

利用时域和空域信息的单站无源定位方法研究

乔 梁^{1,2}, 王维列³

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 广东金融学院 计算机系, 广东 广州 510520; 3. 浙江广信智能建筑研究院, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 探讨一种利用辐射源在时域中的信号到达时间差信息和在空域中的信号到达方向信息, 利用固定单站对机动目标进行无源定位与跟踪的新方法. 在建立目标机动模型与测量方程的基础上, 运用修正增益扩展卡尔曼滤波(MGEKF)算法, 实现对机动目标进行定位与跟踪. 通过计算机仿真, 验证了该方法的正确性与有效性.

关键词: 单站无源定位; 修正增益扩展卡尔曼滤波; 俯仰角; 变化率; 方位角

中图分类号: TU 414

文献标识码: A

0 引言

随着电子对抗技术的不断发展, 用有源辐射的主动式雷达对运动目标定位跟踪的方法开始暴露出致命弱点——极易被侦察干扰^[1-2]. 因而被动定位跟踪技术受到了重视, 特别是单站被动定位技术, 由于具有高度独立性并且免除了复杂的时间同步装置等优点而更加引人注目. 无源定位的方法很多, 传统的单站无源定位方法总的来说具有定位时间较长、定位精度较低的特点, 并且定位精度对方向测量误差非常敏感, 在客观上对测量设备提出了较高的要求^[3-4]. 因此探索高精度、高速度的定位方法就成为单站无源定位技术研究的必然趋势.

1 系统模型的建立

1.1 系统状态模型

假设辐射源辐射等周期(周期 T_r , 恒定)的脉冲信号, 通常只能测量得到目标脉冲重复周期的估计值 \hat{T}_r , 所以将 $\Delta T_{rk} = T_r - \hat{T}_r$ 也作为未知量加入状态变量进行估计. 观测站每接收 N 个脉冲做一次观测, 则 $T = NT_r$ 为采样间隔.

设 $X_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k \ \Delta T_{rk}]^T$ 为三维条件下辐射源 k 时刻状态矢量, 目标作一定加速度扰动下的匀速运动, 观测站位于坐标原点, 得到辐射源状态方程为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1} X_k + W_k \quad (1)$$

其中: $\Phi_{k+1} = \begin{bmatrix} I_3 & T I_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{4 \times 3} & I_4 \end{bmatrix}$, $W_k = \left[\frac{T^2}{2} w_{yk}, \frac{T^2}{2} w_{zk}, TW_{yk}, TW_{zk}, TW_{zk}, 0 \right]^T$ 为扰动噪声, $E[W_k] = 0$, $E[W_k, W_k^T] = Q_k \delta_{j,k}$.

1.2 系统测量模型^[5-6]

目标的方位角、俯仰角、方位角变化率、俯仰角变化率和脉冲到达时间差是常用的无源定位观测量, 在这里我们称它们为空域变化量和时域变化量. 由方位角、俯仰角、方位角变化率、俯仰角变化率及脉冲到达时间差的定义, 得到测量方程:

$$\begin{cases} \beta_k = \arctan\left(\frac{x_k}{y_k}\right) + \delta_{\beta k} \\ \varepsilon_k = \arctan\left[\frac{z_k}{(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}}\right] + \delta_{\varepsilon k} \\ \dot{\beta}_k = \frac{\dot{x}_k y_k - \dot{y}_k x_k}{x_k^2 + y_k^2} + \delta_{\dot{\beta} k} \\ \dot{\varepsilon}_k = \frac{-x_k z_k \dot{x}_k - y_k z_k \dot{y}_k + (x_k^2 + y_k^2) \dot{z}_k}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}} + \delta_{\dot{\varepsilon} k} \\ \tau_k = TOA_k - TOA_{k-1} = (r_k - r_{k-1})/c + T + \delta_{\tau k} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\delta_{\beta k}$ 、 $\delta_{\varepsilon k}$ 、 $\delta_{\dot{\beta} k}$ 、 $\delta_{\dot{\varepsilon} k}$ 、 $\delta_{\tau k}$ 分别为方位角、俯仰角、方位角变化率、俯仰角变化率及脉冲到达时间差的测量噪声.

将上式写成矩阵形式为

收稿日期: 2006-12-20; 修订日期: 2007-03-27

基金项目: 总装备部基金资助项目(5140104C703CB0102)

作者简介: 乔 梁(1961-), 男, 吉林省吉林市人, 哈尔滨工程大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事信号处理及无源定位技术.

$$\mathbf{Z}_k = f(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \quad (3)$$

式中: \mathbf{Z}_k 为测量矩阵; $f(\mathbf{X}_k)$ 为状态矢量的实值向量函数; \mathbf{V}_k 为测量噪声, 其协方差矩阵为 $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T]$.

1.3 测量模型的线性化

因方程都是非线性的, 需对其进行线性化处理. 以方位角表达式为例, 将上式在预测点 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 处进行 Taylor 级数展开并取一次项, 可以近似得出

$$\beta_k = \beta_k(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) + \left. \frac{\partial \beta_k(\mathbf{X}_k)}{\partial (\mathbf{X}_k)} \right|_{\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}} (\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) + \mathbf{H} \cdot \mathbf{O} \cdot \mathbf{T} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H} \cdot \mathbf{O} \cdot \mathbf{T}$ 表示高阶项, $\frac{\partial \beta_k(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} = \left[\frac{\partial \beta_k}{\partial x_k} \frac{\partial \beta_k}{\partial y_k} \right]$

$$\frac{\partial \beta_k}{\partial z_k} \frac{\partial \beta_k}{\partial x_k} \frac{\partial \beta_k}{\partial y_k} \frac{\partial \beta_k}{\partial z_k} \frac{\partial \beta_k}{\partial NT_k} \Big] = \mathbf{g}_{\beta k}(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \text{ 且有}$$

$$\frac{\partial \beta_k}{\partial x_k} = \frac{\gamma_k}{x_k^2 + y_k^2} = \frac{\cos \beta_k}{r_{kxy}}, \frac{\partial \beta_k}{\partial y_k} = -\frac{x_k}{x_k^2 + y_k^2} = -\frac{\sin \beta_k}{r_{kxy}}, \frac{\partial \beta_k}{\partial z_k} = \frac{\partial \beta_k}{\partial x_k} = \frac{\partial \beta_k}{\partial y_k} = \frac{\partial \beta_k}{\partial NT_k} = 0. \text{ 用同样方法可以对其}$$

它表达式进行线性化处理.

对于 τ_k 测量方程, 利用 Taylor 展开后得 Jacobin 矩阵形式太复杂, 很难直接使用. 由于

$$r_{k-1} = \left[(x_k - Tv_x)^2 + (y_k - Tv_y)^2 + (z_k - Tv_z)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left\{ (x_k^2 + y_k^2 + z_k^2) \left[1 - \frac{2T(x_k v_x + y_k v_y + z_k v_z)}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)} + \frac{T^2(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)} \right] \right\}^{1/2}$$

$$= r_k \left[1 - \frac{2T(x_k v_x + y_k v_y + z_k v_z)}{r_k^2} + \frac{T^2(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{r_k^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

目标距离观测站很远而其速度有限, 在 T 为秒级的前提条件下可知: $v_x T$ 、 $v_y T$ 、 $v_z T$ 和 r_k 相比都可以忽略不计, 忽略二次项, 并由 $(1-x)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 - \dots$, 可得

$$r_k - r_{k-1} = \frac{T(x_k v_x + y_k v_y + z_k v_z)}{r_k}$$

$$= T(v_x \sin \beta_k \cos \varepsilon_k + v_y \cos \beta_k \cos \varepsilon_k + v_z \sin \varepsilon_k).$$

其中, $\begin{cases} \cos \beta_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2} / \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}, \\ \sin \varepsilon_k = z_k / \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \end{cases}$, 因此

$$\tau_k = \frac{T}{c} (v_x \sin \beta_k \cos \varepsilon_k + v_y \cos \beta_k \cos \varepsilon_k + v_z \sin \varepsilon_k) + NT_k = \frac{T}{c} \left[0, 0, 0, \sin \beta_k \cos \varepsilon_k, \cos \beta_k \cos \varepsilon_k, \sin \varepsilon_k, c/T \right] \mathbf{X}_k \quad (6)$$

所以

$$\frac{\partial \tau_k(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} = \left[\frac{\partial \tau_k}{\partial x_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial y_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial z_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial x_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial y_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial z_k}, \frac{\partial \tau_k}{\partial NT_k} \right]$$

$$= \mathbf{g}_{\tau k}(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \quad (7)$$

其中, $\frac{\partial \tau_k}{\partial x_k} = \frac{\partial \tau_k}{\partial y_k} = \frac{\partial \tau_k}{\partial z_k} = 0, \frac{\partial \tau_k}{\partial x_k} = NT_k \sin \beta_k \cos \varepsilon_k / c,$

$$\frac{\partial \tau_k}{\partial y_k} = NT_k \cos \beta_k \cos \varepsilon_k / c, \frac{\partial \tau_k}{\partial z_k} = NT_k \sin \beta_k / c, \frac{\partial \tau_k}{\partial NT_k} = 1.$$

经过上述分析, 我们建立了测量量与目标状态之间的关系, 应用修正增益的扩展卡尔曼滤波算法就可以实时得到目标状态的滤波估计值, 从而实现对目标的定位跟踪.

2 定位算法分析^[6-7]

如果测量方程 $\mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k)$ 满足: $h(\mathbf{X}_k) - h(\hat{\mathbf{X}}_k) = \mathbf{g}_k(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_k)(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k)$ 也就是说这个非线性函数 $h(\mathbf{X}_k)$ 可以写成状态 \mathbf{X}_k 的线性形式, 则称该非线性函数是可修正的, 同时也就可以应用 MGEKF 滤波算法. MGEKF 算法如下:

① 计算预测方程: $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$; ② 计算预测协方差: $\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \Phi_k^T + \mathbf{Q}_k$; ③ 计算 Kalman 增益: $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{g}_k^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \left[\mathbf{g}_k(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{g}_k^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) + \mathbf{R}_k \right]^{-1}$; ④ 计算滤波方程: $\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_{mk} - h(\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})]$; ⑤ 计算估计误差的协方差: $\mathbf{P}_{k/k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{g}_k(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})] \mathbf{P}_{k|k-1}$.

本文中: $\mathbf{g}_k(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) = [\mathbf{g}_{\beta k}^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \mathbf{g}_{\varepsilon k}^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \mathbf{g}_{\beta k}^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \mathbf{g}_{\varepsilon k}^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}), \mathbf{g}_{\tau k}^T(\mathbf{Z}_{mk}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})]^T$.

3 计算机仿真

仿真条件: 辐射源脉冲周期 $Tr = 1$ ms, 采样脉冲数 $N = 1000$. 辐射源运动状态: $[x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k]^T = [120 \text{ km } 100 \text{ km } 8 \text{ km } -300 \text{ m/s } 100 \text{ m/s } 2 \text{ m/s}]^T$. 观测站位于坐标原点, 测量量包括 β_k 、 ε_k 、 β_k 、 ε_k 和 TOA_k . $\sigma_\beta = \sigma_\varepsilon = 3 \text{ mrad}$, $\sigma_{\dot{\beta}} = 0.2 \text{ mrad/s}$, $\sigma_{\dot{\varepsilon}} = 0.2 \text{ mrad/s}$, $\sigma_{\Delta TOA} = 10 \text{ ns}$, 每次仿真作 100 次 Monte-Carlo. 定位算法采用 MGEKF 滤波算法.

仿真中分别采用测量子集 $\{\beta, \varepsilon, \Delta TOA\}$ 、 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \dot{\varepsilon}, \Delta TOA\}$ 和 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \dot{\varepsilon}, \Delta TOA\}$.

$\Delta TOA\}$. 上述子集分别表示为子集1、子集2、子集3和子集4.

从图1仿真结果可以得到以下结论:对于不同的测量参数子集,采用同样的定位算法,定位收敛速度和定位精度有所不同.显然加入角度变化率信息后,利用测量子集3和4的定位结果,其性能要优于子集1和2的定位结果.通过子集1和2以及3和4结果的比较可以看出,三维定位中方位角变化率的加入可以明显加快定位收敛速度并提高定位精度;而俯仰角变化率信息加入后对定位性能改善并不明显.这主要是因为对于大多数空中运动目标而言,水平方向的速度远远大于俯仰方向的速度.所以通常情况下,单站无源定位时利用角度变化率信息可以只考虑方位角变化率.

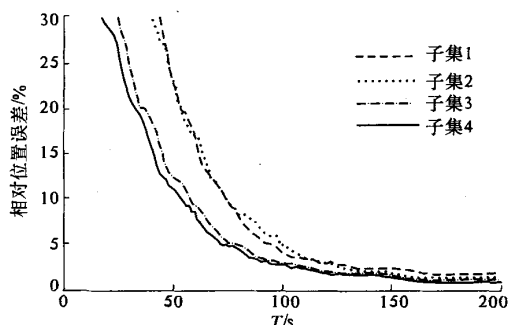


图1 相对位置误差曲线

Fig.1 Relative position error

4 结束语

讨论了单站无源定位与跟踪,并提出一种改进的无源定位与跟踪算法.该算法不仅克服了传

统卡尔曼算法的不足,而且计算简单,实现容易,实用性较强.经过一定次数的迭代滤波,较短时间内可将定位误差减小到几百米以内.理论分析和仿真结果表明,通过测量时域和空域参数可以实现无机动单站对运动辐射源的无源定位跟踪,而且定位误差可以收敛到很小.

参考文献:

- [1] 邓晓明,徐 毓.一种改进的单站无源定位与跟踪算法[J].现代电子技术,2004,189(22):83-84.
- [2] GUERCI J R, GOETZ R, DIMODICA J. A method for improving extended kalman filter performance for angle-only passive ranging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(4):1090-1093.
- [3] 王杰贵,罗景青.固定单站对机动目标无源定位 IMM 算法[J].信号处理,2002,18(2):137-140.
- [4] 李宗华,冯道旺.固定单站对三维运动辐射源无源定位算法及可观察性分析[J].信号处理,2004,20(2):117-121.
- [5] SAHA R K, CHANG K C. An Efficient algorithm for multisensor track fusion[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1):200-210.
- [6] 刘文柯,马晨欣,金 梁. DS-CDMA 系统中的 DOA 估计算法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(1):54-58.
- [7] 陆宜清,杨松华.多维组合预测的贝叶斯极大似然估计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(3):68-73.
- [8] 李 硕,曾 涛.基于推广 Kalman 滤波的机载无源定位改进算法[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4):521-524.

Research on Passive Location for Moving Emitters by Single Station Based on Spatial and Temporal Information

QIAO Liang^{1,2}, WANG Wei-Lie³

(1. College Information and Communication, Haerbin Engineering University, Haerbin 150001, China; 2. Computer Department, Guangdong Finance University, Guangzhou 510520, China; 3. Zhejiang Guangxin Intelligence Building Academy, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The Modified Gain EKF (MGEKF) algorithm for passive localization of maneuvering target by single station is discussed. Based on the time difference of arrival in time range and the direction of arrival of the emitter in space range, passive localization by single station is practicable, and also the localization of maneuvering target is practicable with the MGEKF algorithm. The computer simulation proves the method to be correct.

Key words: single station passive location; MGEKF; elevation angle; changing rate; azimuth angle