

文章编号: 2095-4980(2019)01-0069-05

基于方位测量和速度估计的目标定位跟踪

田明辉^{1,2}, 马 敏^{1,2}, 张文祎^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088; 2.孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 针对固定单站平台, 提出一种基于方位测量和速度估计的固定单站对运动目标定位及跟踪的模型算法。该模型算法利用多次的方位测量和对目标速度的估计来解算运动目标的位置航迹, 再利用交互多模型滤波技术对目标航迹进行滤波跟踪和预测。仿真实验中利用卫星工具包(STK)建模工具构建了典型场景, 并分析了目标航迹的定位精确度及跟踪效果, 对于位置固定的电子侦察系统和无源探测系统具有较为广泛的工程应用价值。

关键词: 方位测量; 速度估计; 运动目标; 固定单站

中图分类号: TN953

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0069

Target localization and tracking based on azimuth measurement and velocity estimation

TIAN Minghui^{1,2}, MA Min^{1,2}, ZHANG Wenyi^{1,2}

(1.No. 38 Research Institute of CETC, Hefei Anhui 230088, China; 2.KLAASA Laboratory, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Target localization based on azimuth measurement and velocity estimation is an important technology in electronic reconnaissance. A model for motion target localization and tracking based on azimuth measurement and velocity estimation in single fixed station is proposed. In this model, the motion target tracks can be calculated by using multi-time azimuth measurement and the estimation of target speed. Also the Interactive Multiple Model(IMM) filter is utilized for target tracking and forecasting. In the simulation experiment, a typical scene is constructed by using the Satellite Tool Kit(STK), and the precision of target localization and the effect of target tracking are also analyzed. Finally, several constructive conclusions are made for practical engineering applications.

Keywords: azimuth measurement; velocity estimation; motion target; single fixed station

在现代电子战中, 对辐射源目标进行单站无源定位具有非常重要的价值^[1-4]。通过无源侦察获取辐射源目标的电磁信息及方位信息, 利用多站同时对同一目标观测的方位线进行交叉定位, 或利用运动单站分时对同一目标观测的方位线进行交叉定位, 可以实现对固定目标的定位^[5-7]。这一技术在电子战情报处理应用中已比较成熟, 但对运动目标的定位与跟踪仍是比较棘手的问题, 是无源探测领域的又一热点和难点^[8-10]。由于客观条件的限制, 多站同时观测同一目标的情况并不容易出现。相对于多站无源定位, 单站定位只需要一个观测平台, 具有更大的独立性和灵活性, 以及更为显著的隐蔽性和反隐身性。本文主要研究基于方位测量的固定单站对运动目标的定位与跟踪技术。由于单站无源定位获得的信息量较少, 实现难度比较大, 因此定位方法和算法的选择显得尤为重要。针对传统方法^[11-12]定位时间长、精确度低、跟踪效果不佳等问题, 在建立基于方位测量的定位模型基础上, 引入交互式多模型(IMM)滤波算法^[13], 对空中运动目标辐射源进行跟踪滤波。仿真结果表明, 相比传统方法, 本文算法模型的定位时长、定位精确度和跟踪效果均有一定程度的改善, 对新型无源探测系统具有一定的工程指导意义。

1 定位模型

由于客观条件所限, 现实中大多数情况是通过固定单站对空中运动目标的侦察观测获得辐射源目标的电磁信

息和方位信息。不考虑高度变化的情况下,空中目标在短时间内可以看成匀速直线运动,而观测站可以看成是一个固定的点。如图1所示,以侦察站为原点,建立站心直角坐标系。假定目标 T 进行匀速直线运动,且目标的运动速率 v 可以估算出来。根据对目标的连续3次历史观测,相邻2次的时间间隔为 Δt ,目标信号的方位角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 求解目标的运动航向角 ϕ 以及目标的航迹位置 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ 和 (X_3, Y_3) 。由此,建立以下数学模型。

由于目标进行匀速直线运动,且运动速率为 v ,则目标在 Δt 时间内运动的距离 $m = v\Delta t$ 。根据三角函数关系,有:

$$\frac{Y_1}{X_1} = \tan \theta_1 \quad (1)$$

$$\frac{Y_1 + m \sin \phi}{X_1 + m \cos \phi} = \tan \theta_2 \quad (2)$$

$$\frac{Y_1 + 2m \sin \phi}{X_1 + 2m \cos \phi} = \tan \theta_3 \quad (3)$$

将式(1)中的 Y_1 代入式(2)~(3),可得:

$$\frac{X_1 \tan \theta_1 + m \sin \phi}{X_1 + m \cos \phi} = \tan \theta_2 \quad (4)$$

$$\frac{X_1 \tan \theta_1 + 2m \sin \phi}{X_1 + 2m \cos \phi} = \tan \theta_3 \quad (5)$$

将式(4)和式(5)化简后,可得:

$$(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) X_1 = m (\cos \phi \tan \theta_2 - \sin \phi) \quad (6)$$

$$(\tan \theta_1 - \tan \theta_3) X_1 = 2m (\cos \phi \tan \theta_3 - \sin \phi) \quad (7)$$

将式(6)和式(7)等号左右两边进行相除运算,可得:

$$\frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_3} = \frac{\cos \phi \tan \theta_2 - \sin \phi}{2(\cos \phi \tan \theta_3 - \sin \phi)} \quad (8)$$

由于 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为目标信号的观测角,不妨令 $k = \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_3}$, 则式(8)可以简化为:

$$k = \frac{\cos \phi \tan \theta_2 - \sin \phi}{2(\cos \phi \tan \theta_3 - \sin \phi)} \quad (9)$$

将式(9)右边分子分母同时除以 $\cos \phi$, 则比值仍为 k :

$$k = \frac{\tan \theta_2 - \tan \phi}{2(\tan \theta_3 - \tan \phi)} \quad (10)$$

求解式(10)中的 $\tan \phi$, 可得:

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta_2 - 2k \tan \theta_3}{1 - 2k} \quad (11)$$

求出目标运动的航向角 ϕ 后,代入式(6)和式(1)中,则可求解出目标的第1次观测位置 (X_1, Y_1) , 从而进一步求解出目标的第2次观测位置 (X_2, Y_2) 和第3次观测位置 (X_3, Y_3) 。由于对目标信号的方位角 θ 存在观测误差,因此当观测数据较多时,可用最小二乘或者滤波器的方法来处理,从而提高对目标运动的航向角 ϕ 的解算精确度。

2 跟踪模型

由于观测站对空中运动目标的方位观测和速度估计通常具有一定的误差,因此通过上述定位模型解算出来的目标位置通常也具有一定的误差,目标航迹往往会由此形成一定程度的摇摆。为降低目标航迹的随机误差、提高航迹的跟踪精确度,引入 IMM 滤波算法。IMM 是一种混合系统状态估计的次优算法^[14-15]。在时刻 k , 利用 IMM 方法进行目标状态估计的计算时,考虑每个模型滤波器都有可能成为当前有效的系统模型滤波器,每个滤波器的初始条件都是基于前一时刻各条件模型滤波结果的合成。IMM 算法结构图见图2。

算法的主要步骤:

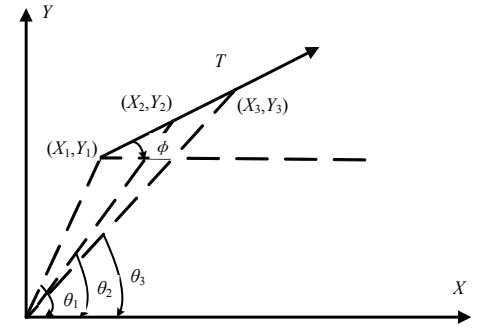


Fig.1 Three times measurements for target azimuth angle
图1 连续3次对目标方位角的测量

第 1 步: 模型条件初始化

1) 计算混合概率

$$\mu_{k-1|k-1}^{i,j} = P(M_{k-1}^i | M_{k-1}^j, Z_{k-1}) = \frac{1}{\bar{c}_j} \pi_{ij} \mu_{k-1}^i, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中: π_{ij} 是假定的马尔可夫模型转移概率, 给出了 $k-1$ 时刻由模型 M_{k-1}^j 到 k 时刻由模型 M_{k-1}^i 的转移概率; μ_{k-1}^i 是 $k-1$ 时刻的模型 M_{k-1}^i 的概率; $\bar{c}_j = \sum_{i=1}^N \pi_{ij} \mu_{k-1}^i$ 。

2) 计算混合估计, 即按混合概率进行初始化状态与协方差

$$X_{k-1|k-1}^{j0} = \sum_{i=1}^N X_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1|k-1}^{i,j} \quad (13)$$

$$P_{k-1|k-1}^{j0} = \sum_{i=1}^N \left[P_{k-1|k-1}^i + (X_{k-1|k-1}^i - X_{k-1|k-1}^{j0})(X_{k-1|k-1}^i - X_{k-1|k-1}^{j0})' \right] \mu_{k-1|k-1}^{i,j} \quad (14)$$

第 2 步: 对各模型分别进行卡尔曼滤波

1) 预测

$$X_{k|k-1}^i = F_{k-1}^i X_{k-1|k-1}^i \quad (15)$$

$$P_{k|k-1}^i = F_{k-1}^i P_{k-1|k-1}^i (F_{k-1}^i)' + Q_{k-1}^i \quad (16)$$

2) 更新

$$\tilde{Z}_k^i = Z_k - H_k^i X_{k|k-1}^i \quad (17)$$

$$S_k^i = H_k^i P_{k|k-1}^i (H_k^i)' + R_k^i \quad (18)$$

$$K_k^i = P_{k|k-1}^i (H_k^i)' (S_k^i)^{-1} \quad (19)$$

$$X_{k|k}^i = X_{k|k-1}^i + K_k^i \tilde{Z}_k^i \quad (20)$$

$$P_{k|k}^i = P_{k|k-1}^i - K_k^i S_k^i (K_k^i)' \quad (21)$$

3) 计算模型似然函数

第 3 步: 更新模型概率。

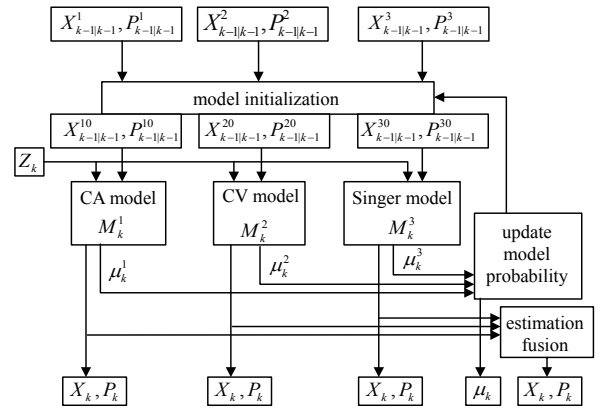


Fig.2 Architecture of IMM algorithm
图2 IMM算法结构图

$$\mu_k^i = \frac{1}{c} \Lambda_k^i \sum_{j=1}^N p_{ij} \mu_{k-1}^j = \frac{\bar{c}_i}{c} \Lambda_k^i \quad (22)$$

式中 c 为归一化常数。

$$c = \sum_{i=1}^N \Lambda_k^i \bar{c}_i \quad (23)$$

式中 Λ_k^i 为在 Gauss 条件下的似然函数。

$$\Lambda_k^i = \frac{1}{\sqrt{2\pi} |S_k^i|} \exp \left[-\frac{1}{2} (\tilde{Z}_k^i)' (S_k^i)^{-1} \tilde{Z}_k^i \right] \quad (24)$$

第 4 步: 状态估计融合

计算 k 时刻, 系统融合后的状态和误差协方差阵

$$X_{k|k} = \sum_i \mu_k^i X_{k|k}^i \quad (25)$$

$$P_{k|k} = \sum_i \mu_k^i \left[P_{k|k}^i + (X_{k|k}^i - X_{k|k})(X_{k|k}^i - X_{k|k})' \right] \quad (26)$$

滤波器的输出是多个滤波器估计结果的加权平均值。

3 仿真实验

实验采用 STK(8.0)专业建模仿真工具生成空中运动目标的飞行轨迹和观测站对目标的方位观测数据, 再结合 Matlab(2012a)软件进行算法模型仿真计算。图 3 为 STK 仿真工具中的仿真实验图, 仿真实验中设定空中飞行的辐射源目标进行匀速直线运动, 飞行速度为 220 m/s, 飞行时长为 45 min, 飞行总距



Fig.3 A simulation scene in STK modeling software
图3 STK软件建模仿真场景设定图

离为 594 km, 飞行高度为 8 km, 飞行起点和终点大地坐标分别为(113.988 4,30.558 2)和(118.195 5,34.528 0)。观测站的大地经纬坐标为(117.642 0,31.270 0), 观测站高度为海拔 0 m, 对空中目标的观测数据率为 1 Hz, 方位测量精确度为 0.5° , 速度估计误差为 20 m/s 高斯噪声分布, 有效观测时间为 37 min。

根据式(11)求解目标的航向, 仿真结果如图 4 所示。接下来, 根据对目标速度的估计, 代入式(6)和式(1)求解目标位置, 仿真结果如图 5 和图 6 所示。将解算出来的目标位置转换到以观测站为中心的极坐标系下, 再利用 IMM 滤波算法对目标距离方位进行两维滤波, 滤波后的结果如图 7 和图 8 所示。

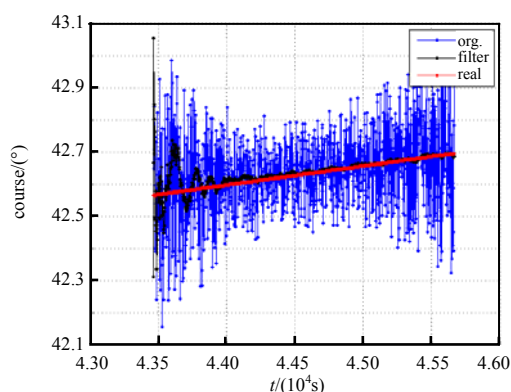


Fig.4 Filtering process for target course values
图4 对于目标航向解算的滤波处理图

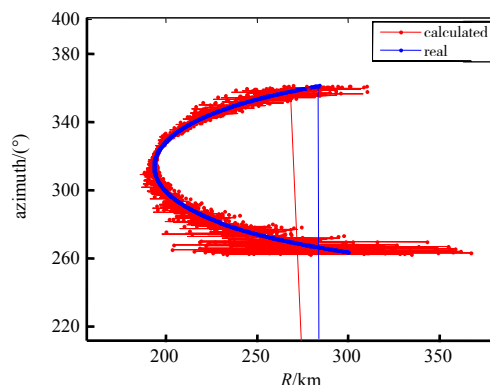


Fig.5 Comparison graph between calculation values and true values for target positions
图5 目标位置解算值与真实值对比图

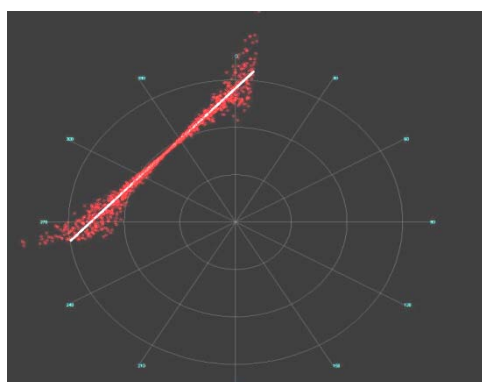


Fig.6 Comparison graph between calculation values and true values for target positions
图6 目标位置解算与真实值的极坐标对比图

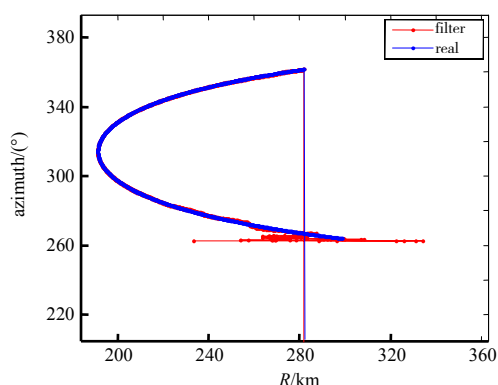


Fig.7 Comparison graph between filtering values and true values for target positions in polar coordinates
图7 目标位置滤波值与真实值对比图

从以上仿真实验结果可以得出: a) 通过多次对目标方位角的测量和速度的估算, 可以解算出运动目标的位置。b) 采用 IMM 滤波算法对目标距离方位进行两维滤波后, 可以大幅降低由于方位测量和速度估算带来的目标位置误差, 提高航迹精确度; c) 由于采用了 CA,CV 和 Singer 三种运动模型, 因此对于运动目标发生机动的情况也具有一定程度的适应能力。

4 结论

本文给出一种基于方位测量的固定单站对运动目标定位跟踪的计算模型, 通过方位测量求解目标航向, 再基于对目标速度的估计求解目标的位置, 最后利用 IMM 滤波算法对目标位置进行两维滤波, 形成高精确度的目标航迹。通过仿真实验分析, 本文的模型算法具有以下特点:

- 1) 仅要对目标方位角进行测量, 基于对目标速度的估计, 即可求解目标位置。
- 2) 针对运动速度较为平稳, 如预警机、运输机、轰炸机、民航、无人机等目标, 具有较好的定位跟踪效果;

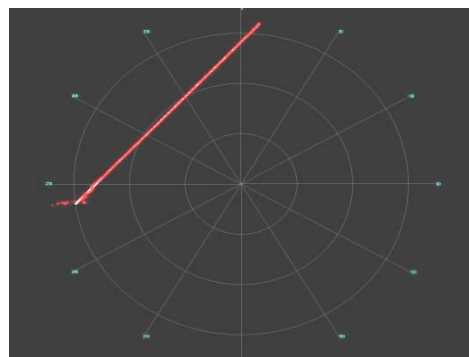


Fig.8 Comparison graph between filtering values and true values for target positions in polar coordinates
图8 目标位置滤波值与真实值的极坐标对比图

对于运动速度较易发生机动的目标,如战斗机、歼击机等,本文滤波模型也具有一定的适应性。

3) 对于位置固定的电子侦察系统或无源探测系统具有较为广泛的工程应用价值。对于运动平台,经过适当的坐标变换,也具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 李宗华,冯道旺,孙仲康,等. 对空中辐射源的快速无源定位算法及其可观测性分析[J]. 宇航学报, 2003,24(5):473-477. (LI Zonghua,FENG Daowang,SUN Zhongkang,et al. Passive location and tracking algorithm for air-emitters and its observability analysis[J]. Journal of Astronautics, 2003,24(5):473-477.)
- [2] WANG Zhi,LUO Ji'an,ZHANG Xiaoping. A novel location-penalized maximum likelihood estimator for bearing-only target localization[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2012,60(12):6166-6181.
- [3] 汤扣林,刘韵,赵春东. 单站测向定位技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2009,34(12):112-116. (TANG Koulin,LIU Yun,ZHAO Chundong. Study on location method of single station azimuth measurement[J]. Fire Control and Command Control, 2009,34(12):112-116.)
- [4] 郁涛. 固定单站纯方位目标运动参数的解析方法[J]. 电波科学学报, 2014,29(4):634-638,652. (YU Tao. Analytic method of bearing-only target motion parameter for fixed single-station[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014,29(4): 634-638,652.)
- [5] 刘莎,刘以安,戴娟. 基于多普勒频率变化率的单站无源测距方法[J]. 计算机仿真, 2012,29(2):11-14. (LIU Sha,LIU Yi'an,DAI Juan. Single-observer passive ranging method based on Doppler changing rate[J]. Computer Simulation, 2012, 29(2):11-14.)
- [6] 刘聪锋. 无源定位与跟踪[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011. (LIU Congfeng. Passive location and tracking[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2011.)
- [7] 田明辉,马敏. 基于相位差的机载单站无源定位算法研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):190-194. (TIAN Minghui,MA Min. An algorithm research for air-borne single observer passive locating based on phase difference[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):190-194.)
- [8] SONG T L. Observability of target tracking with bearing only measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996,32(4):1468-1472.
- [9] TAFF L G. Target localization from bearing only observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997,33(1):2-10.
- [10] GAVISH M,WEISS A J. Performance analysis of bearing-only target location algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992,28(3):817-828.
- [11] 窦修全,国辛纯. 基于双天线单元的单站无源定位技术[J]. 舰船电子对抗, 2014,37(1):11-14. (DOU Xiuquan,GUO Xinchun. Single station passive location technology based on two-antenna unit[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014,37(1):11-14.)
- [12] 万方,丁建江. 对运动目标的单站无源定位技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2011,9(1):8-12. (WAN Fang,DING Jianjiang. Research on single observer passive location technology for moving targets[J]. Radar Science and Technology, 2011,9(1):8-12.)
- [13] MAZOR E,AVERBUCH A,BAR-SHALOM Y,et al. Interacting multiple model methods in target tracking:a survey[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998,34(1):103-123.
- [14] LI X R,JILKOV VP. Survey of maneuvering target tracking. Part V:multiple-model methods[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005,41(4):1255-1321.
- [15] 郭睿利,郭云飞,张云龙,等. 基于一种改进 IMMJPDA 算法的地面目标跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(4):406-411. (GUO Ruili,GUO Yunfei,ZHANG Yunlong,et al. Ground target tracking based on an improved IMMJPDA algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):406-411.)

作者简介:



田明辉(1981-),男,黑龙江省大庆市人,博士,主要从事无源探测系统设计研究工作.
email:24380496@qq.com.

马敏(1979-),男,江西省景德镇市人,硕士,主要从事系统软件架构等研究工作.

张文祎(1987-),男,安徽省庐江县人,硕士,工程师,主要从事无源定位算法及信息对抗方面研究.