

# 基于 TOA 测量的 $T^n$ -R 型无源雷达 目标跟踪算法

徐伟杰, 王 俊

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对传统单次无源定位方法对发射站与接收站的布站要求高的缺点, 提出了基于到达时间 (time of arrival, TOA) 测量的  $T^n$ -R 型外辐射源雷达目标跟踪算法。该算法基于多个发射站获得的目标 TOA 测量值, 采用 Levenberg-Marquardt 算法快速给出目标位置, 然后利用扩展卡尔曼算法 (extended Kalman filter, EKF) 做滤波跟踪, 解决了基本 EKF 算法的收敛速度慢和受初值影响大、易发散的问题。针对机动目标跟踪, 提出了目标机动性判决方法并给出了一种简化的机动目标跟踪方案。针对外场试验数据的实际情况, 采用了基于“两发一收”体制的目标跟踪和消除航迹模糊的方法。仿真与外场数据处理均表明, 该算法收敛速度快, 性能稳定, 定位跟踪精度高, 可满足实用要求。

**关键词:** 无源跟踪; 扩展卡尔曼算法; 位置初始算法; 到达时间; 航迹模糊

**中图分类号:** TN 957

**文献标志码:** A

## Target tracking algorithm in $T^n$ -R passive radar using TOA measurement

XU Wei-jie, WANG Jun

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A target tracking method based on the time of arrival (TOA) measurement is proposed. This method not only overcomes the disadvantage of special sites-deploying requirement in the location algorithm based on single-time TOA measurement but also greatly improves the location precision. Based on the TOA measurements of multi-stations, an extended Kalman filter (EKF) is used to track targets. To quicken the EKF converging speed, the Levenberg-Marquardt algorithm is utilized to give a more accurate initial value. Then a method to judge targets' manoeuvre and a simplified tracking scheme are offered. Considering the nonideal property of the outfield condition, a system with only two emitters and one receiver is introduced and a method to eliminate the fuzzy track is presented. Simulation and real data processing results prove that the proposed method has the advantages of fast converging speed, stable performance and high precision.

**Keywords:** passive tracking; extended Kalman filter; initializing algorithm; time of arrival; fuzzy track

## 0 引 言

无源定位与跟踪系统由于自身不发射电磁波, 所以具有隐蔽接收, 不易被敌方发现的优点; 基于外辐射源的无源相干雷达系统大多工作在米波频段, 因此还具有良好反隐身性能。在米波频段, 受阵列孔径等的限制, 不易获得准确的角度信息, 所以测角定位方法<sup>[1]</sup>定位精度往往较低; 而由于频率变化率在某些情况下 (如目标径向运动或接近径向运动时) 非常小以至于较难准确获取, 目前讨论较多的利用频率变化率的定位方法<sup>[2]</sup>应用中也受到一定限制。本文讨论仅基于到达时间 (time of arrival, TOA) 测量的  $T^n$ -R 型无源相干定位与跟踪技术。无源相干雷达的 TOA 测量精

度相对较高, 由此可以获得较好的定位精度; 融合多个发射站的目标测量信息, 还可以在接收端利用不同双基地角的回波信息有效地抑制目标 RCS 的闪烁, 从而更有效地完成目标检测, 提高定位精度。 $T^n$ -R 型系统通常的做法是利用单次测量的 TOA 形成的多个椭球面 (或双曲面) 在目标位置处的交点进行求解。然而, 尽管这种方法可以实现定位, 但却存在定位模糊, 且定位精度较差, 对收发站布站方法的要求较高, 如果不满足最佳布站方式 (正多边形顶点布站), 定位性能会急剧下降。

在实际应用中, 受外辐射源的实际布站位置限制, 很难获得理想的发射站配置, 导致定位精度很不理想。针对这一问题, 本文提出一种基于 TOA 测量和约束初值的扩展卡

收稿日期: 2008-09-22; 修回日期: 2009-04-14。

基金项目: 国家部委跨行业基金 (9140A07050908DZ0103) 资助课题

作者简介: 徐伟杰 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为单多站无源定位与跟踪、高速数字信号处理。E-mail: xjui2125@yahoo.com.cn

尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法实现非理想发射站配置情况下的无源雷达系统目标定位与跟踪,不但消除了定位模糊,且有效提高了定位精度。针对 EKF 算法收敛速度慢且受初值影响大易发散的特点,论文给出一种 Levenberg-Marquardt 算法对 EKF 的目标位置进行初始化,加快了 EKF 算法的收敛速度。针对目标机动飞行的情况,引入了机动目标跟踪方法,判断目标是否机动飞行,并实现对机动目标的跟踪。针对外场试验条件下同时三源照射下的目标回波信息不连续,为了充分利用目标测量信息,提出采用两个发射站和一个接收站的系统配置对目标实施跟踪的方法,这样只要同时收到任何两个发射站的目标回波数据,就可对目标实施跟踪定位。仿真与外场数据处理均表明,本文算法收敛速度快,性能稳定,定位跟踪精度高,可满足实用要求。

### 1 目标定位方法

利用多个外辐射源和一个接收机组成的多发单收模式的无源雷达系统对空中非合作目标进行定位,在多基地系统  $T^n-R$  中,选用多个符合条件的外辐射源发射的信号,辐射源站址坐标分别为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,接收站坐标为  $(x_R, y_R, z_R)$ ,它们测量的距离和  $\rho_i = r_i + r_R$ ,其中  $r_R$  表示接收机与目标之间的距离, $r_i$  表示目标与第  $i$  个发射站之间的距离 ( $i=1,2,\dots,n$ )。由  $n$  个发射站  $T_i$  的回波信息测得的  $\rho_i$  构成了  $n$  个回转椭球面,其中第  $i$  个椭球面的两个焦点分别为发射台  $T_i$  站和 R 站。在无任何观测误差的理想条件下,这  $n$  个椭球面交于一点,即为目标的位置。

根据 R 站获得的观测量  $\rho_i$ ,利用的几何关系为

$$\begin{cases} r_R = \sqrt{(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2 + (z-z_R)^2} \\ r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \\ \rho_i = r_R + r_i, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

可求出目标的位置坐标  $X=(x, y, z)$ ,然而求解的结果却有二组解<sup>[3]</sup>,也就意味着解是有模糊的。

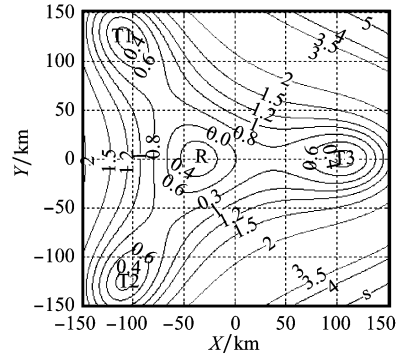
若定义  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为  $x, y, z$  上的定位误差,则定位精度用定位精度的几何稀释(geometrical dilution of precision, GDOP)表示如下<sup>[3]</sup>。

$$\epsilon_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (2)$$

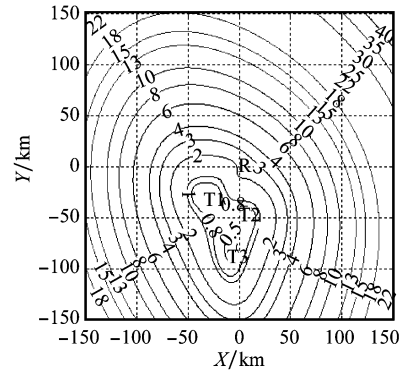
若为二维定位,则

$$\epsilon_{2dim} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3)$$

如图 1 所示,仿真表明,当三个发射站位于一个正三角形的顶点且接收站位于该三角形的几何中心时,在较大的区域内,系统的定位精度比较高,定位精度分布相对均匀。但在实际应用中,外辐射源一般并非为配置雷达而建立,三个发射站的位置很难满足正三角形的分布,接收机也未必可设在三角形中心位置,且往往严重偏离中心;另外如所采用的外辐射源的信号带宽窄,距离分辨不高,如调频广播的实际信号带宽<sup>[4]</sup>不足 100 kHz,有近 1 km~2 km 的距离测量误差,上述方法的定位精度非常低,以至到了无法接受的程度。



(a) 发射站均匀分布,接收站位于中心



(b) 发射站非均匀分布,接收站偏离中心

图 1 布站方式对“三发一收”无源定位 GDOP 分布的影响

为了解决单次测量定位精度难以满足实际应用的问题,本文引入基于 EKF 算法的目标跟踪算法。

### 2 目标跟踪 EKF 算法

由式(1)知,基于 TOA 的多站无源定位模型是非线性的,无法使用常规的线性 Kalman 滤波算法,目前使用较多的非线性滤波算法有扩展 Kalman 滤波算法(EKF)、基于无迹变换的 Kalman 滤波<sup>[5-6]</sup>(unscented Kalman filter, UKF)以及粒子滤波算法<sup>[7-8]</sup>(particle filter, PF),考虑到算法的运算复杂性,以及在弱非线性条件下以上几种算法的性能是接近的<sup>[9]</sup>,本文采用运算量较小的 EKF 算法。

设目标匀速直线运动,仅仅利用  $n(n \geq 3)$  个发射站与接收站形成的距离和测量来实现定位与跟踪。采用直角坐标,假定  $k$  时刻目标的状态为  $\mathbf{X}(k)=[x(k), y(k), z(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)]^T$ ,其中  $x(k), y(k), z(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)$  分别表示目标的空间坐标及各速度分量,系统状态方程如下。

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{W}(k), k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{A}(k)$  为状态转移矩阵;  $\mathbf{W}(k)=[w_x, w_y, w_z]$  为高斯系统加速度噪声,满足

$$\begin{aligned} E[\mathbf{W}(k)] &= 0 \\ E[\mathbf{G}(k)\mathbf{W}(k)\mathbf{W}^T(j)\mathbf{G}^T(j)] &= \mathbf{Q}(k)\delta_{kj} \end{aligned} \quad (5)$$

易得  $\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & T\mathbf{I} \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} 0.5T^2\mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$ , 其中  $\mathbf{I}$  为  $3 \times 3$  单位矩阵,  $T$  为参数获取时间间隔。

系统的观测方程

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{X}(k+1) + \mathbf{V}(k+1) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{Z}(k) = [\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_n(k)]^T$ ,  $\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_n(k)$  分别表示  $k$  时刻测得的  $n$  个发射站与接收站之间的距离和;  $\mathbf{H}(k+1)$  为观测矩阵;  $\mathbf{V}(k+1)$  为高斯观测噪声, 满足

$$E[\mathbf{V}(k+1)] = 0 \quad E[\mathbf{V}(k)\mathbf{V}^T(j)] = \mathbf{R}(k)\delta_{kj} \quad (7)$$

$k+1$  时刻的目标状态预测值由预测方程得

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1/k) = \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{X}}(k) \quad (8)$$

式中,  $\hat{\mathbf{X}}(k)$  为  $k$  时刻目标状态的估计值。

由式(1)可以看出观测向量  $\mathbf{Z}(k) = [\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_n(k)]^T$  是目标向量  $\mathbf{X}(k)$  的非线性函数

$$\mathbf{Z}(k) = F[\mathbf{X}(k)] + \mathbf{V}(k) \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{V}(k)$  为观测噪声, 其协方差矩阵为  $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_{\rho_1}^2, \sigma_{\rho_2}^2, \dots, \sigma_{\rho_n}^2)$ 。

将式(1)的  $\rho_i = r_R + r_i$  以预测值  $\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)$  中心用泰勒级数展开, 并略去二次以上的高阶分量, 得

$$\mathbf{Z}(k+1) = F[\mathbf{X}(k+1)] = F[\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)] + \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)} [\mathbf{X}(k+1) - \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)] \quad (10)$$

则观测矩阵为

$$\mathbf{H}(k+1) = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)} = \begin{bmatrix} \frac{x - x_R}{r_R} + \frac{x - x_1}{r_1} & \frac{y - y_R}{r_R} + \frac{y - y_1}{r_1} & \frac{z - z_R}{r_R} + \frac{z - z_1}{r_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{x - x_R}{r_R} + \frac{x - x_2}{r_2} & \frac{y - y_R}{r_R} + \frac{y - y_2}{r_2} & \frac{z - z_R}{r_R} + \frac{z - z_2}{r_2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x - x_R}{r_R} + \frac{x - x_n}{r_n} & \frac{y - y_R}{r_R} + \frac{y - y_n}{r_n} & \frac{z - z_R}{r_R} + \frac{z - z_n}{r_n} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)} \quad (11)$$

如 EKF 算法初始值选取的误差较大, 会出现收敛速度慢甚至滤波发散的现象, 为解决这一问题, 本文采用 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[10]</sup> 获取目标位置的初值, 对 EKF 进行目标位置初始化。

该算法同时具有高斯牛顿算法快速收敛的性质和最陡下降算法的良好收敛特性, 可在最小均方误差意义下对目标的初始位置进行估计, 形式为

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k) + [\mathbf{H}^T(k)\mathbf{H}(k) + \lambda\mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{H}^T(k)[\mathbf{Z}(k+1) - \hat{\mathbf{Z}}(k)] \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{H}(k)$  为观测矩阵, 是观测方程在  $\hat{\mathbf{X}}(k)$  的展开, 即

$$\mathbf{H}(k+1) = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}(k)}; \quad \mathbf{Z}(k) = [\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_n(k)]^T,$$

$\rho_1(k), \rho_2(k), \dots, \rho_n(k)$  分别表示  $k$  时刻  $n$  个发射站与接收站之间的距离和;  $\hat{\mathbf{Z}}(k) = F[\hat{\mathbf{X}}(k)]$ ;  $\lambda$  为调节因子, 用来控制算法收敛速度, 当  $\lambda \rightarrow 0$  时算法趋向于高斯牛顿算法, 当  $\lambda \rightarrow \infty$  时算法趋于最陡下降算法。

上述 EKF 算法中, 在状态空间中设有目标加速度分量, 所以对机动目标的跟踪效果不佳。把加速度分量加入状态空间中虽然可行, 但是状态空间维数的增加会带来运算量的大幅增加, 而且可能会导致算法的收敛性变差。所以本文提出一种简化的机动目标跟踪方法。

目标的机动性根据 Quigley-Holmes 界  $\mathbf{J}_0$  来判定

$$\mathbf{J} = [F[\hat{\mathbf{X}}(k)] - \mathbf{Z}(k)]^T [\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k+1/k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} [F[\hat{\mathbf{X}}(k)] - \mathbf{Z}(k)] \quad (13)$$

算法根据  $\mathbf{J}$  的大小来修改式(4)的  $\mathbf{W}(k)$ ; 如果某一时刻  $\mathbf{J} < \mathbf{J}_0$ , 判决目标没有机动,  $\mathbf{W}(k) = \mathbf{W}_0(k)$ ; 若  $\mathbf{J} \geq \mathbf{J}_0$ , 判决目标有机动,  $\mathbf{W}(k) = N \times \mathbf{W}_0(k)$  ( $N$  根据实际情况选取, 一般选大于 100 即可)。算法的意义在于将机动目标的加速度当作较大的随机加速度扰动来处理, 从而在目标机动时以大的  $\mathbf{Q}(k)$  来获取较大的预测波门, 从而捕捉位置变化迅速的目标。仿真表明, 算法能够很好的对机动目标进行

跟踪, 且具有收敛速度快, 稳定的特点。

### 3 仿真分析

#### 3.1 初始化算法对无源跟踪精度的改善

建立平面直角坐标系, 接收机 R 位于坐标原点, 三个外辐射源  $T_1$  位于  $(-32, -33, 0.05)$  km,  $T_2$  位于  $(0, -45, 0.06)$  km,  $T_3$  位于  $(-10, -90, 0.10)$  km 处, 三个距离和测量误差服从零均值的高斯分布, 测量误差标准差均为  $\sigma_p = 200$  m; 假定目标的初始点位置为  $(-100, 150, 10)$  km, 其飞行的速度为  $\dot{x} = 200$  m/s,  $\dot{y} = -100$  m/s, 对其位置的初始估计为  $(-80, 130, 8)$  km。假定目标在  $x, y, z$  方向分别受到均值为 0, 方差为  $1 \text{ m}^2/\text{s}^2, 1 \text{ m}^2/\text{s}^2, 0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$  的随机扰动的影响。分别采用基本 EKF 方法与有初始化算法的 EKF 方法对目标进行跟踪, 作 50 次蒙特卡罗仿真, 结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 基本的 EKF 算法需要 150 s 才能收敛, 且 450 s 以后高度维跟踪发散; 利用初始化算法在 10 s 之内就可完成对目标初始位置较为准确的估计, 基于此 EKF 很快可以收敛, 20 s 内可以收敛到满足需要的精度范围, 对应 200 m 距离测量误差目标水平位置跟踪精度可达 300 m, 且高度维跟踪不发散。可以注意到在图 2(c) 中, 由于受无源雷达体制下布站不理想, 距离测量误差较大等因素影响以及目标主要在水平方向飞行导致高度维算法调节不充分, 目标高度维的跟踪结果依然存在较大的误差。还可以注意到在跟踪初始化阶段(前 20 s 左右), 有初始化的 EKF 算法很快获得了较高的精度, 但跟踪进程转交到 EKF 算法后, 均方误差却略有向上起伏, 这在高度维表现的尤为明显, 这和 EKF 自身收敛较慢的分析是一致的。利用跟踪滤波的方法, 虽然三个发射站以及接收站的布站布局情况不理想, 但是依然可以获得相当可观的定位精度。

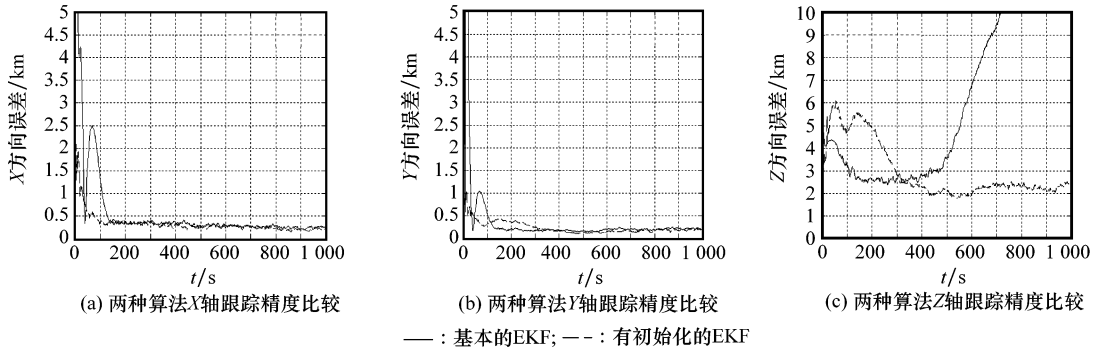


图2 初始化算法对无源跟踪精度的改善

### 3.2 布站布局对无源跟踪精度的影响

多个发射站与接收站之间的相对位置即布站布局对无源定位精度影响很大。良好的布站布局可有效提高定位精度。我们首先采用仿真一中的布站方式,采用有初始化的EKF算法,然后改变发射接收站的布局如下:接收机R坐标为(-36,0,0.1) km,外辐射源  $T_1$  位于(-108,-124.7,0) km,  $T_2$  位于(-108,-124.7,0) km,  $T_3$  位于(108,0,

0) km。其余仿真条件同 3.1 节。

从图3的仿真结果可以看出,如果采用了良好的布站布局(发射站满足正三角形分布,接收站位于该三角形的几何中心),取得很好的目标跟踪效果,200 m 的距离测量精度下可以达到 70 m~80 m 的目标水平位置定位精度,且高度维的定位精度也大大的改善。这就要求在实际的外辐射源雷达系统设计时,尽量选择分布较为理想的多个辐射站。

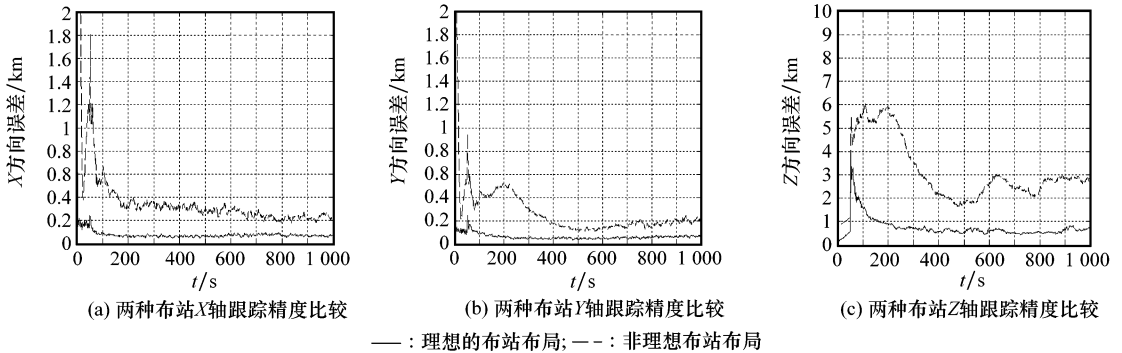


图3 不同的布站布局对无源跟踪的影响

### 3.3 机动目标的跟踪

布站布局以及接收站测量精度、目标的初始位置以及初始速度等条件同 3.1 节,目标在第 450 s~550 s 之间机动,加速度为  $a_x = -8 \text{ m/s}^2, a_y = 10 \text{ m/s}^2$ 。

图4(a)为仅利用初始化算法的EKF对上述目标进行跟踪的结果,图4(b)为机动目标跟踪EKF算法跟踪的结果。利用初始化算法作了初始化,两种算法均可迅速的实现收敛;但机动目标跟踪算法可以很好的捕捉机动目标的飞行轨迹,从而精确的跟踪目标,而非机动EKF算法在目标做机动时出现了很大的偏差,甚至发散。

图4(a)为仅利用初始化算法的EKF对上述目标进

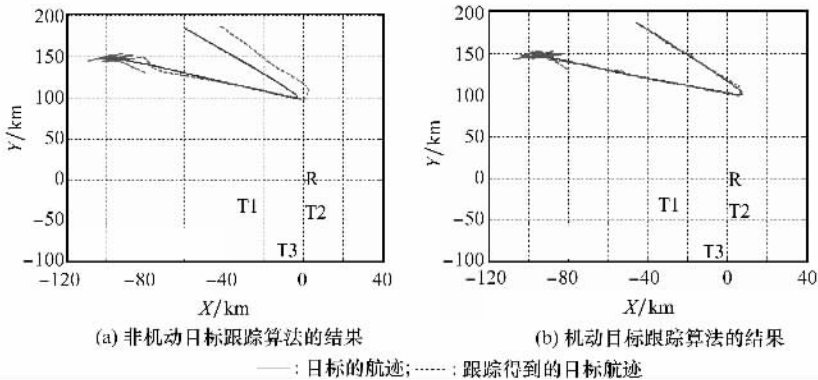


图4 机动目标跟踪

### 3.4 “两发一收”无源跟踪及消除航迹模糊方法

由以上可见,利用“三发一收”的无源雷达可以实现对目标的跟踪定位,然而实际条件下由于目标雷达散射截面起伏,广播电台的短暂停顿,各发射、接收站之间对同一目标的信息往往会有很频繁的中断,很难在同一时刻得到 3 个以上发射站的回波信息,但同时得到两个发射站的回波信息的概率却是很大的。另外仿真表明,若外辐射的相对分布不合理,增加外辐射源的个数并不一定可以提高定位精度,如图 5 所示。图 5(a)为采用  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  3 个外辐射源对目标定位的水平位置误差分布图;图 5(b)为采用其中的辐射源  $T_1$ 、 $T_2$  进行二维水平定位的误差分布图。从图 5 可看出,虽然“两发一收”定位在辐射源与接收站附近出现了定位误差较大的区域,但是如果只关心站址两侧的区域,“两发一收”水平定位精度反而有所提高。实际无源雷达应用中往往更关心目标的水平位置,这些使得在必要时采用“两发一收”的无源跟踪体制。

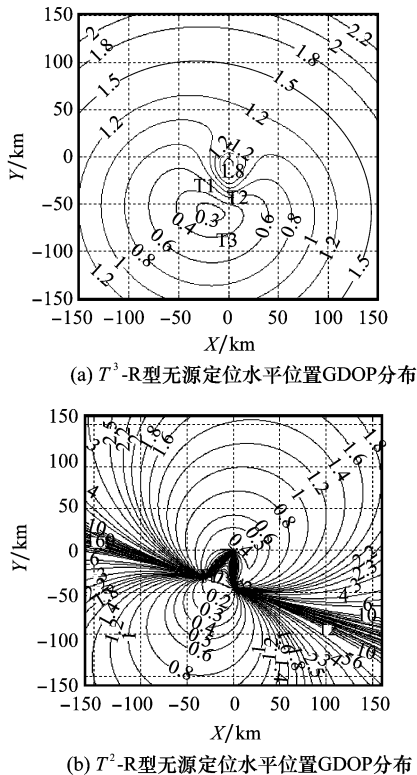


图 5 不理想布站条件增加外辐射源对定位的影响

利用两个发射站一个接收站可以对目标进行平面二维定位面临的主要问题是定位模糊问题,即除得到目标的正确位置外,还会有一个模糊解。这就使得“两发一收”无源跟踪面临的主要问题是消除模糊航迹。仿真实验显示,真假航迹位于站点两侧,跟踪能否得到正确的航迹取决于跟踪初始值距离真实航迹的距离与初始值距离虚假航迹的距离孰大孰小,只要相对来说初始值接近真实航迹,跟踪的结果就是正确的,可以把这一特点形象的描述为“跟踪起始的

就近原则”。实际条件下,本文利用目标回波接收天线主瓣的指向性,正确的初始值是不难选取的。

选取 3.1 节中的一、二发射站配合接收站,测量精度等条件同仿真实验 1,目标的初始位置为(5,5)km,飞行速度为  $\dot{x}=100$  m/s,  $\dot{y}=200$  m/s,利用天线的波束指向性进行粗约束,已知目标在第一象限,那么正确的目标初始位置取法应该在第一象限或接近区域,如取初始值为(30,5)即可。仿真如图 6,黑色和灰色的点迹是将单次测量数据利用式(1)解算出的结果,可见得到了分布在站点两侧的一真一假两行点迹,站点右上方为真实点迹,左下方为虚假点迹。如果初始值接近目标的真实航迹一侧,则跟踪结果是正确的(如图 6(a));反之,如初始值接近目标的虚假航迹一侧,则跟踪结果是错误的(如图 6(b))。

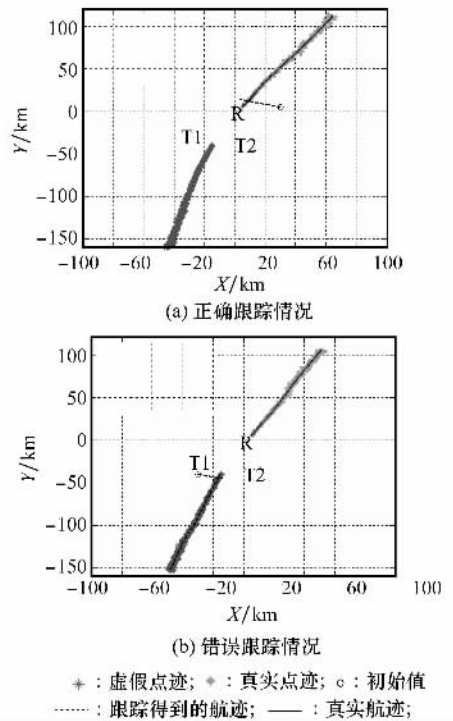


图 6 “二发一收”无源跟踪收敛性分析

### 3.5 实测数据处理和分析

发射台坐标分别为(-32.5, -33.2, 0.05) km, (0, -45.2, 0.06) km, (-11.9, -88.8, 0.10) km。接收机位于坐标原点,目标回波接收天线的主波束对准北偏东  $40^\circ$ ,主要对这个方向某条民航航线上客机进行探测跟踪。由于测量数据的不理想,我们采用综合利用“两发一收”与“三发一收”的跟踪体制。整个处理过程是:利用天线工作扇区的先验信息选取初始值;采用初始值算法做目标位置搜索;尽量采用测量得到的三个发射站的信息作定位跟踪;在仅得到两个发射站信息的情况下,采用“两发一收”体制作无源跟踪。

图 7 中外场试验中无源跟踪的结果,其中深灰色的点

迹是根据测量得到的多站距离信息按照式(1)直接解算的结果,实线是跟踪的结果。可以看出,无源跟踪极大的提高了无源定位的精度,远区的目标精度提高尤为明显。这表明“多发一收”无源定位算法可以有效对目标进行无源定位与跟踪,改进的跟踪算法具有收敛速度快、跟踪精度高的特点,完全可以满足实用要求。图7(a)中,上下两条航迹分别对应往返两个不同的飞机航线,而且可以跟踪到200 km处的目标,说明算法可以有效的跟踪目标。由于局部数据的不理想,航迹有短时中断的现象,考虑到以后可以增加外辐射源提高数据互补性来克服这一缺点,所以无源跟踪雷达有着广阔的前景;图7(b)对应另一时间段多个往返目标的实际飞行航迹。

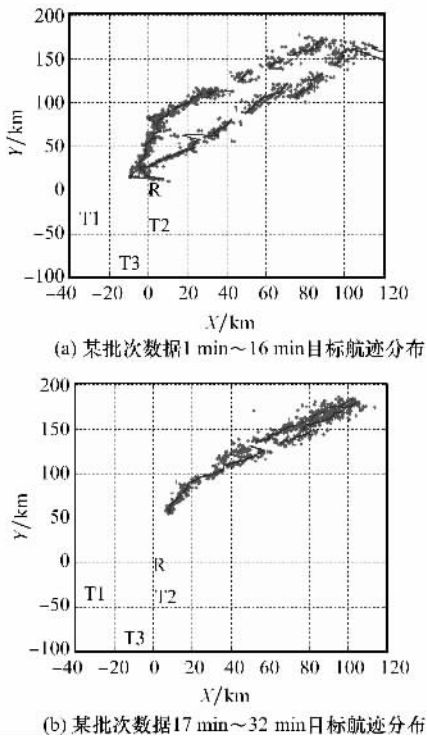


图7 外场试验中“多发一收”无源雷达定位跟踪航迹图

## 4 结束语

本文提出了基于 TOA 测量的  $T^R$ -R 型外辐射源雷达跟踪算法,克服了传统单次多站无源定位算法定位精度低,对布站布局要求高的缺点。考虑到多站无源定位模型非线

性程度不大以及降低计算复杂度的需要,采用了 EKF 算法,选用的初始化解法可在极短的时间内搜索到目标的初始位置,加快了跟踪收敛速度。机动目标检测算法较之一般方法具有引入运算量小,性能稳定的优点,可很好地捕捉机动目标。由于外辐射源雷达信号的非平稳性,难于保证在跟踪期间始终能够获取多站目标回波信息,本文提出适时采用“两发一收”无源跟踪体制,并着重解决了这种体制中出现的模糊航迹的问题。外场试验结果表明,本文算法定位精度高且性能稳定,完全可以满足实用需求。

## 参考文献:

- [1] Teak Lyul Song. Observability of target tracking with bearing-only measurements[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(4): 1468 - 1471.
- [2] Wang Qiang, Guo Fucheng, Zhou Yiyu, et al. A single observer passive location method and accuracy analysis using phase difference rate of change only[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation*, 2008: 1030 - 1033.
- [3] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996:142 - 154.
- [4] Griffiths H D, Baker C J. Passive coherent location radar systems. Part 1: Performance prediction[C]// *IEE Proc. of Radar Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 153 - 159.
- [5] Julier S J, Uhlmann J K. A new method for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2000, 45(3): 477 - 482.
- [6] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[C]// *Proc. of the IEEE Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 92(3): 401 - 422.
- [7] Gordon N, Salmond D. Novel approach to nonlinear and non-Gaussian Bayesian state estimation[C]// *Proc. of Institute Electric Engineering*, 1993, 140(2): 107 - 113.
- [8] Carpenter J, Clifford P. Improved particle filter for nonlinear problems[C]// *IEE Proc. of Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(1): 2 - 7.
- [9] Farina A, Ristic B, Benvenuti D. Tracking a ballistic target: comparison of several nonlinear filters[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3): 854 - 867.
- [10] Howland P E. Target tracking using television-based bistatic radar[C]// *IEE Proc. of Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(3): 166 - 174.