

一种高数据率雷达跟踪慢速目标的数据互联算法

易哲¹, 王国宏², 张翔宇², 陈泽元²

(1. 中国人民解放军92932部队, 广东 湛江 524005; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 杂波环境下, 现有的最近邻数据互联算法在高采样率雷达跟踪慢速目标时, 由于量测误差远远大于目标实际运动的距离, 量测值往往难以落入预测波门之内, 从而造成数据互联失败。针对这一问题, 提出了一种自适应距离最近邻数据互联算法。该算法用状态估计向量中的位置信息计算与下一时刻量测值的实际距离来代替预测中心与量测值的统计距离, 降低了预测中心不确定性造成的漏互联概率, 从而提高了跟踪精度。实际距离波门的大小与雷达和目标距离、雷达测距精度、雷达测角精度有关, 并且随着时间实时变化。通过在地心坐标系下的跟踪滤波仿真证明, 该算法能够有效地实现高数据率雷达对慢速目标的跟踪, 且跟踪精度较高, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 目标跟踪; 慢速目标; 数据互联; 高采样率; 最近邻域

中图分类号: V271.4; TN958.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0031-05

A Data Association Algorithm for High Sampling Rate Radar Tracking Slow Moving Target

YI Zhe¹, WANG Guo-hong², ZHANG Xiang-yu², CHEN Ze-yuan²

(1. No. 92932 Unit of PLA, Zhanjiang 524005, China;

2. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The radar with high sampling rate always fails to track a slow moving target when using nearest neighbor data association under the clutter background, since its measuring error is much greater than the real moving distance of the target. To improve tracking precision to the slow moving target, an adaptive range nearest neighbor data association algorithm is proposed. This method uses the location information of the state vector to calculate the real range instead of calculating the statistical range of prediction center and measurements, the tracking precision is improved by reducing the missing association probability. The real range gate size relates to measuring error and the distance of radar and target. Simulation results show that the algorithm can enable the radar with high sampling rate track the low-moving target effectively with relatively high precision.

Key words: target tracking; slow moving target; data association; high sampling rate; nearest neighbor

0 引言

随着雷达技术的不断发展, 弹载雷达的数据率越来越高, 如何实现杂波环境下高数据率弹载雷达跟踪海面慢速目标时的数据互联, 已成为目前的一个研究难点^[1]。在数据互联问题的研究中, 文献[2]提出了一种近似的联合概率数据互联方法, 降低了数据互联的计算量; 文献[3]提出了一种二维空间中的机动目标跟踪数

据互联方法; 文献[4]在文献[3]方法的基础上进一步推导了三维空间下机动目标跟踪的数据互联算法; 文献[5-7]研究了被动传感器的数据互联算法; 文献[8-10]研究了多传感器跟踪目标时的数据互联算法。然而, 上述文献的研究并没有充分考虑到高数据率雷达跟踪慢速目标时, 量测误差可能远远大于目标实际运动距离的情况, 且在这一情况下, 量测值可能无法落在相关波门内, 从而造成数据互联失败。因此, 研究高数据率雷达跟踪慢速目标时的数据互联具有重要的实际意义, 而这方面的相关文献却很少见到。

本文提出一种自适应距离最近邻数据互联算法。与传统最近邻域数据互联算法计算预测值和下一时刻

收稿日期: 2013-07-10

修回日期: 2013-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61102167, 61179018, 61102165)

作者简介: 易哲(1988—), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 研究方向为多传感器信息融合。

量测值的统计距离不同,该算法以状态估计向量中的位置信息为中心,计算与下一时刻量测值的实际距离,对下一时刻落入距离波门的量测值予以关联,如果有多个量测值落入距离波门,则选取实际距离最近的量测值进行关联滤波,距离波门的大小实时变化,并且与雷达和目标距离、雷达测距精度、雷达测角精度有关。

1 问题描述

如图 1 所示, $\hat{X}(k)$ 是 k 时刻的状态估计向量, $\hat{X}(k+T|k)$ 是对 $k+T$ 时刻的状态预测, $X(k)$ 是 k 时刻的真实值, $Z(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻的量测值。

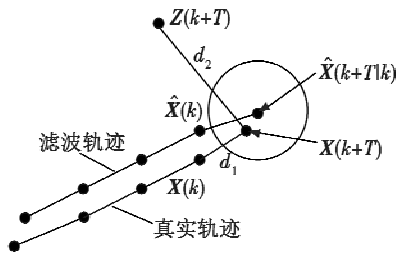


图 1 数据互联

Fig. 1 Data association

当雷达的数据率很高时,量测值偏离真实值的误差 d_2 远远大于目标实际运动的距离 d_1 ,此时,由于预测中心的不确定性,量测值可能远远偏离预测中心,下一时刻的真实量测值往往难以落入以状态预测向量为中心计算的统计距离波门内,因而可能错误地关联上杂波点,而正确的量测值被当成野值而剔除。当关联上的杂波过多时,状态向量预测中心就可能没有回波落入,一旦有两次没有回波落入相关波门,则航迹终止并重新进行起始。

例如:雷达的数据率 T 为 0.05 s,测角误差 θ 为 0.2° ,目标的速度 v 为 15 m/s,与雷达的距离 r 为 60 km。在二维平面里,量测值偏离真实值的距离 r_θ 为 $60000 \times 0.2 \times \pi/180 = 209.4$ m,而目标运动的距离 v_T 为 $15 \times 0.05 = 0.75$ m,远远小于量测误差。

2 自适应距离最近邻数据互联算法

在弹载雷达对目标的跟踪过程中,数据互联就是在跟踪距离波门里选择正确的量测值予以关联滤波。设雷达的采样周期为 T , k 时刻有 $m(k)$ 个量测值落入相关波门内,那么量测值集合为

$$Z(k) = \{z_i(k)\}_{i=0}^{m(k)} \quad (1)$$

设目标在地心坐标系下的状态估计向量为

$$\hat{X}(k) = [\hat{x}(k) \hat{y}(k) \hat{z}(k)]^T \quad (2)$$

则 $k+T$ 时刻目标在地心坐标系的状态预测方程和量测预测方程为

$$\hat{X}(k+T) = F\hat{X}(k) + V(k) \quad (3)$$

$$Z(k) = H\hat{X}(k) + W(k) \quad (4)$$

式中: F 为状态转移矩阵; $V(k)$ 为具有协方差 $Q(k)$ 的零均值、白色高斯过程噪声序列; H 为量测矩阵; $W(k)$ 为具有协方差 $R(k)$ 的零均值、白色高斯量测噪声序列。

2.1 标准的最近邻域数据互联算法

设 $k+T$ 时刻目标在地心坐标系的状态预测方程和量测预测方程为

$$\hat{X}(k+T|k) = F\hat{X}(k) \quad (5)$$

$$\hat{Z}(k+T|k) = H\hat{X}(k+T|k) \quad (6)$$

那么, $k+T$ 时刻量测 $z_i(k+T)$ 与预测中心的残差为

$$v_i(k+T) = z_i(k+T) - \hat{Z}(k+T|k) \quad (7)$$

则量测 $z_i(k+T)$ 与预测中心的统计距离为

$$d_i(k+T) = \sqrt{v_i(k+T)^T S_i^{-1}(k+T) v_i(k+T)} \quad (8)$$

式中: $S_i^{-1}(k+T)$ 为地心坐标系下量测协方差矩阵; $d_i(k+T)$ 服从自由度为 3 的 χ^2 分布,给定门限概率查 χ^2 分布表即可得到相应的门限 γ 。如果有一个量测值落入相关波门,则直接用量测值更新滤波,如果有多个量测值落入相关波门,则选取统计距离最近的量测值关联滤波。

2.2 距离最近邻域数据互联算法

与标准的最近邻域互联算法不同,该算法采用实际距离代替统计距离,量测 $z_i(k+T)$ 与前一时刻的状态估计向量 $\hat{X}(k)$ 中位置信息的实际距离为 $D_i(k+T) = [|z_i(x, k+T) - \hat{X}(x, k)|^2 + |z_i(y, k+T) - \hat{X}(y, k)|^2 + |z_i(z, k+T) - \hat{X}(z, k)|^2]^{1/2} \leq \gamma(k)$ (9) 式中: $z_i(x, k+T)$ 、 $\hat{X}(x, k)$, $z_i(y, k+T)$ 、 $\hat{X}(y, k)$, $z_i(z, k+T)$ 、 $\hat{X}(z, k)$ 分别代表量测值、状态估计向量中的 x 轴、 y 轴、 z 轴坐标值; $\gamma(k)$ 为与导弹和目标距离、弹载雷达测量误差有关的距离门限。

对落入实际距离波门的量测值取距离最近的予以关联。如果第一次关联失败,则以预测状态向量和预测协方差代替下一时刻的估计状态向量及其协方差;如果第二次仍关联失败,则认为是虚假航迹,终止该条航迹,重新进行航迹起始。

若关联成功,假设第 j 个量测值 $z_j(k+T)$ 实际距离最近,则 $z_j(k+T)$ 与预测中心的残差为

$$v_j(k+T) = z_j(k+T) - \hat{Z}(k+T|k) \quad (10)$$

状态、量测预测协方差为

$$P(k+T|k) = FP(k|k)F^T + Q(k) \quad (11)$$

$$S_j(k+T) = HP(k+T|k)H^T + R_j(k+T) \quad (12)$$

式中: $Q(k)$ 为过程噪声协方差矩阵; $R_j(k+T)$ 为地心坐标系下的量测噪声协方差矩阵,可以利用 UT 不敏

变换计算得出^[11]。

增益为

$$K_j(k+T) = P(k+T|k)H(k+T)^T S_j^{-1}(k+T) \quad (13)$$

则状态向量及其协方差更新方程为

$$\hat{X}(k+T) = \hat{X}(k+T|k) + K_j(k+T)v_j(k+T) \quad (14)$$

$$P(k+T) = P(k+T|k) - K_j(k+T)S_j^{-1}(k+T)K_j(k+T)^T \quad (15)$$

2.3 自适应波门 $\gamma(k)$ 的计算

以二维平面为例,如图2所示, $\hat{X}(k)$ 是 k 时刻状态估计向量; $X(k)$ 是 k 时刻真实位置; $\Gamma(k)$ 是 k 时刻量测误差; S 是目标运动的距离; $Z(k+T)$ 是 $k+T$ 的量测值; $D(k)$ 是 $\hat{X}(k)$ 中位置信息和 $Z(k+T)$ 的实际距离。

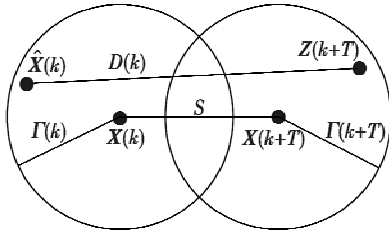


图2 自适应波门

Fig. 2 Adaptive association gate

由几何关系可知, $\gamma(k)$ 的最大值为

$$\gamma(k) = D(k)_{\max} = \Gamma(k) + \Gamma(k+T) + S \quad (16)$$

由于目标在时间 T 的运动距离非常小,可忽略不计,因而 $\Gamma(k) \approx \Gamma(k+T)$ 。式(14)可改写为

$$\gamma(k) = D(k)_{\max} \leq 2\Gamma(k) \quad (17)$$

$\Gamma(k)$ 的计算:设弹载雷达 k 时刻对目标的距离、方位角、俯仰角量测值为 $(r(k), \theta(k), \varphi(k))$,测距误差为 σ_r ,方位角测量误差为 σ_θ ,俯仰角测量误差为 σ_φ ,目标在局部直角坐标系的量测值为 $(x(k), y(k), z(k))$,则有

$$\begin{cases} x(k) = r(k) \sin(\theta(k)) \cos(\varphi(k)) \\ y(k) = r(k) \cos(\theta(k)) \cos(\varphi(k)) \\ z(k) = r(k) \sin(\varphi(k)) \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)两边微分可得

$$\begin{cases} dx = \sin \theta(k) \cos \varphi(k) dr + r(k) \cos \theta(k) \cdot \cos \varphi(k) d\theta - r(k) \sin \theta(k) \sin \varphi(k) d\varphi \\ dy = \cos \theta(k) \cos \varphi(k) dr - r(k) \sin \theta(k) \cdot \cos \varphi(k) d\theta - r(k) \sin \theta(k) \sin \varphi(k) d\varphi \\ dz = r(k) \sin \varphi(k) dr + r(k) \cos \varphi(k) d\varphi \end{cases} \quad (19)$$

对式(19)两边平方并统计平均可得

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \sin^2 \theta(k) \cos^2 \varphi(k) \sigma_r^2 + r^2(k) \cos^2 \theta(k) \cdot \cos^2 \varphi(k) \sigma_\theta^2 + r^2(k) \sin^2 \theta(k) \sin^2 \varphi(k) \sigma_\varphi^2 \\ \sigma_y^2 = \cos^2 \theta(k) \cos^2 \varphi(k) \sigma_r^2 + r^2(k) \sin^2 \theta(k) \cdot \cos^2 \varphi(k) \sigma_\theta^2 + r^2(k) \cos^2 \theta(k) \sin^2 \varphi(k) \sigma_\varphi^2 \\ \sigma_z^2 = \sin^2 \varphi(k) \sigma_r^2 + r^2(k) \cos^2 \varphi(k) \sigma_\varphi^2 \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)中左右3项分别求和可得

$$\Gamma(k) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{\sigma_r^2 + r^2(k) \cos^2 \varphi(k) \sigma_\theta^2 + r^2(k) \sigma_\varphi^2} \leq \sqrt{\sigma_r^2 + r^2(k) (\sigma_\theta^2 + \sigma_\varphi^2)} \quad (21)$$

结合式(17)和式(21)可得自适应门限为

$$\gamma(k) \leq 2 \sqrt{\sigma_r^2 + r^2(k) (\sigma_\theta^2 + \sigma_\varphi^2)} \quad (22)$$

3 仿真及分析

仿真场景一:无杂波环境,设导弹的初始地理位置经度、纬度、高度为 $(108^\circ, 37.9^\circ, 1 \text{ km})$,速度 680 m/s ,沿正南方向做匀速直线运动,弹载雷达径向测距误差 15 m ,方位角误差 0.2° ,俯仰角误差 0.2° ,搜索阶段数据率为 1.5 s ,搜索时间 30 s ,跟踪阶段数据率为 0.05 s ,跟踪时间 40 s ;海面舰艇的初始地理位置为 $(108^\circ, 37.1^\circ, 0 \text{ m})$,速度为 10 m/s ,沿正北方向做匀速直线运动。做30次蒙特卡罗仿真得到的滤波图、位置均方根误差图和正确互联概率如图3~图6所示。

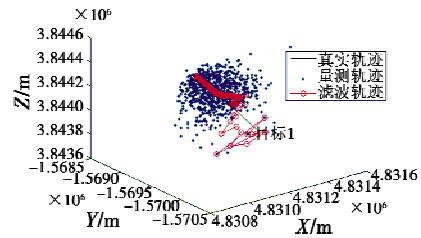


图3 最近邻算法

Fig. 3 Nearest neighbor algorithm

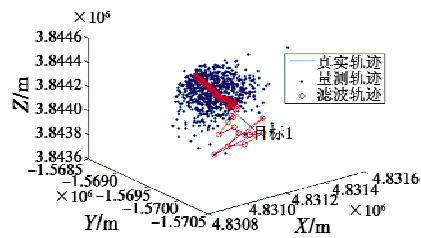


图4 自适应距离最近邻算法

Fig. 4 Adaptive range nearest neighbor algorithm

从图3和图4可知,最近邻算法和本文算法在无杂波环境下均能实现高数据率弹载雷达对慢速目标的稳定跟踪。

由图5可知,最近邻算法和本文算法的滤波均方根误差均随着仿真步数的增加而呈减少趋势, Y 方向均方根误差相差不大,在 X 方向均方根误差、 Z 方向均方根误差和位置均方根误差上,本文算法的跟踪精度明显好于最近邻算法。由图6可知,本文算法的正确互联概率明显高于最近邻算法,在无杂波环境下,本文算法能够更有效地互联上量测值,从而提高了跟踪滤波精度。

由表1可知,相对于最近邻算法,自适应距离最近

邻算法的均方根误差均值降低了 53.34%,对目标的跟踪精度明显提高,验证了本文所提算法的有效性。

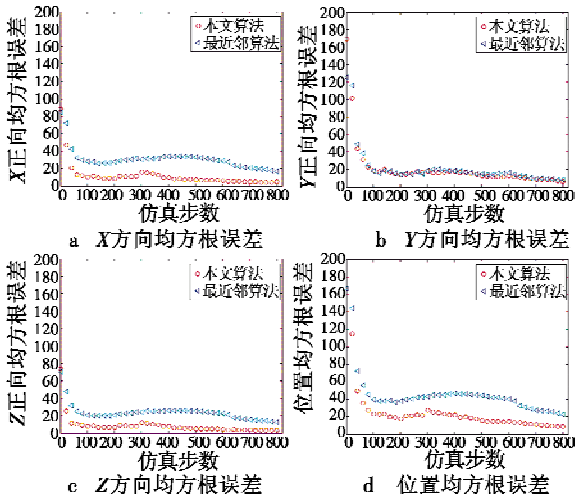


图5 均方根误差对比
Fig. 5 RMS comparison

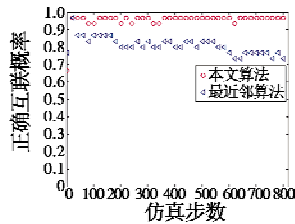


图6 正确互联概率
Fig. 6 Correct association rate

表1 均方根误差均值
Table 1 The RMS mean value

| 算法 | X方向 精度/m | Y方向 精度/m | Z方向 精度/m | 位置 精度/m |
|-------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 最近邻算法 | 32.5675 | 26.4612 | 23.2046 | 50.3332 |
| 本文算法 | 11.0223 | 19.0608 | 7.7795 | 23.4839 |

仿真场景二:杂波环境,仿真环境的参数同场景一相同。每个周期的杂波个数根据泊松分布确定,即给定参数 λ (本文中取 10),首先产生 $(0,1)$ 区间上均匀分布产生的随机数 r ,然后由式(23)确定 J

$$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{J-1} \frac{\lambda^j}{j!} < r \leq e^{-\lambda} \sum_{j=0}^J \frac{\lambda^j}{j!}, \quad J = 1, 2, \dots \quad (23)$$

式中, J 就是要产生的杂波个数。在确定出 J 后,每个周期的 J 个杂波按均匀分布随机地分布在雷达视域范围内。

分别对标准最近邻算法和本文算法仿真,得到的滤波图见图7、图8。

从图7和图8可知,最近邻算法在进入高数据率的跟踪阶段后,无法关联成功而终止航迹;本文提出的自适应距离最近邻算法可以实现高数据率跟踪阶段的稳定滤波。

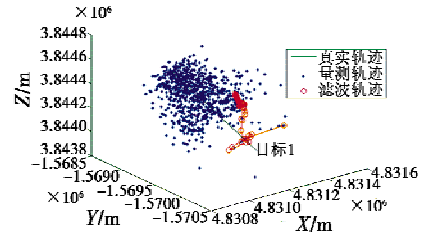


图7 最近邻算法

Fig. 7 Nearest neighbor algorithm

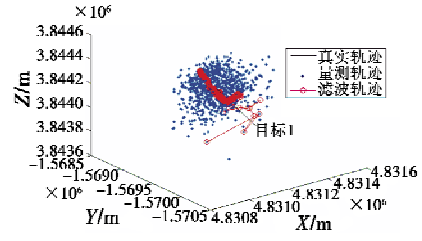


图8 自适应距离最近邻算法

Fig. 8 Adaptive range nearest neighbor algorithm

4 结论

本文在高数据率弹载雷达跟踪慢速目标的背景下提出了一种自适应距离最近邻域数据互联算法,该算法用状态估计向量中的位置信息计算与下一时刻量测值的实际距离来代替预测中心与量测值的统计距离,提高了正确关联概率,从而提高了跟踪精度,且在杂波环境下该算法依然可以获得稳定的滤波精度。通过仿真证明,该算法能有效实现杂波环境下高数据率的弹载雷达对海面慢速目标的跟踪滤波,具有很好的实际应用价值,但是该算法能在杂波密度较低的情况下取得较好的效果,在杂波密度较大时的效果尚需验证和完善。

参考文献

[1] 叶继坤,雷虎民,薛东风,等.基于几何关系的多导弹协同跟踪算法[J].系统工程理论与实践,2012,32(10):2332-2338.
YE J K, LEI H M, XUE D F, et al. Multiple missiles cooperative tracking algorithm base on geometric relation[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32 (10): 2332-2338.

[2] 邓未央,王宝树.一种近似的联合概率数据互联算法[J].电光与控制,2004,11(2):42-44.
DENG W Y, WANG B S. An approximate joint probability data association algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11 (2): 42-44.

[3] 刘宗香,黄敬雄,谢维信,等.机动目标跟踪中数据互联新方法[J].电子与信息学报,2007,29(10):2292-2295.
LIU Z X, HUANG J X, XIE W X, et al. An novel data asso-

- ciation method for maneuvering target tracking[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(10): 2292-2295.
- [4] 刘宗香, 黄敬雄, 谢维信. 一种用于三维空间杂波环境机动目标跟踪的数据互联方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 848-852.
LIU Z X, HUANG J X, XIE W X. A data association method for maneuvering target tracking in three-dimensional space under the circumstance of clutter[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(4): 848-852.
- [5] 修建娟, 何友, 王国宏, 等. 被动定位系统中的方位数据互联[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(3): 280-283.
XIU J J, HE Y, WANG G H, et al. Bearing measurements association in passive location systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(3): 280-283.
- [6] 周莉, 李洪波, 杨秀珍, 等. 多被动传感器系统四时差量测数据关联算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3): 190-192.
ZHOU L, LI H B, YANG X Z, et al. Four-TDOA data association algorithm for multi-passive-sensor system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3): 190-192.
- [7] 修建娟, 何友, 车志宇, 等. 三维测向无源定位中的数据关联算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 330-332.
XIU J J, HE Y, CHE Z Y, et al. Study on bearing measurements association algorithm in 3D passive location systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 330-332.
- [8] 张琦, 张晶炜, 熊伟, 等. 次最优概率和集中式 MSJPDA 算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5): 188-191.
ZHANG Q, ZHANG J W, XIONG W, et al. Sub-optimal MSJPDA algorithm based on probability weight[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(5): 188-191.
- [9] 邓未央, 王宝树. 多传感器数据融合系统中的目标跟踪技术[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(10): 1661-1663.
DENG W Y, WANG B S. Targets tracking in multisensor data fusion system[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(10): 1661-1663.
- [10] 王以标, 徐毓, 张云龙. 基于广义三维分配的数据互联算法研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(3): 122-126.
WANG Y B, XU Y, ZHANG Y L. Study on generalized 3-D distribution based data association algorithm[J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(3): 122-126.
- [11] 朱安福, 景占荣, 高田, 等. 基于 UKF 的交互多模型算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3): 655-657.
ZHU A F, JING Z R, GAO T, et al. Interacting multiple model algorithm based on UKF[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(3): 655-657.

(上接第 23 页)

可见, PI 控制器对这些不确定性的适应能力弱, 指令跟踪效果明显变差; 在不加入 L_1 补偿时, RSLQR 控制器受到的影响同样较大; 加入 L_1 自适应补偿后, 指令跟踪效果变化很小, 综合图 8 对应的工作点 1 的 C^* 响应可见, 操纵效率下降十分明显时响应会出现超调。综上所述, RSLQR 拥有一定的鲁棒性, 但对操纵效率变化适应能力较弱, 加入 L_1 补偿后, 系统适应操纵效率变化的能力明显增强。

4 结束语

本文研究了飞翼布局无人机全包线飞行的控制问题, 结合无人机的飞行品质要求和鲁棒性指标, 结合鲁棒最优控制中的 RSLQR 方法与 L_1 自适应控制, 选取 C^* 参数为被控变量, 设计了无人机纵向的 RSLQR- L_1 综合控制律。仿真结果表明, 该控制器具有很强的鲁棒性, 对一系列不确定性具有适应能力, 所设计的控制律改善了飞翼无人机的非线性响应特性和飞行品质, 提高了操纵效率, 能够适应无人机全包线飞行, 具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] WISE K A. Bank-to-turn missile autopilot design using loop transfer recovery[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990, 13(1): 145-152.
- [2] CAO C Y, HOVAKIMYAN N. Guaranteed transient performance with L_1 adaptive controller for systems with unknown time-varying parameters and bounded disturbances[C]//American Control Conference, 2007, ACC'07, IEEE, 2007: 3925-3930.
- [3] CAO C Y, HOVAKIMYAN N. L_1 adaptive output feedback controller for systems with time-varying unknown parameters and bounded disturbances[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2007: 486-491.
- [4] WISE K A, EUGENE L, ZIMMERMAN J, et al. Adaptive flight control of a sensor guided munition[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Francisco, USA, 2005, AIAA-2005-6385.
- [5] WISE K A, EUGENE L, HOVAKIMYAN N. Adaptive control of flight: Theory, applications, and open problems[C]//American Control Conference, IEEE 2006; doi: 10.1109/ACC.2006.1657677.