

局域跟踪的测速雷达网量测融合弹道解算

商临峰^{1,2}, 杨小军^{1,3}, 邢科义¹

(1. 西安交通大学系统工程研究所机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安 710049; 2. 太原卫星发射中心, 山西太原 030027; 3. 长安大学信息工程学院, 陕西西安 710064)

摘要: 组网测速雷达覆盖地域较广, 火箭飞行初始段, 只有局域雷达网捕获目标, 没有足够速度量测, 无法独立解算弹道. 本文利用测速雷达精度较低的角度量测, 以交会方法先获得初步的目标位置估计作为伪定位量测, 利用无迹卡尔曼滤波(UKF)将其与高精度速度量测融合对弹道进行估计. 蒙特卡罗仿真表明, 该方法可以弥补角度量测的精度, 获得满足精度要求的弹道估计.

关键词: 机动目标跟踪; 弹道解算; 多测角交会; 信息融合; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0615-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.033

Trajectory Estimation Based on Measurements Fusion for Local Doppler Radar Networks

SHANG Lin-feng^{1,2}, YANG Xiao-jun^{1,3}, XING Ke-yi¹

(1. *The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;*
2. *Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, Shanxi 030027, China;*
3. *School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China*)

Abstract: In the rocket propulsion stage, only a few Doppler radars can track the target due to Doppler radar networks generally cover a very large area. We could not get the accurate trajectory estimate with insufficient velocity measurements. In this paper, we propose a trajectory estimation approach based on measurements fusion. The proposed method gets a rough trajectory estimate using Doppler radar angle-measurements. The initial trajectory estimate obtained by bearing measurement intersection is taken as the pseudo-measurement. Then, the pseudo-measurements are fused with velocity measurements via unscented Kalman filter (UKF). The Monte Carlo simulation results show that the proposed approach can compensate the accuracy of bearing-only measurement, and improve the track estimation.

Key words: maneuvering target tracking; trajectory estimation; bearing intersection; information fusion; unscented Kalman filter

1 引言

组网测速雷达是近年航天发射场开始应用的地面测控系统, 其输出的速度量测精度高, 雷达可机动布站, 成为跟踪测量的主干网络. 理论上计算目标发射系下目标位置和速度六个分量, 需要 6 个以上独立速度量测^[1], 但由于测速雷达网覆盖地域广, 在火箭飞行起始段, 受地形遮挡影响, 布设在航区的测站捕获不到目标, 首区测站数量有限情况下, 雷达网仅能获取 3 到 5 个速度量测, 弹道解算中心仅依靠这些量测无法独立形成弹道.

针对上述问题, 本文提出利用测速雷达获取的精度

较低的角度量测, 先进行角度交会粗定位, 再将粗定位结果作为伪量测与高精度速度量测一起融合来估计弹道的思路. 由于量测与待估状态之间的非线性关系, 估计弹道应用较多的是基于模型的非线性融合滤波方式, 包括扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波、粒子滤波等, 这些都属于贝叶斯递推估计理论框架. 本文采用无迹卡尔曼滤波方法^[2]将测角粗定位结果与速度量测进行融合滤波, 解决了以往在仅有 3 到 5 台测速雷达跟踪目标情况下测速系统无法独立解算弹道的问题.

2 角度交会定位

角度定位广泛应用于红外, 光学等被动跟踪领

域^[3,4].测速雷达提供的角度量测是雷达视轴(LOS)在测量坐标系下的方位角和俯仰角.本文提出以下两种角度交会定位方法.

2.1 视轴最小二乘交会定位

最小二乘方法是角度交会定位时采取的常用方法,需要每个采样周期计算一次.文献[5]中通过泰勒展开将测量方程线性化,通过计算观测数据对弹道位置参数的偏导数的雅克比矩阵,推导了目标弹道的最小二乘估计.本文则通过引入参考点方式,获得了一个相对简洁的表示.设第 i 个测站获得的方位角和俯仰角分别用 A_i, E_i 表示, $i = 1 \cdots n$, n 是测站总数.在每个测站视轴上引入一个参考点 P_i , 设该点与测站原点的距离用 R_i 表示, R_i 可以是任一约定常量.则通过式(1)可以求出点 P_i 在测量坐标系下坐标 $\mathbf{X}_{i,o} = [x_{i,o} \ y_{i,o} \ z_{i,o}]^T$:

$$\begin{cases} x_{i,o} = R_i \cos E_i \cos A_i \\ y_{i,o} = R_i \sin E_i \\ z_{i,o} = R_i \cos E_i \sin A_i \end{cases} \quad (1)$$

设点 P_i 的发射系坐标用 $\mathbf{X}_{i,l} = [x_{i,l} \ y_{i,l} \ z_{i,l}]^T$ 表示:

$$\mathbf{X}_{i,l} = \mathbf{U}_i \mathbf{X}_{i,o} + \mathbf{V}_i \quad (2)$$

其中 \mathbf{U}_i 是测站 i 的测量坐标系与发射坐标系之间的旋转变换矩阵, \mathbf{V}_i 是测站 i 的测量坐标系原点到发射坐标系原点平移向量,则在发射系下,可建立每一测站视轴的直线方程:

$$\frac{x - x_{i,l}}{x_{i,l} - x_i} = \frac{y - y_{i,l}}{y_{i,l} - y_i} = \frac{z - z_{i,l}}{z_{i,l} - z_i} \quad (3)$$

其中 $(x_i \ y_i \ z_i)$ 是测站原点在发射系下的坐标.上式经过整理可得:

$$(y_{i,l} - y_i)x - (x_{i,l} - x_i)y = (y_{i,l} - y_i)x_{i,l} - (x_{i,l} - x_i)y_{i,l} \quad (4)$$

$$(z_{i,l} - z_i)y - (y_{i,l} - y_i)z = (z_{i,l} - z_i)y_{i,l} - (y_{i,l} - y_i)z_{i,l} \quad (5)$$

将每个测站视轴在发射系下的直线方程联立,可得如下形式的超定方程组:

$$\mathbf{CX} = \mathbf{B} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{X} = [x \ y \ z]^T$,

当 $n \geq 2$ 时,式(6)中未知数个数小于方程的个数, \mathbf{X} 可通过最小二乘法求解:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{B} \quad (7)$$

2.2 迭代计算定位

期望最大化算法(EM)^[6]是采样数据不完整或丢失情况下,求解最大似然参数估计的一种迭代算法.分类期望最大化算法(Classification EM, CEM)是 EM 的一个变种,具有较快收敛速度^[7].CEM 方法解决问题的主要

思想可以概括为以下两步骤:

步骤 1 基于现有采样数据补全缺失数据.

步骤 2 基于补全的数据重新估计参数.

受 CEM 思想的启发,对多测角交会问题可以做如下分析.假设测站 i 可同时获得角度量测 (A_i, E_i) 和斜距量测 R_i , 则通过式(1)可方便地计算出测量系下目标的直角坐标,再按式(2)转换到发射系下,则测站 i 单站可输出一个目标定位估计 \mathbf{X}_i .同理, n 个测站可输出 n 个目标定位估计.通过求取各站估计的平均值的方法来抑制单站估计误差,并将平均值作为整个测站网对真值的估计.再利用此目标定位估计和测站 i 原点在发射系下的坐标,带入两点求距公式求出目标对于测站的斜距 R_i ,以上各步骤则可以构成一个迭代运算.

设 k 为迭代次数,坐标初值为 $\mathbf{X}^{(k)} = [x^{(k)} \ y^{(k)} \ z^{(k)}]^T$, $k = 1$, 可选取为理论弹道计算的初值或上一采样周期对目标的定位估计.

步骤 1 将测站目标斜距 R_i 作为缺失数据,基于现有参数及采样数据,估计缺失数据.

$$R_i = \sqrt{(x^{(k)} - x_i)^2 + (y^{(k)} - y_i)^2 + (z^{(k)} - z_i)^2} \quad (8)$$

$i = 1, \dots, n$, (x_i, y_i, z_i) 是测站 i 在发射系下的坐标.

步骤 2 基于补全的数据集合 (R_i, A_i, E_i) , 通过式(1)和式(2),可获得 n 个目标在发射系下坐标的估计 $R_{i,l}$,再通过式(9)优化目标在发射系下坐标的估计.

$$x^{(k+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,l}, y^{(k+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i,l}, \quad (9)$$

$$z^{(k+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{i,l}$$

当向量 $(\mathbf{X}^{(k+1)} - \mathbf{X}^{(k)})$ 的模小于一定值时,算法终止.

3 伪定位量测与速度量测的融合方法

3.1 目标运动模型

将第 2 节中获得的定位结果作为伪量测,输入无迹卡尔曼滤波器,与高精度速度量测融合获得更精确的弹道估计.设目标运动状态向量为:

$$\mathbf{X}_k = [x_k \ \dot{x}_k \ \ddot{x}_k \ y_k \ \dot{y}_k \ \ddot{y}_k \ z_k \ \dot{z}_k \ \ddot{z}_k]^T \quad (10)$$

其中各分量表示目标发射坐标系下位置、速度、加速度. k 为弹道解算周期序号.目标运动模型可采用当前模型^[8,9],可表示为如下形式:

$$\mathbf{X}_{k+11k} = \Phi \mathbf{X}_k + \mathbf{U} a_k + \mathbf{W}_k \quad (11)$$

其中 Φ 为状态转移矩阵, \mathbf{U} 是飞行弹道在 X, Y, Z 三个方向的当前加速度输入匹配矩阵, a_k 三个方向的当前加速度估计, \mathbf{W}_k 是 0 均值的模型误差向量,具体形式可参阅文献[9].

3.2 量测模型

量测模型如下式所示:

$$\begin{cases} x^{(k)} = x_k + \delta_{1,k} \\ y^{(k)} = y_k + \delta_{2,k} \\ z^{(k)} = z_k + \delta_{3,k} \\ \dot{R}_{1,k} = l_{1,k} \dot{x}_k + m_{1,k} \dot{y}_k + n_{1,k} \dot{z}_k + \epsilon_{1,k} \\ \dot{R}_{2,k} = l_{2,k} \dot{x}_k + m_{2,k} \dot{y}_k + n_{2,k} \dot{z}_k + \epsilon_{2,k} \\ \dots\dots \\ \dot{R}_{n,k} = l_{n,k} \dot{x}_k + m_{n,k} \dot{y}_k + n_{n,k} \dot{z}_k + \epsilon_{n,k} \end{cases} \quad (12)$$

其中等式左侧是伪定位量测和距离变化率量测. 式中 $l_{i,k}$, $m_{i,k}$, $n_{i,k}$ 是目标到地面测站的方向余弦; $\delta_{1,k}$, $\delta_{2,k}$, $\delta_{3,k}$ 是伪量测的加性零均值正态误差, 其方差可通过 4.1 节的蒙特卡罗仿真获得; $\epsilon_{i,k}$ 是速度量测的加性零均值正态误差, 设其服从 $N(0, 0.032)$ 分布, 则式(12)可改写为矩阵形式:

$$\mathbf{Z}_k = H(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{Z}_k = [x^{(k)} \ y^{(k)} \ z^{(k)} \ \dot{R}_{1,k} \ \dot{R}_{2,k} \ \dots \ \dot{R}_{n,k}]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{V}_k = [\delta_{1,k} \ \delta_{2,k} \ \delta_{3,k} \ \epsilon_{1,k} \ \epsilon_{2,k} \ \dots \ \epsilon_{n,k}]^T \quad (15)$$

3.3 滤波方法

基于上述模型, 采用 UKF 算法可以解出弹道.

设已知 \mathbf{X}_{k-1} 及其方差 \mathbf{P}_{k-1} , 通过无迹变换获得 Sigma 点 $\mathbf{X}_{i,k-1}$, $i=0, 1, 2, \dots, 2L$, 并分别带入式(11)获得 Sigma 点一步预测 $\mathbf{X}_{i,k|k-1}$, 经过式(16)加权合并获得目标一步状态预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i \mathbf{X}_{i,k|k-1} \quad (16)$$

方差为:

$$\hat{\mathbf{P}}_k = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i' [\mathbf{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k][\mathbf{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k]^T \quad (17)$$

其中: ω_i , ω_i' 分别是粒子和方差的权值.

将 $\mathbf{X}_{i,k|k-1}$ 带入式(13)获得 $\mathbf{Z}_{i,k|k-1}$, 经式(18)加权合并后获得反算量测:

$$\hat{\mathbf{Z}}_k = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i \mathbf{Z}_{i,k|k-1} \quad (18)$$

方差为:

$$\mathbf{P}_{z_k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i' [\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k][\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k]^T + \mathbf{R} \quad (19)$$

其中 \mathbf{R} 为 \mathbf{V}_k 的方差. 状态和量测协方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_{x_k z_k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i' [\mathbf{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_k][\mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k]^T \quad (20)$$

则 Kalman 增益为: $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{x_k z_k} \mathbf{P}_{z_k}^{-1}$ (21)

一步估计值和方差如下:

$$\mathbf{X}_k = \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_k) \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_k = \hat{\mathbf{P}}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{z_k} \mathbf{K}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (23)$$

\mathbf{Q}_k 是式(11)中的 \mathbf{W}_k 方差.

4 蒙特卡罗仿真分析

设发射点大地坐标为(100.3, 40.7, 1000), 4 台测速雷达的大地坐标分别为: (101, 41.5, 1000), (101, 39.5, 1000), (99.5, 41.5, 1000), (99.5, 39.5, 1000), 坐标中三分量分别表示经度($^\circ$)、纬度($^\circ$)、高程(m). 飞行相对时 30s 后 4 台测速雷达捕获目标, 80s 后一般有 6 台以上测速雷达可以捕获目标, 所以仿真时间段选取为 30s 到 80s. 数据采样和弹道解算周期采用 50ms.

4.1 测速雷达角度量测的交会精度仿真

发射坐标定义为发射点为原点, X 轴在过原点水平面内指向射向, 方位角选为 100° , Y 轴与过原点的铅垂线重合指向地球外, Z 轴与两轴构成右手系.

通过蒙特卡罗仿真方法比较两种方法交会精度. 假设在此刻飞行目标位于发射系下直角坐标为(11000, 23000, 25)的位置, 单位是 m, 将该坐标作为目标定位真值. 对目标定位真值进行逆运算, 分别反算到上述四台测速雷达的测量坐标系, 获得各测站的角度量测, 并分别加入正态分布 $N(0, 0.07^2)$ 测角随机误差, 计算 10000 组各测站对于目标测角仿真数据. 采用 2 节的两种方法, 对每次仿真的测角数据对目标位置进行计算, 并与真值做差, 再对 10000 个差进行统计, 统计均值和方差见表 1.

表 1 两种测角交会定位方法误差均值与均方差对比(m)

均值/方差	X 方向	Y 方向	Z 方向
最小二乘法	6.02/527.97	-7.08/420.59	-10.8/1739.03
迭代法	-2.91/346.36	-0.57/315.93	-2.98/562.24

从表 1 中可以看出, 单纯使用迭代法还是最小二乘法对测速雷达的角度量测进行弹道求解, 结果各向误差均较大, 无法满足要求. 在相同情况下, 本文 2.2 节的方法略优于 2.1 节的方法.

4.2 速度量测与伪定位量测融合精度分析

在 4.1 节中, 通过蒙特卡罗仿真比较了两种估算方法的估计精度. 本节中, 选用精度相对较高的迭代交会方法的结果作为伪量测, 并将式(15)中的 $\delta_{1,k}$, $\delta_{2,k}$, $\delta_{3,k}$ 按 4.1 仿真结果, 近似建模如下:

$$\delta_{1,k} \sim N(0, 350^2), \delta_{2,k} \sim N(0, 300^2), \delta_{3,k} \sim N(0, 550^2).$$

注意到 4.1 节蒙特卡罗仿真统计结果的误差均值, 并不是准确为 0, 但与方差的量级相比都接近于 0. 为便于使用无迹卡尔曼滤波, 将各向伪量测的定位误差近似为 0. 速度量测的随机误差都近似建模为 $N(0, 0.03^2)$.

以发射系理论飞行弹道 30s 到 80s 间的数据作为真值弹道, 使用上述四台测速雷达对其每 50ms 进行一次观测, 获取的角度测量采用迭代法计算的定位作为

伪量测,然后和其它 4 个速度量测一起输送给 3 节描述的无迹卡尔曼滤波器,滤波器的输出结果如图 1 所示:

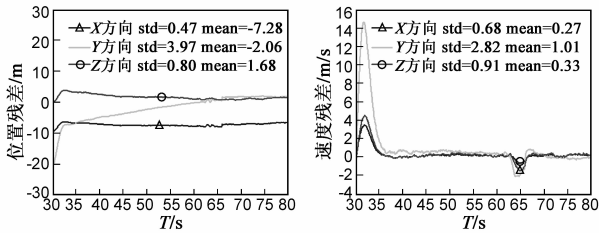


图1 无迹卡尔曼滤波对伪定位量测和速度量测的融合结果

从图 1 中可以看出,滤波后的结果大大优于原交会定位结果,弹道定位精度提高到了 10m 以内,测速精度在大约 95% 的时间段,都优于 1m/s,完全满足实时弹道的解算需求.输出的曲线波动,是由于目标较大机动产生.在 32s ~ 33s 左右,曲线突起可以通过优化测速布站来平抑;65s 时刻的曲线波动,是由于理论弹道在 65s 左右有较大机动,产生的波形是采用滤波方法输出的常见结果.

5 结论

传统测速雷达网数据处理仅使用了高精度速度量测,对于测速雷达同时输出的低精度角度量测没有合理利用.本文方法是对测速雷达网输出的多种量测进行融合的有益尝试,仿真结果表明,新方法针对局域测速雷达网跟踪目标时对速度量测不足的问题提出了有效的解决方案,获得了满意的弹道解算精度.同时,本文中提出的角度交会算法,对于当前已知角度交会方法是有益补充,可以应用到光学经纬仪、红外图像跟踪等纯测角观测设备的目标跟踪问题中来.

参考文献

- [1] 王正明.弹道跟踪数据的校准与评估[M].长沙:国防科技大学出版社,1999.19-321.
WANG Zheng ming. Calibration and Evaluation of Trajectory Tracking Data[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999. 19-321. (in Chinese)
- [2] S J Julier, J K Uhlmann, H F Durrant-Whyte. A new method for the non-linear transformation of mean and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [3] 王宏飞,杨成梧.双被动雷达交会跟踪的精度分析与跟踪算法[J].电子学报,2003,31(3):471-474.
WANG Hong-fei, YANG Cheng-wu. Tracking algorithm and precision analysis for passive radars from two platforms[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 471-474. (in Chinese)
- [4] B Ristic, M S Arulampalam. Tracking a manoeuvring target using angle-only measurements: algorithms and performance

[J]. Signal Processing, 2003, 83(6): 1223-1238.

- [5] 刘利生.外测数据事后处理[M].北京:国防工业出版社, 2002. 298-300.
LIU Li-sheng. Post-Flight Data Processing of Trajectory Measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 298-300. (in Chinese)
- [6] A P Dempster, N M Laird, D B Rubin. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1977, 39(1): 1-38.
- [7] G Celeux, G Govaert. A classification EM algorithm for clustering and two stochastic versions[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 1992, 14(3): 315-332.
- [8] 范小军,刘锋,秦勇,张军.基于 STF 的“当前”统计模型及自适应跟踪算法[J].电子学报,2006,34(6):981-984.
FAN Xiao-jun, LIU Feng, QIN Yong, ZHAN G Jun. Current statistic model and adaptive tracking algorithm based on strong tracking filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 981-984. (in Chinese)
- [9] X Rong Li, Vesselin P Jilkov. Survey of maneuvering target tracking part I: dynamic models [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1339-1340.

作者简介



商临峰 男,1971 年 11 月出生于山西临汾.现为西安交通大学系统工程研究所博士研究生,从事机动目标跟踪、信息融合方面的有关研究.

E-mail: shanglinfeng@126.com



杨小军 男,1971 年 6 月出生于陕西扶风.现为长安大学信息工程学院副教授.主要从事多目标跟踪、多源信息融合,统计信号处理,无线传感器网络等方面的研究.

E-mail: xjyang@chd.edu.cn



邢科义 男,1957 年 8 月出生于陕西岐山.现为西安交通大学系统工程研究所教授,博士生导师,主要从事离散复杂系统建模、优化与控制、机动目标跟踪、信息融合方面等方面的研究工作.

E-mail: kyxing@sei.xjtu.edu.cn