数,那么就可以计算出目标在球坐标系内的各阶导数,可以用式(9)进行前馈信息的计算,进而实施控制。

## 2 遥测设备跟踪需求分析

### 2.1 跟踪环路的需求

在飞行试验中,若目标距离较远时,目标速度较低,穿越波束的时间较长,捕获较容易。若目标距离较近时,速度和加速度也较大,穿越波束时间短,因此需要提高Ka信号的快速捕获能力。结合目标和天线波束的特性,对遥测设备跟踪环路提出的需求如下<sup>[4]</sup>。

① 目标捕获:要求跟踪环路有良好的动态性能,实现尽量小的超调和尽量短的过渡过程,尽量满足快速目标的捕获要求,上升时间至少应小于200 ms;

② 目标跟踪:要求跟踪环路有良好的稳态性能,能实现尽量小的动态滞后,尽量满足目标加速度大时稳定跟踪的要求,跟踪环路稳态性要求开环增益 $K>70$ ,控制周期40 Hz,接收机带宽 $>40$  Hz。

目标速度决定了目标穿越天线波束的时间长短,也就决定了系统捕获目标的难易程度。假若某Ka频段遥测设备的主天线和引导天线口径分别为3.8 m和0.5 m,在Ka频段的波束宽度分别为 $0.2^\circ$ 和 $1.4^\circ$ 。在天线以最大角速度 $30^\circ/\text{s}$ 转动时,目标穿越主天线波束的时间为6.7 ms,穿越引导波束的时间为46.7 ms;以最大保精度角速度 $20^\circ/\text{s}$ 转动时,目标穿越主天线波束的时间为10 ms,穿越引导波束的时间为70 ms。估算人工操作切换跟踪的时间为1 s~3 s,则用等待点捕获的方式时目标飞行角速度 $\leq 0.67^\circ/\text{s}$ 。通过增加辅助较准的数引或程引,可以大大增强首次捕获目标的能力,考虑接收机的锁定时间为50 ms,则在目标最大加速度不超过 $8.4^\circ/\text{s}^2$ 时可捕获。

### 2.2 跟踪动态性能需求

在等待点捕获或数引捕获目标时,目标首先进入引导波束,相应的捕获策略是先进行引导捕获将目标拉进主波束,再进行主天线捕获。目标进入引导波束时开始引导捕获,要求跟踪环路有尽量快的响应,根据跟踪数据分析,在3.8 m的天线系统中上升时间在200 ms左右。在引导捕获过程中,目标有可能两

次进入主波束, 第一次是在引导过渡过程的上升时间段, 很快就会因引导跟踪环路的超调而甩出主波束; 第二次是在引导跟踪环路的超调完成进入收敛阶段时再次进入主波束, 如果引导跟踪环路的震荡次数小于 1 次, 目标第二次进入主波束后可能一直在主波束内, 如图 3 所示。

综上所述, 目标捕获对跟踪环路的要求为: 响应要快, 跟踪环路不能有大于 1 次的震荡或有 1 次震荡但幅值较小, 幅值小于主波束的 1/2 宽度。

### 2.3 前馈复合控制中开环增益取值

目标成功捕获并进入主天线 Ka 通道自跟踪后, 能否稳定跟踪及提供良好的跟踪精度, 主要考验跟踪环路的稳态指标: 开环增益  $K$ 。如目标加速度引起过大的动态滞后, 有可能超出主天线 Ka 波束而引起主 Ka 跟踪失效。根据以上遥测设备跟踪需求分析, 加速度指标对跟踪环路中  $K$  的取值要求见表 1。

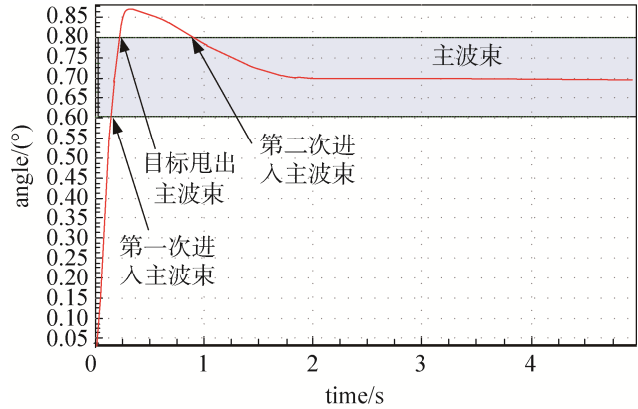


图 3 引导主天线捕获目标过程

Fig. 3 Guide the main antenna to capture the target

表 1 不同的角加速度对  $K$  的要求

Table 1 Different angular acceleration requirements on  $K$

| 角加速度                  | 动态滞后不大于主波束的 1/2 | 动态滞后不大于引导波束的 1/2 |
|-----------------------|-----------------|------------------|
| 最大角加速度 $20^\circ/s^2$ | $K \geq 200$    | $K \geq 28.6$    |
| 保精度角加速度 $6^\circ/s^2$ | $K \geq 60$     | $K \geq 8.6$     |

表 1 中, 为了在最大角加速度时不因动态滞后而使目标甩出主波束,  $K$  需要达到 200。根据估算, 天线位置环的  $K$  约能达到 12~20 之间。如果加上目标速度前馈控制, 约能将环路的动态滞后减小 5~8 倍, 即经过前馈复合控制后的等效  $K$  可以大于 70~100。此数据与表 1 比对可得出: 经过前馈复合控制可以做到, 在天线以最大的保精度角加速度转动时目标不出主波束, 在以最大角加速度转动时目标不出引导波束。

目标角加速度决定了目标在引导方式下的动态滞后, 也就决定了系统能否捕获目标。天线相对目标的动态滞后越小, 在载波锁定后天线随动目标需要的过渡过程也越短, 捕获成功率越高, 但同时跟踪环路的动态性能指标要求也就越高。若不使用前馈控制, 天线  $K$  为 12~20、目标角加速度  $<1.2^\circ/s^2$  时主天线可以捕获目标, 角加速度  $<8.4^\circ/s^2$  时引导天线可以捕获目标。若使用前馈复合控制, 天线  $K$  大于 70~100、目标角加速度  $<7^\circ/s^2$  时主天线可以捕获目标, 角加速度  $<49^\circ/s^2$  时引导天线就可以捕获目标。

### 3 前馈复合控制应用设计

在原有跟踪流程基础上增加前馈复合控制部分, 目标跟踪流程增加以下设计:

① 实时监视动态滞后信息, 如动态滞后偏大则自动开启前馈复合控制, 并检查复合控制的效果, 如果开启前馈复合控制后天线震荡, 则减小前馈深度或关闭前馈;

② 实时监视主 Ka 跟踪角度偏差是否过大、接收机是否失锁等信息, 如出现跟踪失效则转入目标重捕控制。流程图如图 4 所示。

目标捕获需要的时间和成功率取决于环路性能、目标特性、操作手的判断和切换工作方式的时机、启动前馈控制的时机等因素; 平稳跟踪取决于环路性能、目标特性和启动前馈控制的时机等因素。启动前馈控制的时机采用回差法, 即目标角加速度较大时启动, 角加速度较小时停止; 在启动后根据动态滞后和天线运行平稳度调整前馈深度。

通过飞行试验测试, 得出各判据和控制目标为:

①目标角加速度 $>1.4^{\circ}/s^2$ 时, 开启前馈控制;  
②目标角加速度 $<0.98^{\circ}/s^2$ 时, 关闭前馈控制;  
③在前馈开启期间, 动态调整前馈深度, 包括调整频率、步距以及前馈深度极值, 控制动态滞后量在 $0.05^{\circ}\sim 0.07^{\circ}$ 之间;

④测量天线运行的实时角加速度 $a_n$ , 计算一段时间的角加速度均值为 $\bar{a}$ , 统计 $\sum|a_n - \bar{a}|/n$ 作为天线振荡的判据, 当该值大于振荡阈值时可判定天线振动运行。如果判断天线振动运行, 则自动调整前馈深度, 控制天线振荡不大于振荡阈值。

#### 4 结束语

由于Ka频段遥测设备天线波束较窄, 对高速飞行目标的跟踪使用单纯反馈控制往往跟踪滞后较大, 所以增加动态的前馈复合控制应用可以提高控制质量。将前馈复合控制应用到遥测设备后效果明显, 实际飞行试验中对Ka频段目标可以成功捕获, 平稳跟踪。

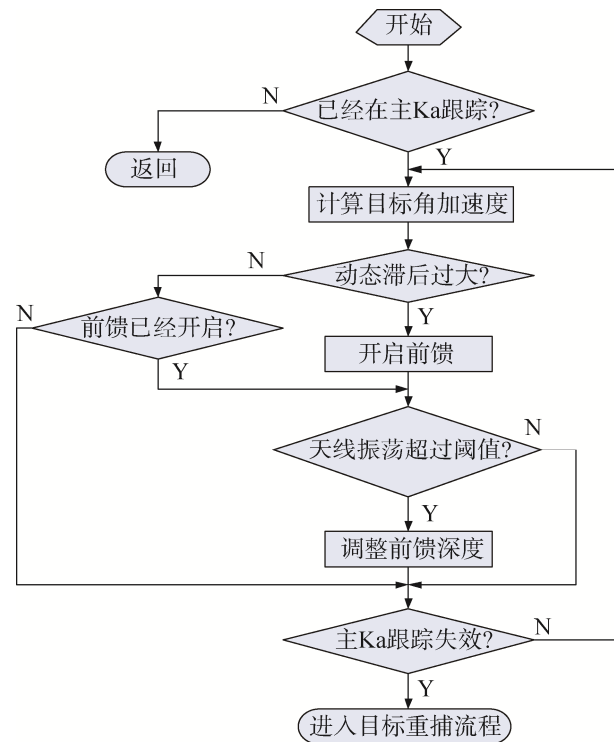


图4 前馈复合控制流程  
Fig. 4 Feedforward compound control

#### 参考文献

- [1] 陈岩. 计算机控制位置伺服系统的设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [2] 王磊, 郝双晖, 宋宝玉, 等. 基于控制系统模型前馈高响应控制技术[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(10): 1056-1061.  
WANG Lei, HAO Shuanghui, SONG Baoyu, et al. Research on high performance control system based on control system model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(10): 1056-1061.
- [3] 应少波, 贺昱曜, 高云迪, 等. 一种提高伺服系统位置跟踪精度的方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 56-59.  
YING Shaobo, HE Yuyao, GAO Yundi, et al. A new method for improving position following precision of servo system[J]. Fire Control and Command Control, 2010, 35(6): 56-59.
- [4] 李宏科, 王万玉, 冯旭祥, 等. 基于前馈的伺服系统控制技术研究[J]. 物联网技术, 2016, 6(5): 104-105,108.  
LI Hongke, WANG Wanyu, FENG Xuxiang, et al. Research on control technology of servo system based on feedforward[J]. Internet of Things Technologies, 2016, 6(5): 104-105,108.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

#### [作者简介]

曾铖璐 1983年生, 本科, 工程师, 研究方向为无线电遥测遥控。  
王威 1989年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为无线电遥测遥控。  
舒东生 1996年生, 本科, 助理工程师, 研究方向为无线电遥测遥控。

(本文编辑: 杨秀丽)