

C-V2X 协同自适应巡航时延补偿模型研究

1 研究背景及意义

协同自适应巡航控制是传统自适应巡航控制在车联网环境下的拓展技术，其根据车联网通信技术获取的周围车辆状态信息以做出更加准确、快速的响应，进而实现较小跟车时距下的车辆编队纵向跟随，可有效提高交通效率、降低能源消耗、保证出行安全、优化乘坐体验等。在协同自适应巡航控制研究中，通信时延对车辆编队的跟随精度和稳定性存在较大影响。此外，如何针对人-车系统中的车辆动力学参数摄动和差异化跟车时距进行控制器鲁棒性设计，亦是协同自适应巡航控制中需解决的一个关键问题。

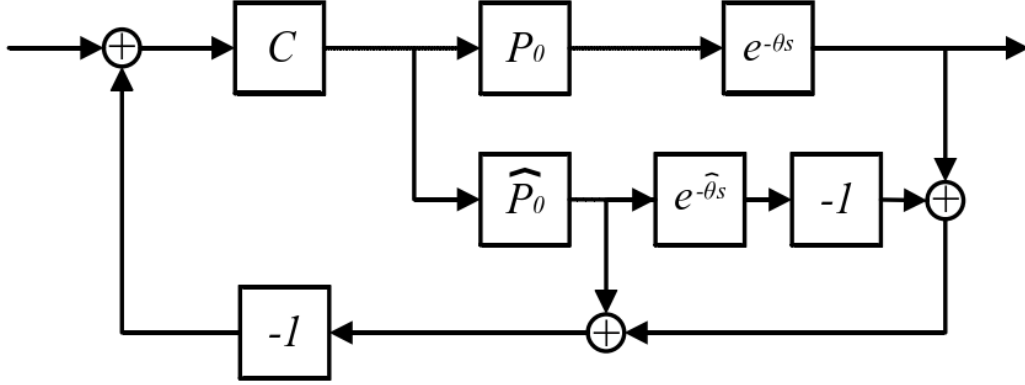
2 需求分析

本研究在深入分析车辆编队纵向跟随的设计要求和技术难点基础上，进一步针对通信时延影响，设计了基于时延预估补偿的优化策略，以提高弦稳定性裕度、降低最小允许跟车时距限制，设计了基于时延预估补偿的协同自适应巡航控制策略，实现存在动力学参数摄动下通信时延、跟车时距与弦稳定性之间的解耦。提出了随从模式和 Smith 预估器相结合的时延预估补偿策略，将通信时延转移至系统反馈环节并进行预估补偿，有效实现精准预估时，零跟车时距、任意通信时延下的稳定跟随效果；以最小允许跟车时距为评价指标，分析了时延预估补偿策略所实现解耦效果对通信时延、动力学参数预估误差的敏感程度；设计了干扰观测器对车辆动力学参数摄动进行反馈补偿，进而减小 Smith 预估误差，提高存在动力学参数摄动影响时，小跟车时距下的跟随性能。

3 时延预估补偿策略设计

时延预估补偿策略由随从模式和 Smith 预估器组成，其中随从模式主要将通信时延转移至闭环环节，进而由 Smith 预估器对其进行补偿消除。

Smith 预估器的本质是通过预估系统的动态特性，并使用预估模型来进行补偿，从而得到一个没有时延的状态量来进行反馈控制，以此将时延量从系统特征方程中消除，来保证控制系统的稳定性。常见的 Smith 预估器如下：



克服传统的 smith 仅能消除执行器时延 β 对系统的影响，无法消除通信时延 σ 的缺点。通过设计车辆编队的主从策略来控制协同自适应巡航架构，采用主从模式下，将原本位于传递函数分子部分的执行器时延和通信时延转换到分母部分。

$$F(s) = \frac{(k_p + k_v s) + s^2 k_\alpha}{(\tau s + 1)s^2 e^{(\beta+\sigma)s} + (k_p + k_v s)(hs + 1)}$$

再通过 smith 预估器对其消除，达到减少时延的目的：

$$F(s) = \frac{(k_p + k_v s) + s^2 k_\alpha}{(\tau s + 1)s^2 e^{(\beta+\sigma)s} + (k_p + k_v s)(hs + 1)} e^{-(\beta+\alpha)s}$$

可以发现，系统传递函数分母部分包含执行器时延，而通信时延则在分子部分。因此，采用 Smith 预估器仅能消除执行器时延对系统的影响，而对通信时延无能为力。为了能够使用 Smith 预估器来应对通信时延的影响，本节重新设计了车辆编队控制架构——随从模式（Master-Slave）。

相较于传统车辆编队架构，随从模式可实现：

- （1）前行车辆（车辆 $i-1$ ）可以通过车载毫米波雷达实时探测与后车（车辆 i ）之间的距离以及速度差。
- （2）前行车辆利用自己的加速度以及毫米波雷达探测得到的数据，来决策其跟随车辆的期望加速度。
- （3）跟随车辆不必决策自己的期望加速度，仅需要对通过车联网传输过来的期望值进行车辆底层跟随即可。

由于跟随车辆的所有决策过程均由其前行车辆代为进行，跟随车辆更像是一个“随从”，可以不经任何计算，简单按照前行车辆给出的指令进行控制。

针对传递函数 $F(s)$ ，可以发现

- (1) 执行器时滞和通信时延均不会对车辆编队系统的特征根造成影响，即可以始终保持车辆编队的内稳定性。
- (2) 传递函数的分子部分存在 $e^{-(\beta+\alpha)s}$ ，即跟随车辆的加速度响应会存在 $\beta + \sigma$ 的时延。但是该时延仅对跟随误差有影响，并不会导致传递函数 $F(s)$ 的频响幅值发生变化，即弦稳定性始终可以得到很好的保证。

4 总结

基于时延预估补偿的自适应巡航控制策略，实现理论零跟车时距下的稳定跟车效果。针对时延预估补偿对预估误差的敏感程度，设计干扰观测器对动力学参数摄动进行补偿，实现存在动力学参数摄动下通信时延与跟车时距之间的解耦控制，可以大幅度的减少协同自适应巡航系统决策时间，提高 C-V2X 技术的可靠性。经实际部署验证，相较于未采用该模型的协同自适应巡航系统车辆，部署该模型的车辆在巡航系统开启时，系统决策时延明显降低，效率提高一个数量级。