

基于状态空间模型的多辐射源运动状态分析¹

李立萍 陈天麒

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 利用无源传感器对辐射源进行无源定位是重要的研究课题,受到广泛重视,而利用运动的单一传感器对运动的多个辐射源同时进行运动状态分析则是无源定位问题中的难点,状态空间模型可将辐射源的参数估计和辐射源的运动状态分析有机地联系在一起,本文基于状态空间模型和运动的单一均匀线阵,用信息论准则和 ESPRIT 算法对辐射源的个数、辐射源的发射频率和空间频率、空间频率变化率进行联合估计,进而对各个辐射源进行运动状态分析(TMA——目标运动分析)。

关键词 阵列处理, 状态空间模型, 时空分析, 参数估计

中图分类号 TN911.23

1 前言

无源定位是一个被广泛研究的课题,而利用单一运动的无源观测器对辐射源进行运动状态分析则是它的难点,这是因为观测器和辐射源都处于运动状态,使得对辐射源的可观性大大降低,有关对运动辐射源的可观性研究已取得许多成果^[1,2]:观测器必须具有机动性,观测器进行“之”字型飞行是一简捷、有效的方法,就测量方法而言,唯方位(Bearing-Only)测量法是最典型的测量分析方法,它是利用观测器在不同时刻对辐射源进行方位测量,而利用这些方位数据估计辐射源的运动轨迹(位置、速度)参数,此方法的基础是必须首先测得辐射源的发射频率和一系列方位数据。

对于辐射源发射频率、到达角及常规脉冲波形参量的估计已有许多成熟的方法,对于辐射源的参量估计 Zugmeyer 等人提出利用状态空间模型中空间频率和空间频率变化率来估计辐射源运动轨迹参数^[3],它将参数估计和辐射源的运动状态估计联系在一起,但是在该文中,参数估计只是对状态空间模型中空间频率和空间频率变化率进行估计,而无法对辐射源的发射频率进行估计,所以在对辐射源的运动状态进行估计时依然假定辐射源的发射频率为已知的,此外在该文中所描述的空间频率和空间频率变化率的估计方法只是针对单个辐射源的情况。

在实际运用中,测量范围内常常会存在多个辐射源,并且辐射源的个数、发射频率都是未知的,辐射源的个数和辐射源的发射频率的正确估计是处于运动中的每个辐射源空间频率、空间频率变化率和运动状态等参量估计的基础,因此本文提出利用运动的均匀线阵对二维平面上运动的多个辐射源的个数、发射频率和空间频率、空间频率变化率进行联合估计,从而得到对多个辐射源的运动状态进行多参量估计的基本原理和方法,本文提出的方法具有更为广泛的普遍性和实用性,计算机模拟结果证明了本文所述方法的正确性和有效性。

2 目标的运动模型

图 1 是典型的运动观测器与运动辐射源的几何位置关系图,利用文献 [1] 的表示方法,第 i 个辐射源位置坐标为 $(r_{i,xs}, r_{i,ys})$ 并以速度 $(v_{i,xs}, v_{i,ys})$ 作匀速运动,定义辐射源的状态矢量:

$$\mathbf{X}_{i,s} = [r_{i,xs}, r_{i,ys}, v_{i,xs}, v_{i,ys}]^T \quad (1)$$

定义观测器的状态矢量

$$\mathbf{X}_o = [r_{xo}, r_{yo}, v_{xo}, v_{yo}]^T \quad (2)$$

¹ 1999-04-20 收到, 2000-02-29 定稿

定义它们的相对状态矢量

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_{i,s} - \mathbf{X}_o = [r_{i,x}, r_{i,y}, v_{i,x}, v_{i,y}]^T \quad (3)$$

相对状态矢量的离散时间方程为

$$\mathbf{X}_i(t_k) = \Phi(t_k, t_{k-1})\mathbf{X}_i(t_{k-1}) + \mathbf{U}_i(t_k) \quad (4)$$

其中 $\Phi(t_k, t_{k-1}) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_d & (t_k - t_{k-1})\mathbf{I}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_d \end{pmatrix}$, $\mathbf{I}_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, t_k 为在某“leg”(观测器每一匀速运动路段为一“leg”)上对辐射源运动状态的第 k 次采样时刻, $\mathbf{U}_i(t_k) = [0 \ 0 \ u_x(t_k) \ u_y(t_k)]^T$ 是由观测器的机动产生的分量。假设观测器在每一“leg”上速度为常数, 则对于每一“leg”, 辐射源相对观测器的相对速度也是常数。设在每一“leg”上进行 N_i 次采样, 对应的采样时间为 τ_i 。

3 时空模型

假设辐射源作匀速直线运动并与阵列(即观察平台)相距较远。图2为运动辐射源相对阵列的几何关系图, 为分析方便, 可以认为阵列位于坐标原点。 $A_{i,k-1}$ 和 $A_{i,k}$ 分别为第 i 个辐射源在 t_{k-1} 和 t_k 时刻相对于阵列的位置。 v_i 为第 i 个辐射源相对阵列的速度, γ_i 为第 i 个辐射源运动方向与 y 轴之间的夹角, $\theta_{i,k}$ 和 $r_{i,k}$ 分别代表 t_k 时刻第 i 个辐射源的方向

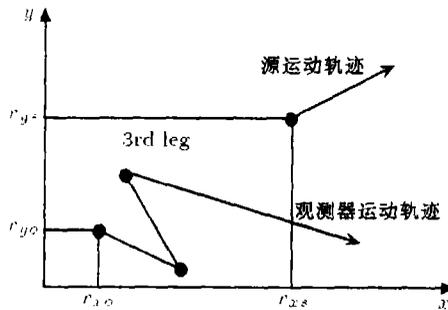


图1 图1 辐射源与观测器几何关系

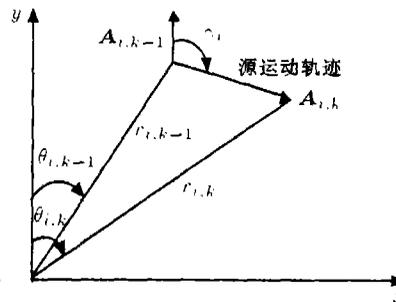


图2 辐射源与阵列相对位置示意图

位和与阵列的距离。由图2的几何关系可得

$$r_{i,k} \sin \theta_{i,k} = r_{i,k-1} \sin \theta_{i,k-1} + v_i \tau \sin \gamma_i \quad (5)$$

$$r_{i,k}^2 = r_{i,k-1}^2 + (v_i \tau)^2 + 2r_{i,k-1} v_i \tau \cos(\theta_{i,k-1} - \gamma_i) \quad (6)$$

式中 $\cos \gamma_i = v_{iy}/v_i$, $\sin \gamma_i = v_{ix}/v_i$, τ 是采样时间, 它对应一次快拍。对应每条“leg”

$$r_{i,k} \sin \theta_{i,k} = r_{i,0} \sin \theta_{i,0} + k v_i \tau \sin \gamma_i \quad (7)$$

$$r_{i,k}^2 = r_{i,0}^2 + (k v_i \tau)^2 + 2r_{i,0} k v_i \tau \cos(\theta_{i,0} - \gamma_i) \quad (8)$$

定义第 i 个辐射源在时刻 t_k 的空间频率

$$K_{i,k} = \sin \theta_{i,k} / \lambda_i \quad (9)$$

λ_i 为第 i 个辐射源的波长, 则由 (7), (8), (9) 式可得

$$K_{i,k} = \frac{r_{i,0} \sin \theta_{i,0} + kv_i \tau \sin \gamma_i}{\lambda_i [r_{i,0}^2 + (kv_i \tau)^2 + 2kv_i r_{i,0} \tau \cos(\gamma_i - \theta_{i,0})]^{1/2}}$$

设 $x_i = kv_i \tau / r_{i,0}$, 则

$$K_{i,k} = \frac{\sin \theta_{i,0} + x_i \sin \gamma_i}{\lambda_i [1 + 2x_i \cos(\theta_{i,0} - \gamma_i) + x_i^2]^{1/2}} \quad (10)$$

将 $K_{i,k}$ 展开成泰勒级数, 并取一阶近似得^[4] $K_{i,k} = K_{i,0} + k\dot{K}_i$. 其中

$$\dot{K}_i = [\sin \gamma_i - \sin \theta_{i,0} \cos(\theta_{i,0} - \gamma_i)]v_i \tau / (r_{i,0} \lambda_i) = \cos \theta_{i,0} \sin(\gamma_i - \theta_{i,0})v_i \tau / (r_{i,0} \lambda_i) \quad (11)$$

参考图 1 和图 2, 有 $\sin \gamma_i = v_{ix}/v_i$, $\cos \gamma_i = v_{iy}/v_i$, $\sin \theta_{i,0} = r_{i,x0}/r_{i,0}$, $\cos \theta_{i,0} = r_{i,y0}/r_{i,0}$.

由 (9) 和 (10) 式得

$$K_{i,0} = \sin(\tan^{-1}(r_{i,x0}/r_{i,y0}))/\lambda_i \quad (12)$$

$$\dot{K}_i = r_{i,y0}/(r_{i,0}^3 \lambda_i) [r_{i,y0} v_{ix} - r_{i,x0} v_{iy}] \tau \quad (13)$$

\dot{K}_i 为空间频率 K_i 的一阶导数, 即空间频率变化率, 它能独立于空间频率 K_i 被估计出来, 它在后面的 TMA 算法中起到非常重要的作用. 设参考时间为 t_m , 假定第 i 辐射源的速度 $v_{i,rs}$, $v_{i,ys}$ 是常数, 阵列的速度 v_{xo} , v_{yo} 为已知, 则有

$$\left. \begin{aligned} r_{i,x}(t_j) &= r_{i,x}(t_m) + (t_j - t_m)v_{i,x}(t_m) \\ r_{i,y}(t_j) &= r_{i,y}(t_m) + (t_j - t_m)v_{i,y}(t_m) \\ v_{i,x}(t_j) &= v_{i,x}(t_m) + (v_{xo}(t_j) - v_{xo}(t_m)) = v_{i,x}(t_m) + a_x(t_m) \\ v_{i,y}(t_j) &= v_{i,y}(t_m) + (v_{yo}(t_j) - v_{yo}(t_m)) = v_{i,y}(t_m) + a_y(t_m) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 $v_{i,x}(t_m) = v_{i,rs}(t_m) - v_{xo}(t_m)$, $v_{i,y}(t_m) = v_{i,ys}(t_m) - v_{yo}(t_m)$, a_x 和 a_y 仅仅由观测器的机动性决定. 利用 (13)、(14) 式得 t_j 时刻的空间频率变化率 $\dot{K}_i(t_j)$ 为

$$\dot{K}_i(t_j) = r_{i,y}(t_j)/(r_{i,j} \lambda_i) [r_{i,y}(t_j)v_{i,x}(t_j) - r_{i,x}(t_j)v_{i,y}(t_j)] \tau \quad (15)$$

其中 $r_{i,j} = [r_{i,x}^2(t_j) + r_{i,y}^2(t_j)]^{1/2}$. 在参考时刻 t_m , 第 i 个辐射源的运动状态矢量为

$$\mathbf{X}_{i,m} = [r_{i,x}(t_m), r_{i,y}(t_m), v_{i,x}(t_m), v_{i,y}(t_m)]^T \quad (16)$$

则 $\dot{K}_i(t_j) = \dot{K}_{i,j}$ 对 t_m 时刻的辐射源运动状态矢量 (16) 式中各分量的偏导为^[3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{K}_{i,j}}{\partial r_{i,x}(t_m)} &= -\frac{\tau \cos \theta_{i,j}}{r_{i,j}^2 \lambda_i} [v_{i,y}(t_j)(1 - 3 \sin^2 \theta_{i,j} + v_{i,x}(t_j)(3 \sin \theta_{i,j} \cos \theta_{i,j}))] \\ \frac{\partial \dot{K}_{i,j}}{\partial r_{i,y}(t_m)} &= \frac{-\tau}{r_{i,j}^2 \lambda_i} [v_{i,x}(t_j) \cos \theta_{i,j}(1 - 3 \sin^2 \theta_{i,j} + v_{i,y}(t_j) \sin \theta_{i,j}(1 - 3 \cos^2 \theta_{i,j}))] \\ \frac{\partial \dot{K}_{i,j}}{\partial v_{i,x}(t_m)} &= \frac{\tau \cos \theta_{i,j}}{r_{i,j} \lambda_i} - (t_j - t_m) \frac{\tau \cos \theta_{i,j}}{r_{i,j}^2 \lambda_i} [v_{i,y}(t_j)(1 - 3 \sin^2 \theta_{i,j} \\ &\quad + v_{i,x}(t_j)(3 \sin \theta_{i,j} \cos \theta_{i,j}))] \\ \frac{\partial \dot{K}_{i,j}}{\partial v_{i,y}(t_m)} &= -\frac{\tau \sin \theta_{i,j} \cos \theta_{i,j}}{r_{i,j} \lambda_i} - \frac{\tau(t_j - t_m)}{r_{i,j}^2 \lambda_i} [v_{i,x}(t_j) \cos \theta_{i,j}(1 - 3 \sin^2 \theta_{i,j} \\ &\quad + v_{i,y}(t_j) \sin \theta_{i,j}(1 - \cos^2 \theta_{i,j}))] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中 $\cos \theta_{i,j} = r_{i,y}(t_j)/r_{i,j}$, $\sin \theta_{i,j} = r_{i,x}(t_j)/r_{i,j}$ 。在后面对辐射源目标轨迹估计时 (17) 式将发挥很大的作用。

4 辐射源个数、发射频率和时空模型参数的联合估计

假设辐射源 i 为发射频率 f_i 的窄带信号, $i = 1, 2, \dots, M$ 。阵列的采样频率为 f_s 。对于远程目标, 在一个较短时段 T 内, 可以认为目标不动, 空间频率不变。设定阵列的快拍时间为 τ , 在一个 T 内, 设可以得到 N 批快拍数据。设均匀线阵的阵元数为 $L (L \geq M)$, 阵元间距为 d , 阵列的法线方向与 x 轴的夹角为 α_1 , 第 i 个辐射源在某一 “leg” 上第 n 个采样时刻时与 x 轴的夹角为 $\alpha_{i,2}$, 第 i 个辐射源的信号来波与 y 轴的夹角为 $\theta_{i,n}$, 如图 3。定义空间相位因子

$$q_i = e^{j(2\pi d/\lambda_i) \sin \alpha_i} = e^{j(2\pi d/\lambda_i) \cos(\theta_{i,n} + \alpha_1)} \quad (18)$$

α_i 为第 i 个辐射源的信号来波与阵列法线的夹角。在 t_n 时刻, 阵列的入射信号为

$$s_i(t_n) = E e^{j(\omega_i t_n + \Psi_i)}, \quad i = 1, \dots, M \quad (19)$$

ω_i 为第 i 个辐射源的发射频率, Ψ_i 为第一个阵元在 $t_n = 0$ 时刻接收到第 i 个辐射源入射信号的相位。第 k 个阵元的接收信号为 $x_k(t_n)$:

$$x_k(t_n) = \sum_{i=1}^M s_i(t_n) q_i^{k-1} + n_k(t_n) \quad (20)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, L$, q_i 由 (18) 式给出。设 $\mathbf{X}(t_n)$, $\mathbf{S}(t_n)$, $\mathbf{n}(t_n)$ 分别代表阵列的接收信号矢量、入射信号矢量和噪声矢量 (它是一零均值、方差为 σ^2 的复值高斯白噪声过程)

$$\mathbf{X}(t_n) = \mathbf{A} \mathbf{S}(t_n) + \mathbf{n}_x(t_n) \quad (21)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_M] \quad (22)$$

$$\mathbf{a}_i = [1, q_i^1, q_i^2, \dots, q_i^{L-1}]^T \quad (23)$$

$\mathbf{X}(t_n)$ 为 $L \times 1$ 阶矩阵, \mathbf{A} 为 $L \times M$ 阶矩阵, $\mathbf{S}(t_n)$ 为 $M \times 1$ 阶矩阵。对应每一个 t_k , 在时段 T 内, 有 N_2 个快拍 t_{kn} , $n = 1, 2, \dots, N_2$ 。为书写方便, 对固定的 k 将 t_{kn} 简化为 t_n 。

利用 MDL 算法对辐射源的个数进行估计 [5], 再利用 ESPRIT 算法对各辐射源的发射频率 f_i 和空间相位因子 q_i 进行联合估计并配对 [6]。利用 (9) 和 (18) 式就可得到 K_i , $i = 1, \dots, N_1$, N_1 为每一 “leg” 上对目标采样的批数, 而每批数据由 N_2 快拍数据构成。由前面的运动模型可知, 由于是对应远程目标, 每一 “leg” 上, K 为匀速变化, 每一 “leg” 的 \hat{K} 可以从同一 “leg” 不同时刻的 K 值得到。

5 运动辐射源的轨迹估计和跟踪

对辐射源的轨迹估计就是利用空间频率 $\hat{K}_i = [\hat{K}_i(1), \hat{K}_i(2), \dots, \hat{K}_i(N_1)]$ 和空间频率变化率 $\hat{K}_i = [\hat{K}_{i,1}, \hat{K}_{i,2}, \dots, \hat{K}_{i,D}] (i = 1, 2, \dots, M, D \text{ 为 leg 的数目})$, 对辐射源进行运动参数

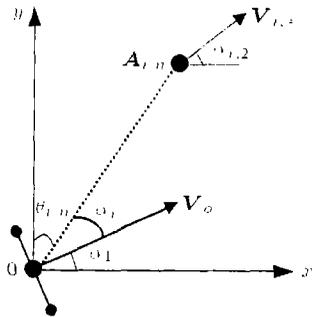


图 3 辐射源与阵列

的估计。设 $\hat{\mathbf{N}}_i = \begin{pmatrix} \hat{K}_i \\ \dot{\hat{K}}_i \end{pmatrix}$, 则它的最大似然函数为

$$P(\mathbf{N}_i/\mathbf{X}_i) = \text{const} \times \exp \left[-\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{N}}_i - \mathbf{N}_i)^T \mathbf{W}^{-1}(\hat{\mathbf{N}}_i - \mathbf{N}_i) \right] \quad (24)$$

辐射源 i 在时刻 t_m 的状态矢量为 $\mathbf{X}_{i,m} = [r_{i,x}(t_m), r_{i,y}(t_m), v_{i,x}(t_m), v_{i,y}(t_m)]^T$, 则

$$\frac{\partial \mathbf{K}_i}{\partial \mathbf{X}_{i,m}} = \begin{pmatrix} \frac{\cos^2 \theta_{i,1}}{\lambda_i r_{i,1}} & \frac{-\sin \theta_{i,1} \cos \theta_{i,1}}{\lambda_i r_{i,1}} & (t_1 - t_m) \frac{\cos^2 \theta_{i,1}}{\lambda_i r_{i,1}} & -(t_1 - t_m) \frac{-\sin \theta_{i,1} \cos \theta_{i,1}}{\lambda_i r_{i,1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\cos^2 \theta_{i,N_1}}{\lambda_i r_{i,N_1}} & \frac{-\sin \theta_{i,N_1} \cos \theta_{i,N_1}}{\lambda_i r_{i,N_1}} & (t_{N_1} - t_m) \frac{\cos^2 \theta_{i,N_1}}{\lambda_i r_{i,N_1}} & -(t_{N_1} - t_m) \frac{-\sin \theta_{i,N_1} \cos \theta_{i,N_1}}{\lambda_i r_{i,N_1}} \end{pmatrix}^T \quad (25)$$

利用 (17 式) 和 \hat{K}_i 的估计值可以得到 $\partial \mathbf{K}_i / \partial \mathbf{X}_{i,m}$, 进而得到 $\partial \mathbf{N}_i / \partial \mathbf{X}_{i,m}$. 利用 Gauss-Newton 迭代算法可得

$$\mathbf{X}_{i,l+1} = \mathbf{X}_{i,l} + \mu_i \left[\left(\frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{X}_{i,m}} \right) \mathbf{W}_i^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{X}_{i,m}} \right)^T \right]^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{X}_{i,m}} \right) \mathbf{W}_i^{-1} (\hat{\mathbf{N}}_i - \mathbf{N}_i) \quad (26)$$

μ_i 为能满足收敛的迭代步长^[7]. \hat{K} 和 $\dot{\hat{K}}$ 假定为相互独立 (它们利用不同的数据进行估计), 则 $\mathbf{W}_i \approx \begin{pmatrix} \sigma_{\hat{K}_i}^2 \mathbf{I}_{N_1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_{\dot{\hat{K}}_i}^2 \mathbf{I}_D \end{pmatrix}$. 在后面的计算机模拟中, 利用伪线性算法^[1] 估计 Gauss-Newton 迭代算法的初值, 后面计算机模拟时 $\sigma_{\hat{K}_i}^2, \sigma_{\dot{\hat{K}}_i}^2$ 由 2000 次 Monte Carlo 实验的统计值得到.

前面已假定辐射源作匀速直线运动, 只要估计出参考时刻 t_m 辐射源的位置和速度, 就可预测辐射源以后时刻的位置, 达到对辐射源跟踪的目的.

6 算法小结

归纳起来, 利用空间频率 K 和空间频率变化率 \dot{K} 对辐射源轨迹估计可分为以下几步:

(1) 用阵列输出矢量 $\mathbf{X}(t_n)$ 构成新矢量 $\mathbf{Z}(t_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t_n) \\ \mathbf{X}(t_n + 1) \end{bmatrix} = \overline{\mathbf{A}}\mathbf{s}(t_n) + \overline{\mathbf{n}}(t_n)$, 估计协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{Z}(t_n) \mathbf{Z}^H(t_n)$. 对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解, 利用其特征值, 按 MDL 准则估计辐射源的个数 \hat{M} ^[5].

(2) 利用 ESPRIT 算法估计辐射源频率 f_i 、空间相位因子 $q_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 并配对, 再估计该辐射源的空间频率 \hat{K}_i 和空间频率变化率 $\dot{\hat{K}}_i (i = 1, 2, \dots, M)$.

(3) 利用 (17) 和 (25) 式计算 $\partial \mathbf{K}_i / \partial \mathbf{X}_{i,m}$ 和 $\partial \dot{\mathbf{K}}_i / \partial \mathbf{X}_{i,m}$, 并构成 $\partial \mathbf{N}_i / \partial \mathbf{X}_{i,m}$. 利用伪线性算法^[1] 估计 Gauss-Newton 迭代算法的初值, 用 (26) 式进行 Gauss-Newton 迭代可得辐射源的轨迹估计.

7 计算机模拟

参考图 3, 利用一个阵元数为 16 的线阵, 阵元之间的间距 $d = 0.5m$, 信噪比为 10dB, 辐射源 1 的发射频率为 $f_1 = 300\text{MHz}$, 它与 X 轴的夹角为 $\alpha_{1,2}$, 辐射源 2 的发射频率为

$f_2 = 200\text{MHz}$, 它与 x 轴的夹角为 $\alpha_{2,2}$, 观测器与 x 轴的夹角为 α_1 . 初始条件见表 1. 观测器位于坐标原点, 它的速度 $v_o = 0.1\text{km/s}$, 它与 x 轴的夹角 $\alpha_1 = 10^\circ$; 辐射源的状态矢量 $\mathbf{X}_{i,s} = [r_{i,xs}, r_{i,ys}, v_i]$ 分别为 $\mathbf{X}_{1,s} = [50\text{km}, 60\text{km}, 0.3\text{km/s}]$ 和 $\mathbf{X}_{2,s} = [30\text{km}, 18\text{km}, 0.25\text{km/s}]$; 它们与 x 轴的夹角分别为 $\alpha_{1,2} = 60^\circ, \alpha_{2,2} = 30^\circ$. 每条“leg”长为 3km , 设每一“leg”上进行 N_1 次采样, 对应的采样时间为 $\tau_1 (N_1 = 30, \tau_1 = 2\text{s})$, 阵列的采样频率 $f_s = 3f_1, \tau = 1/f_s$, 有 $N_2 = 100$ 次快拍. 定义参考时刻 $t_m = (3N_1 + 1)\tau_1 = 182\text{s}$. 如无任何测量、估计误差, 辐射源 1 和 2 在参考时刻 t_m 时运动状态 $\mathbf{X}_{i,s}(t_m) = [r_{i,xs}(t_m), r_{i,ys}(t_m), v_{i,xs}(t_m), v_{i,ys}(t_m)]$ 应为 $\mathbf{X}_{1,s}(t_m) = [77.30\text{km}, 107.28\text{km}, 0.15\text{km/s}, 0.26\text{km/s}]$, $\mathbf{X}_{2,s}(t_m) = [69.40\text{km}, 40.75\text{km}, 0.22\text{km/s}, 0.23\text{km/s}]$. 表 2 中辐射源位置和速度的单位与此相同, 频率的单位为兆赫.

表 1 初始条件

观测器初始置	奇数“leg”速度	偶数“leg”速度
$r_{xo} = 0$	$v_{xo} = v_o \cos \alpha_1$	$v_{xo} = -v_o \sin \alpha_1$
$r_{yo} = 0$	$v_{yo} = v_o \sin \alpha_1$	$v_{yo} = -v_o \cos \alpha_1$

利用本文所描述的方法对目标进行参数估计和航迹估计, 进行 500 次 Monte-Carlo 实验, 利用不同方法得到 $\hat{\mathbf{X}}_{i,s}(t_m), (i = 1, 2)$ 见表 2.

表 2 辐射源的发射频率和航迹参数估计

辐射源 1						辐射源 2					
Bearing-Only TMA						Bearing-Only TMA					
	r_{xs}	r_{ys}	v_{xs}	v_{ys}	f_1		r_{xs}	r_{ys}	v_{xs}	v_{ys}	f_2
均值	71.92	100.91	0.14	0.25	300.11	均值	62.17	37.91	0.20	0.12	200.05
标准差	3.52	4.63	0.021	0.028	0.09	标准差	3.23	2.35	0.015	0.012	0.09
Bearing+3 \hat{K} /leg TMA						Bearing+3 \hat{K} /leg TMA					
	r_{xs}	r_{ys}	v_{xs}	v_{ys}			r_{xs}	r_{ys}	v_{xs}	v_{ys}	
均值	75.82	104.27	0.15	0.25		均值	68.10	39.27	0.21	0.13	
标准差	1.92	2.39	0.017	0.014		标准差	1.33	0.97	0.010	0.007	

注: (1) Bearing-Only TMA 是利用与 3 段“leg”上 \hat{k} 和 \hat{k} 值相对应的方位估计值进行目标航迹估计

(2) $3\hat{k} + 3\hat{K}$ “leg”TMA 是利用 3 段“leg”上 \hat{K} 的值和 3 段“leg”的 \hat{k} 的值, 联合估计目标的航迹

两种方法的设置主要是为了说明空间频率 K 和空间频率变化率 \hat{K} 在辐射源航迹估计中的作用. 由计算机模拟结果可以得出, 空间频率 K 和空间频率变化率 \hat{K} 的引入, 使辐射源航迹估计的精度得到了提高. 在本文计算机模拟条件的设置中, 随着参考时间 t_m 的增大, 辐射源与阵列相距越远, 这对辐射源航迹估计是不利的, 但模拟结果显示, 在这种不利条件下, 利用空间频率 K 和空间频率变化率 \hat{K} 进行辐射源航迹估计的精度仍然较高. 显然, 如随参考时间 t_m 增大, 辐射源与阵列相距越近时, 辐射源航迹估计的精度将进一步得到提高. 同时随着快拍次数 N_2 的增大, 辐射源航迹估计的精度也将得到提高.

7 总 结

由于状态空间模型将辐射源参数估计和辐射源的运动状态分析有机地联系在一起. 从上面的计算机模拟可以看出, 时空参数的引入, 使得对运动辐射源的运动状态估计的精度得到提高. 利用 MDL 和 ESPRIT 算法能非常有效的对测量区域中, 辐射源的个数、辐射源发射频率和时空参数 \hat{K} 、 K 进行联合估计, 最终得到较好性能的 TMA. 本文提出的方法能方便、有效地推广到三维立体空间中的辐射源运动状态的估计. 这也进一步说明本文提出的方法具有更为广泛的普遍性和适用性.

参 考 文 献

- [1] S. C. Nardone, A. G. Lindgren, K. G. Gong, Fundamental properties and performance of conventional Bearing-Only target motion analysis, *IEEE Trans. on Automat. Cont.*, 1984, AC-29(9), 775-787.
- [2] S. C. Nardone, V. J. Aidala, Observability criteria for Bearing-Only target motion analysis, *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1981, AES-17(3), 162-166.
- [3] O. Zugmeyer, J. P. Le Cadre, A new approach to the estimation of source motion parameters, Part I, *Signal Processing*, 1993, SP-33(3), 287-314.
- [4] J. P. Le Cadre, Properties and performance of extended target motion analysis, *IEEE Trans. on Aerosp. and Electron. Syst.*, 1996, AES-32(1), 66-82.
- [5] M. Wax, T. Kailath, Detection of signals by information theoretic criteria, *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, ASSP-33(4), 387-392.
- [6] R. Roy, T. Kailath, ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1989, ASSP-37(7), 984-995.
- [7] N. G. Chernoguz, A smoothed Newton-Gauss method with application to Bearing-Only position location, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, SP-43(8), 2011-2013.

ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS OF MULTIPLE
RADIATING SOURCES BASED ON STATE-SPACE MODEL

Li Liping Chen Tianqi

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract The passive location is a key in many applications. It is a difficult question to estimate trajectories of multiple moving sources with single moving station. This paper deals with the estimation of motion parameters of multiple sources in the passive array processing. It uses basically state-space model of the spatial-temporal data. The interpolation signal procedures play a fundamental role and link the spatial and temporal analysis. Using uniformity linear array and MDL and ESPRIT algorithms, the numbers, center frequencies of sources, spatial frequency and spatial frequency change speed can be estimated together. Further the trajectories (i.e., position and velocity) of every source can be estimated.

Key words Array signal processing, State-space model, Spatio-temporal signal analysis, Parameters estimation

李立萍: 女, 1963年生, 博士, 目前研究兴趣为阵列信号处理, 无源定位。

陈天麒: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 长期从事阵列信号处理、信号多参量估计和跟踪、高阶谱估计以及电子战系统等方面的研究工作, 发表学术论文 80 余篇。