

文章编号: 2095-4980(2016)02-0190-05

基于相位差的机载单站无源定位算法

田明辉, 马 敏

(中国电子科技集团公司 第 38 研究所, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 机载无源定位是电子侦察中的一项重要任务。针对实际工程特点, 提出了一种鲁棒的基于相位差测量的机载单站无源定位算法。通过测量目标信号的方位角和相位差, 利用卡尔曼滤波模型计算相位差变化率并对目标进行测距定位, 最后将多次的定位结果进行交互多模滤波融合, 实现对目标的高精确度定位。给出了计算相位差变化率的滤波模型、目标定位算法, 以及交互多模滤波的融合定位过程。仿真实验中采用 STK 仿真软件生成机载平台的位置数据和目标信号入射方位角及相位差数据, 分析了目标定位的效果及性能。最后给出了一些工程实践性的建议, 具有一定的工程参考意义。

关键词: 相位差; 机载; 无源定位; 交互多模滤波

中图分类号: TN973

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0190

An algorithm research for air-borne single observer passive locating based on phase difference

TIAN Minghui, MA Min

(No. 38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Single observer passive locating is an important task for air reconnaissance. A robust algorithm for air-borne single observer passive locating based on phase difference is proposed in this paper. The target location can be worked out by using the Kalman filter model based on the azimuth angle of target signal and the phase changing difference at the same time. The Kalman filter model for calculating the phase difference rate of change is presented. And the Interaction Multiple Model(IMM) filter model is also given for raising the precision of target locating algorithm. In the experiment, the STK software is utilized for generating the platform position data, the signal azimuth data and the phase changing difference. In addition, the target locating result and the performance are also analyzed. Finally, several constructive suggestions are made for practical engineering applications.

Key words: phase difference; air-borne; passive locating; Interaction Multiple Model(IMM) filter

无源定位技术是电子侦察中的一项重要技术, 其具有作用距离远、隐蔽接收、不易被对方发觉的优点, 对于提高系统在电子战环境下的生存和作战能力有着重要的作用^[1-2]。机载单站无源定位只利用一个观测平台对目标进行无源定位。由于信息量相对较少, 机载单站无源定位实现难度较大。其定位实现过程通常用机载侦察设备对辐射源进行连续观测, 获得一定量定位信息积累后, 进行适当数据处理, 获取辐射源目标位置。从几何意义上来说就是用多个定位曲线(面)的交会来实现定位, 即利用运动学原理测距, 以振幅、相位或多普勒频率法测向, 依靠几何学原理定位, 结合非线性滤波技术, 实现机载单站对地面目标的快速高精度无源定位^[3-4]。

1 定位算法

1.1 定位原理

假设观测平台与目标之间进行非径向、匀速直线运动, 建立一个平面坐标系, 如图 1 所示。图 1 中,

收稿日期: 2014-11-07; 修回日期: 2015-02-28

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAH24B06)

V 为观测平台速度矢量, R 为观测平台至目标的水平距离, R_0 为观测航路捷径, θ 为信号入射角。

假设观测平台起始信号入射角为 θ_0 , 在 X 轴上的起始坐标 x_0 , 运行时间 t 后的入射角为 θ , 在 X 轴上的坐标为 x , 由几何关系可知:

$$x - x_0 = vt = R_0 \tan \theta - R_0 \tan \theta_0 \quad (1)$$

从式(1)表明在观测平台飞行过程中, 信号入射角 θ 是速度 V 、捷径 R_0 及时间 t 的函数。假设观测平台作匀速直线飞行, 则 V 不变, R_0 不变, 将式(1)对 t 求导, 写成微分形式如下:

$$R_0 = \frac{V}{\dot{\theta}} \cdot \cos^2 \theta \quad (2)$$

代入 $R_0 = R \cdot \cos \theta$, 从而有:

$$R = \frac{V}{\dot{\theta}} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

根据干涉仪测相位差原理^[5], 如果测量设备基线长度为 D , 且目标信号波长为 λ , 则式(3)可以写成:

$$R = \frac{2\pi DV \cos^2 \theta}{\dot{\phi} \lambda} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 如果能同时测出目标信号入射角 θ 、相位差变化率 $\dot{\phi}$, 则可以计算出目标距离, 再结合平台自身的位置和航向信息, 就能够解算出目标的地理坐标位置, 实现瞬时定位。

1.2 参数计算

考虑观测平台的运动轨迹为匀速直线运动, 那么对于目标而言, 在一个很短的时间内, 目标信号的入射角及相位差可以近似看成是线性变化的, 由此可以直接应用 Kalman 滤波器进行滤波处理, 考虑参数变化符合匀加速模型(Constant Acceleration, CA), 则该模型的 Kalman 滤波器状态方程和量测方程如下:

参数状态模型:

$$\mathbf{X}_{k+1}^m = \mathbf{F}^m \mathbf{X}_k^m + \mathbf{G}^m \mathbf{W}^m(k) \quad (5)$$

参数量测模型:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (6)$$

式中: 状态向量为 $\mathbf{X}_k^m = [x, \dot{x}, \ddot{x}]$; 状态转移矩阵 $\mathbf{F}^m = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 其中, T 为采样周期; $\mathbf{G}^m = [T^2/2, T, 1]^T$, 上

标 T 表示矩阵转置; $\mathbf{W}^m(k)$ 为过程噪声矩阵; 量测矩阵 $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$; $\mathbf{V}(k)$ 为观测噪声矩阵。

根据 Kalman 滤波原理, 进行如下递推计算:

$$\begin{cases} \text{prediction: } \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{X}}_k \\ \text{prediction of covariance: } \mathbf{P}_{k+1/k} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \\ \text{gain: } \mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1/k} \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1/k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1})^{-1} \\ \text{filtering: } \hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}) \\ \text{covariance: } \mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1/k} (\mathbf{I} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1})^T - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{R}_{k+1} \mathbf{K}_{k+1}^T \end{cases} \quad (7)$$

将测量的目标信号入射角及相位差代入上述 Kalman 滤波器, 得到滤波后的目标信号入射角和相位差变化率。之后, 代入公式(4)中可得到目标的瞬时距离, 实现单次目标定位。

2 融合滤波定位

由于目标位置是固定的, 不随时间变化, 而观测平台自身是线性运动的。因此, 根据运动的相对性, 可以将观测平台自身的位置看作是固定不变的, 将目标看成是相对于观测平台做线性运动。这样可以将单次对目标的定位看成是目标点迹, 将提高目标定位精确度问题转化为目标的航迹滤波问题。这样, 采用交互式多模滤波模型(IMM)对目标点迹进行滤波, 则滤波后的航迹就是目标相对于观测平台的位置, 再结合观测平台自身的位置和航向信息, 最终求得目标的地理坐标位置。

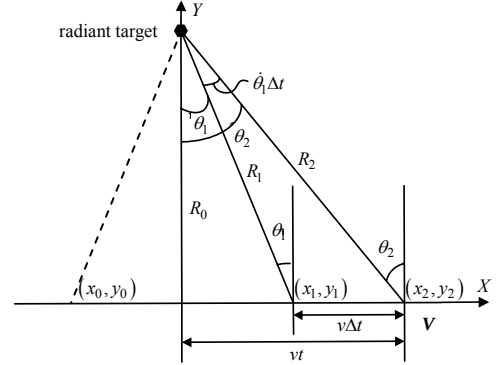


Fig.1 Locating principle based on phase difference
图 1 相位差定位原理示意图

考虑对单次定位获得的目标距离方位 IMM 滤波。IMM 是一种混合系统状态估计的次优算法^[6-8]。在时刻 k , 利用交互式多模型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的结果的合成。考虑到目标的运动特征, 主要采用常速度模型(Constant Velocity, CV)、常加速度模型(CA)和 Singer 模型作为交互多模的模型集, IMM 算法结构如图 2 所示。

算法的主要步骤:

第 1 步: 模型条件初始化。

计算混合概率

$$\mu_{k-1|k-1}^{i,j} = P(M_{k-1}^i | M_{k-1}^j, Z_{k-1}) = \frac{1}{\bar{c}_j} \pi_{i,j} \mu_{k-1}^i, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中: $\pi_{i,j}$ 为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}^i 到 k 时刻由模型 M_{k-1}^j 的转移概率,

μ_{k-1}^i 为 $k-1$ 时刻的模型 M_{k-1}^i 的概率, 其中 $\bar{c}_j = \sum_{i=1}^N \pi_{ij} \mu_{k-1}^i$ 。

计算混合估计, 即按混合概率进行初始化状态与协方差:

$$X_{k-1|k-1}^{j0} = \sum_{i=1}^N X_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1|k-1}^{i,j} \quad (9)$$

$$P_{k-1|k-1}^{j0} = \sum_{i=1}^N \left[P_{k-1|k-1}^i + (X_{k-1|k-1}^i - X_{k-1|k-1}^{j0}) (X_{k-1|k-1}^i - X_{k-1|k-1}^{j0})^T \right] \mu_{k-1|k-1}^{i,j} \quad (10)$$

第 2 步: 对各模型分别进行卡尔曼滤波。

预测

$$X_{k|k-1}^i = F_{k-1}^i X_{k-1|k-1}^{i,j} \quad (11)$$

$$P_{k|k-1}^i = F_{k-1}^i P_{k-1|k-1}^i (F_{k-1}^i)^T + Q_{k-1}^i \quad (12)$$

更新

$$\tilde{Z}_k^i = Z_k - H_k^i X_{k|k-1}^i \quad (13)$$

$$S_k^i = H_k^i P_{k|k-1}^i (H_k^i)^T + R_k^i \quad (14)$$

$$K_k^i = P_{k|k-1}^i (H_k^i)^T (S_k^i)^{-1} \quad (15)$$

$$X_{k|k}^i = X_{k|k-1}^i + K_k^i \tilde{Z}_k^i \quad (16)$$

$$P_{k|k}^i = P_{k|k-1}^i - K_k^i S_k^i (K_k^i)^T \quad (17)$$

计算模型似然函数

第 3 步: 更新模型概率。

$$\mu_k^i = \frac{1}{c} \Lambda_k^i \sum_{j=1}^N p_{ij} \mu_{k-1}^j = \frac{\bar{c}_i}{c} \Lambda_k^i \quad (18)$$

式中 c 为归一化常数。

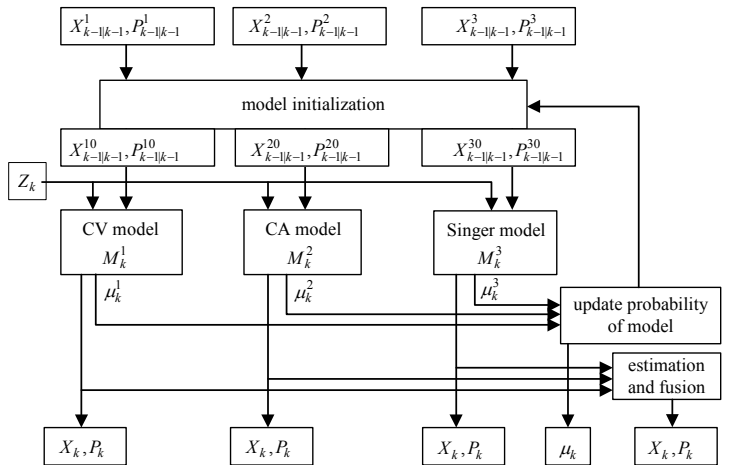


Fig.2 IMM algorithm framework

图 2 IMM 算法结构图

$$c = \sum_{i=1}^N \Lambda_k^i \bar{c}_i \quad (19)$$

式中 Λ_k^i 为在 Gauss 条件下的似然函数:

$$\Lambda_k^i = \frac{1}{\sqrt{2\pi |S_k^i|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\tilde{Z}_k^i)^T (S_k^i)^{-1} \tilde{Z}_k^i \right\} \quad (20)$$

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:

$$X_{k|k} = \sum_i \mu_k^i X_{k|k}^i \quad (21)$$

$$P_{k|k} = \sum_i \mu_k^i [P_{k|k}^i + (X_{k|k}^i - X_{k|k})(X_{k|k}^i - X_{k|k})^T] \quad (22)$$

滤波器的输出是多个滤波器估计结果的加权平均值, 实现对目标位置的滤波。

3 仿真实验

3.1 仿真条件

STK 仿真实验场景中设定观测平台为机载平台, 飞行线路为直线, 起点与终点经纬坐标分别为(112.890 2E, 27.941 9N)和(117.748 5E, 34.863 2N), 全程 899.2 km, 飞行速度为 200 m/s, 飞行高度 8 km。传感器方位可见视角区间为 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}$, 俯仰可见视角在 $[-90^{\circ}, -3^{\circ}]$ 范围之内, 传感器最大探测距离为 230 km, 观测时间的步长为 1 s, 参数测量的采样率为 20 Hz, 仿真总时长 75 min, 目标信号入射角测量误差均方根为 1° , 相位差测量误差均方根为 16° , 所有测量误差服从高斯分布。地面设定 3 个海拔高度为 0 km 的辐射源目标。目标 1 的经纬坐标为(114.706 4E, 29.247 6N), 截距 81.023 km; 目标 2 的经纬坐标为(115.878 8E, 29.572 4N), 截距 160.235 km; 目标 3 的经纬坐标为(116.916 5E, 30.158 6N), 截距 213.033 km。利用 STK 软件生成载机飞行位置数据和目标可见性数据及仿真场景。

3.2 数据分析

a) 参数滤波

对于机载侦察设备测量得到的目标瞬时信号入射角和相位差值进行卡尔曼滤波后, 可得到目标精确的信号入射角和相位差变化率, 图 3 和图 4 分别为信号入射角滤波效果图和相位差滤波效果图。

b) 单次定位

根据前面的算法描述, 在对目标信号的入射角和相位差进行 Kalman 滤波后, 获得较为精确的信号入射角和相位差变化率, 通过公式(4)可以得出目标单次定位的位置, 单次定位的位置偏差如图 5 所示。

c) 融合定位

接下来, 将单次定位的结果进行融合滤波, 再对融合定位结果计算几何平均值作为目标的最终定位结果, 如图 6 所示。经过 500 次蒙特卡洛定位实验, 并统计地面 3 个辐射源目标定位结果, 最终对 3 个辐射源目标定位的结果如表 1 所示。

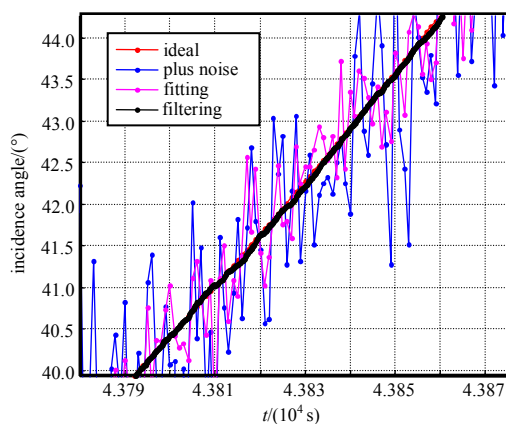


Fig.3 Filtering effect of target signal angles
图 3 目标信号入射角滤波效果图

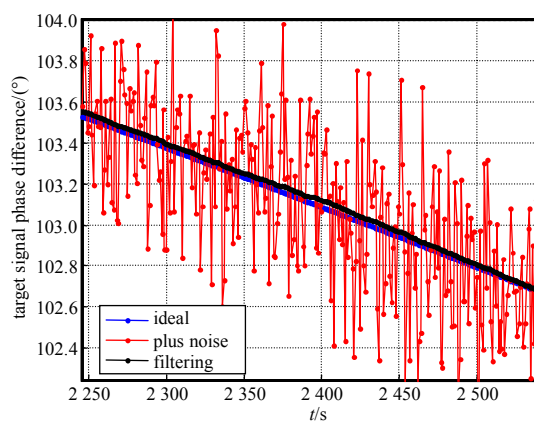


Fig.4 Filtering effect of target signal phase difference
图 4 目标信号相位差滤波效果图

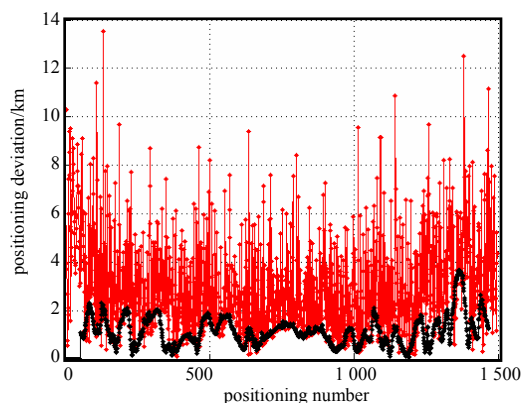


Fig.5 Error curve of single target location
图 5 目标单次定位偏差曲线

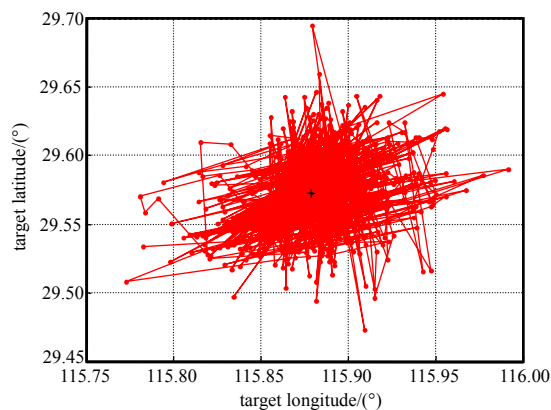


Fig.6 Fusion result of single target location
图 6 目标融合定位结果图

表 1 三批辐射源目标融合定位结果
Table1 Fusion results of three sets of emitter target location

target number	target longitude/(°)	target latitude/(°)	calculating longitude/(°)	calculating longitude/(°)	positioning deviation/km	positioning CEP/%	target intercept/km
1	114.706 4	29.247 6	114.711 5	29.244 2	0.618	0.768	81.023
2	115.878 8	29.572 4	115.857 0	29.570 8	1.568	1.323	160.235
3	116.916 5	30.158 6	116.910 7	30.188 8	3.396	1.594	213.033

3.3 实验结论

经过上述实验结果,可以得出以下几点适用于工程应用的结论:

- 1) 从图 3 和图 4 可以看出,采用 Kalman 滤波模型对目标信号入射角及目标相位差进行滤波,可以有效地降低量测噪声对定位解算的影响。
- 2) 从图 5 和图 6 可以看出,通过假定目标的相对运动,采用交互多模滤波模型对目标距离、方位进行融合滤波,有效地降低了单次定位偏差,提高了目标定位精确度,最终获得较为理想的效果。
- 3) 从表 1 可以看出,对于实验中 3 个辐射源目标的定位结果均达到圆概率误差(Circular Error Probable, CEP)小于 3%的定位精确度,验证了本文算法的有效性和定位性能。

4 结论

本文针对基于相位差变化率的机载单站目标定位问题,给出了量测参数的滤波模型,并在单次定位基础上采用交互多模融合滤波定位模型,有效地提高了定位精确度。仿真实验中,给出了目标参数滤波的效果、目标单次定位的情况以及交互多模融合滤波定位的情况,从定位偏差及定位 CEP 两方面分析了算法的有效性和性能。最后,基于仿真实验的结果分析,给出一些应用性的实验结论和建议,对工程实践有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. (HU Laizhao. Passive Locating[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2004.)
- [2] 王本才,张国毅,侯慧群. 无源定位技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2006,29(6):20-26. (WANG Bencai,ZHANG Guoyi, HOU Huiqun. Study of passive location technologies[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006,29(6):20-26.)
- [3] 李炳荣,曲长文,苏峰. 机载单站无源定位技术分析[J]. 战术导弹技术, 2005,27(6):35-39. (LI Bingrong,QU Changwen, SU Feng. The technology analysis of airborne single-station passive location[J]. Tactical Missile Technology, 2005,27(6): 35-39.)
- [4] 平殿发,司文健,苏峰. 基于观测站机动的机载单站无源定位跟踪研究[J]. 雷达科学与技术, 2010,8(6):499-502. (PING Dianfa,SI Wenjian,SU Feng. Research on airborne SOPLAT based on maneuvering observer[J]. Radar Science and Technology, 2010,8(6):499-502.)
- [5] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2009. (HE You,XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei,et al. Radar Data Processing with Applications[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [6] BLACKMAN S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Norwood,MA:Artech House, 1999.
- [7] FARINA A,DEL GAUDIO M G,D'ELIA U,et al. Detection and tracking of ballistic target[C]// Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2004. Philadelphia,USA:IEEE, 2004:450-456.
- [8] 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,高级工程师,主要研究方向为数据处理、无源定位等.email:mhtian@mail.ustc.edu.cn.

马敏(1979-),男,江西省景德镇市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为软件系统架构。