

2014 年全国研究生数学建模竞赛 B 题

机动目标的跟踪与反跟踪

目标跟踪是指根据传感器（如雷达等）所获得的对目标的测量信息，连续地对目标的运动状态进行估计，进而获取目标的运动态势及意图。目标跟踪理论在军、民用领域都有重要的应用价值。在军用领域，目标跟踪是情报搜集、战场监视、火力控制、态势估计和威胁评估的基础；在民用领域，目标跟踪被广泛应用于空中交通管制，目标导航以及机器人的道路规划等行业。

目标机动是指目标的速度大小和方向在短时间内发生变化，通常采用加速度作为衡量指标。目标机动与目标跟踪是“矛”与“盾”的关系。随着估计理论的日趋成熟及平台能力提升，目标作常规的匀速或者匀加速直线运动时的跟踪问题已经得到很好的解决。但被跟踪目标为了提高自身的生存能力，通常在被雷达锁定情况下会作规避的机动动作或者释放干扰力图摆脱跟踪，前者主要通过自身运动状态的快速变化导致雷达跟踪器精度变差甚至丢失跟踪目标，后者则通过制造假目标掩护自身，因此引入了在目标进行机动时雷达如何准确跟踪的问题。

机动目标跟踪的难点在于以下几个方面：(1) 描述目标运动的模型[1, 2]即目标的状态方程难于准确建立。通常情况下跟踪的目标都是非合作目标，目标的速度大小和方向如何变化难于准确描述；(2) 传感器自身测量精度有限加之外界干扰，传感器获得的测量信息[3]如距离、角度等包含一定的随机误差，用于描述传感器获得测量信息能力的测量方程难于完全准确反映真实目标的运动特征；(3) 当存在多个机动目标时，除了要解决(1)、(2)两个问题外，还需要解决测量信息属于哪个目标的问题，即数据关联。在一定的测量精度下，目标之间难于分辨，甚至当两个目标距离很近的时候，传感器往往只能获得一个目标的测量信息。由于以上多个挑战因素以及目标机动在战术上主动的优势，机动目标跟踪已成为近年来跟踪理论研究的热点和难点。

不同类型目标的机动能力不同。通常情况下战斗机的飞行速度在 $100\sim 400\text{m/s}$ ，机动半径在 1km 以上，机动大小一般在 10 个 g 以内，而导弹目标机动，加速度最大可达到几十个 g ，因此在对机动目标跟踪时，必须根据不同的目标类型选择相应的跟踪模型。

目标跟踪处理流程[4, 5]通常可分为航迹起始、点迹航迹关联（数据关联）[6-8]、航迹滤波[9-18]等步骤。如果某个时刻某雷达站（可以是运动的）接收到空间某点反射回来的电磁波，它将记录下有关的数据，并进行计算，得到包括目标相对于雷达站的距离、方位角和俯仰角等信息。航迹即雷达站在接收到某一检测目标陆续反射回来的电磁波后记录、计算检测目标所处的一系列空中位置而形成的离散点列。航迹起始即通过一定的逻辑快速确定单个或者多个离散点序列是某一目标在某段时间内首先被检测到的位置。点迹航迹关联也称同一性识别，即依据一定的准则确定雷达站多个回波数据（点迹）中哪几部分数据是来自同一个检测目标（航迹）。航迹滤波是指利用关联上的点迹测量信息采用线性或者非线性估计方法（如卡尔曼滤波、拟合等）提取所需目标状态信息，通常包括预测和更新两个步骤。预测步骤主要采用目标的状态方程获得对应时刻（被该目标关联上的点迹时间）目标状态和协方差预测信息；更新步骤则利用关联点迹的测量信息修正目标的预测状态和预测协方差。

现有 3 组机动目标的测量数据，数据分别包含在 Data1.txt, Data2.txt, Data3.txt 文件中，其中 Data1.txt 为多个雷达站在不完全相同时刻获得的单个机动目标的测量数据，Data2.txt 为某个雷达站获得的两个机动目标的测量数据，Data3.txt 为某个雷达站获得的空间目标的测量数据。

数据文件中观测数据的数据结构如下：

目标 距离 (m)	目标 方位 (°)	目标 俯仰 (°)	测量 时间 (s)	传感器 标号
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------

其中 Data1.txt 和 Data2.txt 数据的坐标系表示如下：原点 O 为传感器中心，传感器中心点与当地纬度切线方向指向东为 x 轴，传感器中心点与当地经度切线方向指向北为 y 轴，地心与传感器中心连线指向天向的为 z 轴，目标方位指北向顺时针夹角（从 y 轴正向向 x 轴正向的夹角，范围为 $0\sim 360^\circ$ ），目标俯仰指传感器中心点与目标连线和地平面的夹角（即与 xOy 平面的夹角，通常范围 -90° 到 90° ）。

Data1.txt 中的雷达坐标和测量误差如下：

雷达标号	经度(°)	纬度(°)	高度(m)	测距误	方位角	俯仰角
------	-------	-------	-------	-----	-----	-----

				差 (m)	误差 (°)	误差 (°)
1	122.1	40.5	0	50	0.4	0.4
2	122.4	41.5	0	40	0.3	0.3
3	122.7	41.9	0	60	0.5	0.5

Data2.txt 雷达坐标为[0, 0, 0]。对应两个目标的测量误差如下：

目标	测距误差 (m)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)
1	100	0.3	0.3
2	100	0.6	0.6

Data3.txt 的雷达坐标和测量误差为：

经度 (°)	纬度 (°)	高度 (m)	测距误差 (m)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)
118	39.5	0	100	0.5	0.5

其余格式与 Data1.txt 和 Data2.txt 相同。

请完成以下问题：

1. 根据附件中的 Data1.txt 数据，分析目标机动发生的时间范围，并统计目标加速度的大小和方向。建立对该目标的跟踪模型，并利用多个雷达的测量数据估计出目标的航迹。鼓励在线跟踪。
2. 附件中的 Data2.txt 数据对应两个目标的实际检飞考核的飞行包线（检飞：军队根据国家军标规则设定特定的飞行路线用于考核雷达的各项性能指标，因此包线是有实战意义的）。请完成各目标的数据关联，形成相应的航迹，并阐明你们所采用或制定的准则（鼓励创新）。如果用序贯实时的方法实现更具有意义。若出现雷达一段时间只有一个回波点迹的状况，怎样使得航迹不丢失？请给出处理结果。

3. 根据附件中 Data3.txt 的数据，分析空间目标的机动变化规律(目标加速度随时间变化)。若采用第 1 问的跟踪模型进行处理，结果会有哪些变化？
4. 请对第 3 问的目标轨迹进行实时预测，估计该目标的着落点的坐标，给出详细结果，并分析算法复杂度。
5. Data2.txt 数据中的两个目标已被雷达锁定跟踪。在目标能够及时了解是否被跟踪，并已知雷达的测量精度为雷达波束宽度为 3° ，即在以雷达为锥顶，雷达与目标连线为轴，半顶角为 1.5° 的圆锥内的目标均能被探测到；雷达前后两次扫描时间间隔最小为 0.5s。为应对你们的跟踪模型，目标应该采用怎样的有利于逃逸的策略与方案？反之为了保持对目标的跟踪，跟踪策略又应该如何相应地变换？

参考文献：

- 1 X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of Maneuvering Target Tracking, Part I: Dynamic Models," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 39(4): 1333 – 1364, October 2003.
- 2 X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of Maneuvering Target Tracking, Part II: Motion Models of Ballistic Targets," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 46(1):96 – 119, January 2010.
- 3 X. R. Li and V. P. Jilkov, "A Survey of Maneuvering Target Tracking—Part III: Measurement Models," In: Proceedings of SPIE - Signal and Data Processing of Small Targets 2001, 31 July – 2 August 2001, San Diego, CA, USA, pp. 423 – 446.
- 4 Yaakov Bar-Shalom, X.Rong Li, Thiagalingam Kirubarajan. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software.
- 5 何友,修建娟,张晶炜等.雷达数据处理及应用[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社,

2009

6 Bar-Shalom Y, Daum F E, Huang J. The Probabilistic Data Association Filter: Estimation in the Presence of Measurement Origin Uncertainty[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(6): 82~100

7 Sinha A, Ding Z, Kirubarajan T, et al. Track Quality Based Multitarget Tracking Approach for Global Nearest-Neighbor Association[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2):1179~1191

8 Fortmann T, Bar-Shalom Y, Scheffe M. Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8(3):173~184.

9 X. R. Li and V. P. Jilkov, “A Survey of Maneuvering Target Tracking—Part IV: Decision-Based Methods,” In: Proc. SPIE - Signal and Data Processing of Small Targets 2002, April 1 – 5, 2002, Orlando, FL, USA, pp. 511 – 534

10 X. R. Li and V. P. Jilkov, “Survey of Maneuvering Target Tracking, Part V: Multiple-Model Methods,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 41(4): 1255 – 1321, October 2005.

11 X. R. Li and V. P. Jilkov, “A Survey of Maneuvering Target Tracking: Approximate Techniques for Nonlinear Filtering,” In: Proc. SPIE- Signal and Data Processing of Small Targets 2004, April 13 – 15, 2004, Orlando, FL, USA, pp. 537 – 550.

12 X. R. Li and V. P. Jilkov, “A Survey of Maneuvering Target Tracking—Part VIa: Density-Based Exact Nonlinear Filtering,” Proc. 2010 SPIE Conf. Signal and Data Processing of Small Targets, Orlando, FL, USA, 6 – 8 April 2010

- 13 X. R. Li and V. P. Jilkov, “A Survey of Maneuvering Target Tracking—Part VIb: Approximate Nonlinear Density Filtering in Mixed Time,” Proc. 2010 SPIE Conf. Signal and Data Processing of Small Targets, Orlando, FL, USA, 6 – 8 April 2010
- 14 Julier S J, Uhlmann J K. A New Extension of The Kalman Filter to Nonlinear Systems[J].SPIE, 1997, (3068):182~193
- 15 Julier S J, Uhlmann J K. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariance in Filters and Estimations[J]. IEEE Transactions.on Automatic Control, 2000,45(3):477~482
- 16 Singer R A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970,AES-6(4):473~483.
- 17 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1994
- 18 胡小平. 导弹飞行力学基础[M]. 北京: 国防工业出版社,2006