

基于速度正反馈的船载雷达动态滞后补偿方法

李志坚 季 辉 陈小刚

(中国卫星海上测控部 江阴 210096)

摘要: 船载雷达跟踪系统中,以复合控制减小跟踪动态滞后误差是一种常用手段,但使用存在限制,需提供跟踪目标的速度信息。本文提出一种基于速度正反馈的船载雷达动态滞后补偿方法。在没有速度信号的情况下,在速度环并联一个带低通滤波器的速度正反馈环节,高频误差分量被低通滤波器过滤,系统开环传递函数对数幅频特性的低频段有明显改善。通过实验验证,速度正反馈补偿法减小了船载雷达跟踪速度和加速度误差,显著提高了海上动态环境下雷达跟踪精度。

关键词: 船载雷达;正反馈;滞后补偿

中图分类号: V556.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6020

Solution of compensating dynamic lag based-on positive velocity feedback for ship radar

Li Zhijian Ji Hui Chen Xiaogang

(China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: Compound control is a common method to reduce the tracking lag error for ship radar. However, the use is limited. The speed information of tracking target needs to provide. A new method of dynamic lag compensation based on positive velocity feedback for ship radar is proposed. In the absence of speed signals, the positive velocity feedback tracking link with low-pass filter is paralleled in the speed loop. The high frequency error component is filtered by the low-pass filter. The low frequency segment of the logarithmic amplitude frequency is improved obviously. Through the experiment, the new method based on positive velocity feedback reduces the speed error and acceleration error, and the radar tracking accuracy under marine dynamic environment is improved significantly.

Keywords: ship radar; positive feedback; lag compensation

1 引言

船载雷达在海上动态环境下自动跟踪目标时,目标运动会造成电轴的指向与目标的真实方向间的差异,也就是目标相对于雷达运动的角位移、角速度、角加速度会出现测量误差,称为动态滞后误差^[1]。

对于船载雷达伺服系统来说,跟踪精度要求高,且闭环带宽受到限制。如果有跟踪目标的速度信息,则可以采用复合控制法减小动态滞后误差^[2]。在没有速度信息的情况下,本文提出了一种动态滞后补偿方法,采用带低通滤波器的速度正反馈回路来补偿滞后误差。

2 滞后误差

图1是一个单回路伺服系统框图。

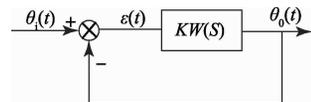


图1 单回路伺服系统

$\theta_i(t)$ 为输入指令, $\theta_o(t)$ 为实际输出,他们之间存在一个系统的稳态误差 $\epsilon(t)$, 稳态误差一般表达式为:

$$\epsilon(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = C_0 \theta_i(t) + C_1 \dot{\theta}_i(t) + C_2 \ddot{\theta}_i(t) + \dots + C_n \theta_i^{(n)}(t)$$

式中: $\dot{\theta}_i(t)$, $\ddot{\theta}_i(t)$ 是输入信号的各次导数, C_0 、 C_1 、 C_2 是系统的稳态误差系数,其数值由伺服系统的结构决定^[3]。

对于一般的伺服系统,其闭环传递函数:

$$\varphi(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_m s^m}{1 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_n s^n}$$

式中: $m \leq n$, 能推导出:

$$C_0 = 1 + \beta_0$$

$$C_1 = \alpha_1 + \beta_1 - C_0 \alpha_1$$

$$C_2 = \alpha_2 - \beta_2 - C_0 \alpha_2 - C_1 \alpha_1 \dots\dots$$

.....

$$C_i = \alpha_i - \beta_i - C_0 \alpha_i - \sum_{j=1}^{i-1} C_j \cdot \alpha_{i-j} \dots\dots$$

C_0, C_1, C_2 分别为系统的位置、速度和加速度误差系数, 它们的倒数分别为位置、速度和加速度品质因数, 可用 K_p, K_v, K_a 来表示^[4]。

系统稳态误差可以简化为:

$$\epsilon(t) |_{t \rightarrow \infty} = \frac{\theta_i(t)}{K_p} + \frac{\dot{\theta}_i(t)}{K_v} + \frac{\ddot{\theta}_i(t)}{K_a} + \dots\dots$$

系统的稳态误差与输入信号特征有关, 如果系统的输入信号是位置信号, 则:

$$\text{位置误差 } \epsilon_p = 0$$

如果系统的输入信号是速度信号, 则:

$$\text{速度滞后误差 } \epsilon_v = \frac{\dot{\theta}_i(t)}{K_v}$$

如果系统的输入信号是加速度信号, 则:

$$\text{加速度滞后误差 } \epsilon_a = \frac{\ddot{\theta}_i(t)}{K_a}$$

伺服系统跟踪时, 对于运动目标输入信号 $\theta_i(t)$, 其高阶导数很小, 系统稳态误差可以近似为:

$$\epsilon(t) |_{t \rightarrow \infty} = \frac{\dot{\theta}_i(t)}{K_v} + \frac{\ddot{\theta}_i(t)}{K_a}$$

从上式可以看出, 增大系统的速度品质因数 K_v 和加速度品质因数 K_a , 可以提高系统精度。但是, 系统的速度品质因数和加速度品质因数受到闭环带宽的限制, 增加有限^[5]。

船载雷达一般采用复合控制的方法来提高速度品质因数和加速度品质因数, 消除速度误差。但是, 复合控制法必须获得输入信号的速度信息^[6]。有些情况下, 无法得到目标的速度信息, 复合控制方法就受到了限制。必须寻找新的方法解决动态滞后问题。

3 速度正反馈补偿

3.1 基本原理

雷达伺服系统一般采用的是位置环、速度环和电流环三环控制结构。其中, 速度环负反馈实际上是对开环系统增加误差微分项 $\frac{d\epsilon(t)}{dt}$ 和负值输入信号微分项 $\left[-\frac{d\theta_i(t)}{dt}\right]$ 。误差微分项 $\frac{d\epsilon(t)}{dt}$ 等效于闭环系统引入了开环零点, 减小了系统环节的迟滞, 改善了系统稳定性^[7]。负值输入信号微分项 $\left[-\frac{d\theta_i(t)}{dt}\right]$, 当输入信号不是恒定时产生, 使系统的速度响应变坏, 增大了稳态误差。提高系统的放大系数, 可以补偿速度环负反馈对跟踪精度的影响, 但是也受到系统带

宽的限制。输入信号变化率一般要比误差信号变化率慢, 在测速机后面增加一个高通滤波器可以隔离 $\left[-\frac{d\theta_i(t)}{dt}\right]$ 项^[8]。

从以上分析可以看出, 如果在速度环并联一个带低通滤波器的速度正反馈环节, 则有负值误差微分项 $\left[-\frac{d\epsilon(t)}{dt}\right]$ 和输入信号微分项 $\left[\frac{d\theta_i(t)}{dt}\right]$ 。其中, 输入信号微分项 $\left[\frac{d\theta_i(t)}{dt}\right]$ 能提高系统精度, 负值误差微分项 $\left[-\frac{d\epsilon(t)}{dt}\right]$ 影响系统的稳定性, $\frac{d\epsilon(t)}{dt}$ 的高频分量占优势, 被低通滤波器过滤一部分, 得到补偿。系统的开环传递函数引入了新的零点和极点, 其对数幅频特性的低频段有明显的改善, 幅值增大, 但中频段的幅值和形状没有发生改变, 保证系统具有一定的稳定裕度。同时, 速度环的低频响应特性没有明显改变, 速度负反馈对负载扰动抑制作用仍然存在^[9]。

3.2 计算分析

以某型船载雷达为模型进行计算分析。忽略高频小时间常数后, 无补偿伺服系统框图可以简化为如图 2 所示。

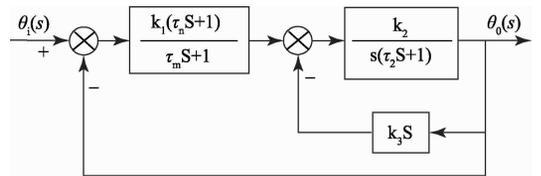


图 2 无补偿伺服系统简化框图

图中, K_1 : 系统正向通路总的放大系数;
 $\frac{\tau_n S + 1}{\tau_m S + 1}$: 位置环校正环节;
 τ_2 : 机械时间常数;
 K_2 : 速度环传递系数;
 K_3 : 测速机反馈传递系数。

在低频和中频段, 当 $K_2 K_3 \gg 1$ 时, 系统的开环传递函数可以近似为:

$$W(s) = \frac{K_1 K_H (\tau_n S + 1)}{S(\tau_m S + 1)}$$

式中: $K_H = \frac{1}{K_3}$, 为速度环闭环放大系数;

可以求得:

$$\text{速度品质因素 } K_v = K_1 K_H$$

$$\text{加速度品质因素 } K_a = \frac{K_1 K_H}{\tau_m}$$

速度环引入负反馈的同时, 并联引入经过时间滞后的速度正反馈, 就是伺服系统的动态滞后补偿。其传递函数为:

$$\frac{\mu}{\theta_0} = \frac{K_1 S}{\tau_4 S + 1}$$

动态滞后补偿系统简化后的方框图如图 3 所示^[10]。

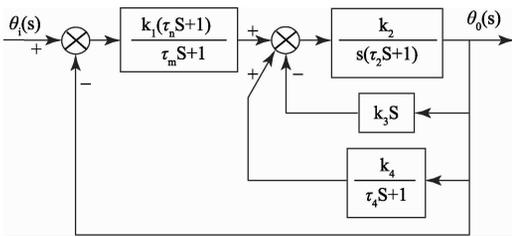


图3 补偿系统简化框图

当 $K_2 K_3 \gg 1$ 时,速度环等效闭环传递函数为:

$$\frac{\theta_o}{\mu} = \frac{aK_H(\tau_n S + 1)}{S(a\tau_4 S + 1)}$$

$\alpha = \frac{1}{1 - K_1 K_H}$ 为补偿系数, K_1 为滞后补偿环节的测速

机正反馈传递系数。

对于伺服系统的精度,主要在于低频段,近似的开环传递函数为:

$$W(S) = \frac{aK_1 K_H (\tau_n S + 1)(\tau_1 S + 1)}{S(\tau_m S + 1)(a\tau_4 S + 1)}$$

根据误差系数公式,可以得到:

$$\text{速度品质因数 } K_{vp} = aK_1 K_H = aK_v$$

$$\text{加速度品质因数 } K_{ap} = \frac{aK_1 K_H}{\tau_m + (a-1)\tau_1 - \tau_n}$$

对于系数,选择 $K_1 < K_3$,且两者接近, $1 - K_1 K_H \ll 1$,则 $\alpha > 1$,此时 $K_{vp} > K_v$ 。理论上,伺服系统速度品质因数可以提高补偿系数 α 。

从上式可知,当 $\tau_n < \tau_1 < \tau_m$, $\alpha > 1$ 时,可以得到 $K_{ap} > K_a$,提高了加速度品质因数。

通过以上分析可以看出,增加速度滞后补偿环节后,系统速度滞后误差和加速度滞后误差减少,显著提高精度。

3.3 实验验证

速度正反馈补偿应用于某型船载雷达,在有动态滞后补偿和无补偿两种状态下,对雷达跟踪精度进行测试,结果如表1所示。

表1 系统跟踪精度对比表

项目	无补偿	有补偿	提高倍数
速度误差 $\dot{\theta}_i(t) = 15^\circ/S^2$	50"	21"	2.4
加速度误差 $\ddot{\theta}_i(t) = 6^\circ/S^2$	58"	25"	2.3

从表1可以看出,采用动态滞后补偿后,雷达跟踪速度误差和加速度误差减小,显著提高了跟踪精度。

在有动态滞后补偿和无补偿两种状态下,对雷达系统的动态响应能力进行测试,结果如表2所示。

表2 系统动态响应对比表

项目	无补偿	有补偿
超调量	15%	18%
振荡次数	1	1
过渡时间/s	1	1

从表2看出,采用动态滞后补偿后,雷达系统的震荡次数和过渡时间没有发生变化,超调量虽略有增大,仍在指标范围内,对雷达跟踪的动态响应能力基本没有影响。

海上动态环境下,船载雷达多次进行跟踪过境目标实验,有效验证了基于速度正反馈的动态滞后补偿法的有效性和可靠性。

4 结 论

与传统的复合控制方法相比,基于速度正反馈的滞后补偿方法利用输出量的速度反馈信号代替了输入量的速度信息,等效于复合控制。采用该补偿方法明显改善了船载雷达在海上动态环境下的跟踪滞后误差,提高了跟踪精度。

参考文献

- [1] 熊珍凯,陈汀峰. 精确瞄准控制技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1339-1343.
- [2] 姚熠飞,李志坚,常硕,等. 船载雷达补偿跟踪技术研究及应用[J]. 遥测遥控, 2014(6): 67-70.
- [3] 胡金辉,黄坤,李志坚. 船载大型测控系统自适应跟踪技术研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 20(32): 8539-8542.
- [4] 李军显,陈春红,武亚平. 基于复合控制的雷达导引头伺服系统设计[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 54-56.
- [5] 付金宝,丁亚林. 基于摩擦前馈的航空相机像移补偿复合控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 657-663.
- [6] 瞿元新. 航天测量船测控通信设备船摇稳定技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2009: 83-85.
- [7] 谢婷婷,杨忠,郑志忠. 基于加速度滞后补偿的转台控制系统应用研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 32-35.
- [8] 黄海波,左韬,陈晶,等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1561-1565.
- [9] 王虎,陈娟,尹力鹏. 光电跟踪系统中的伺服控制技术[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(5): 533-539.
- [10] 丁求启,陶敏,张桂平. 船载雷达天线复合控制技术[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 1235-1238.

作者简介

李志坚,本科,工程师,研究方向为船载雷达伺服控制。
E-mail: lizhijianjy@sina.com