

引入测频信息进行无源被动定位的方法研究*

许耀伟 周一宇 孙仲康

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 无源被动定位技术中一个重要问题,是如何使定位的约束条件尽可能地少,即尽可能地提高方法的可操作性。只利用测角信息(DOA)的定位方法,由于可观测性的要求,在单观测平台对运动目标定位时,常常需要观测平台作特殊的机动运动,这种约束给实际操作带来很大不便。本文提出了一种引入测频信息对运动目标进行定位的定位方法,并给出了可观测性分析。运用该法定位,观测平台的运动形式可以任意,特别有意义的是,在满足某些条件情况下观测平台还可以完全静止不动。

关键词 被动定位, DOA, 频率, 可观测性, 伪线性滤波

分类号 TN959.1

Passive Location and Observability Analysis to Moving Target with Frequency Measurements

Xu Yaowei Zhou Yiyu Sun Zhongkang

(Department of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract How to make the method to come true conveniently is very important in passive location. A new method of passive location to moving target is presented in this paper, which makes use of both DOA information and frequency information obtained from electromagnetic radiation. the observability analysis is given too. Using this method, the special maneuver of observer is no longer necessary, which is necessary for traditional measurements such as DOA only.

Key words passive location, DOA, frequency, observability, pseudo-linear filter

1 基本原理

仅利用 DOA 信息也可以实现对运动目标的无源被动定位,这是被许多已有的研究证明了的^{[1][2]}。但这些研究同时也显示,这一定位模式不很理想。其苛刻的可观测条件使该定位方法的应用场合受到了很大的限制。引入测频信息后这一可观测性约束可以取消。

对运动目标定位的关键在于对其运动速度的确定。测频信息中包含有关于目标与观测平台间相对运动的多普勒信息,因此引入测频信息可以确定目标的运动速度。这样,再结合测得的 DOA 信息,对运动目标的定位就比较容易实现了。

多普勒测速的基本公式是

$$f_i = f_r + \frac{f_r}{c} v_{or_i} \quad (1)$$

其中 f_r 为运动辐射源的辐射波频率, f_i 为观测平台某时刻测得的辐射波频率, v_{or_i} 为运动观测平台和运动辐射源间的径向相对运动速度 ($v_{or_i} = \dot{r}_i$), 如图 1 所示。

容易看出,在这里

$$v_{or_i} = (\mathbf{V}_{O_i} - \mathbf{V}_{T_i}) \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \quad (2)$$

其中

* 1997年1月7日收稿
第一作者:许耀伟,男,1965年生,博士生

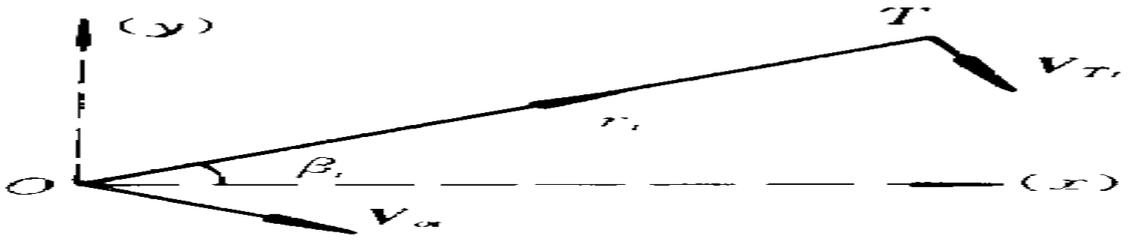


图 1

$$\mathbf{r}_i = (x_{T_i} - x_{O_i})\mathbf{i} + (y_{T_i} - y_{O_i})\mathbf{j} \quad (3)$$

x_{T_i} 、 y_{T_i} 、 x_{O_i} 、 y_{O_i} 分别为时刻 i 运动辐射源和运动观测平台的位置坐标。

记 $x_i = x_{T_i} - x_{O_i}$ ， $y_i = y_{T_i} - y_{O_i}$ ，则 (3) 式可简化为

$$\mathbf{r}_i = x_i\mathbf{i} + y_i\mathbf{j} \quad (4)$$

很显然

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{O_i} - \mathbf{V}_{T_i} &= (\dot{x}_{O_i}\mathbf{i} + \dot{y}_{O_i}\mathbf{j}) - (\dot{x}_{T_i}\mathbf{i} + \dot{y}_{T_i}\mathbf{j}) \\ &= -\dot{x}_i\mathbf{i} - \dot{y}_i\mathbf{j} = -\dot{\mathbf{r}}_i \end{aligned} \quad (5)$$

于是，(2) 式可转化为

$$v_{OT_i} = -\dot{x}_i \cos\beta_i - \dot{y}_i \sin\beta_i \quad (6)$$

将 (6) 式入 (1) 式，可以得出

$$\dot{x}_i \cos\beta_i + \dot{y}_i \sin\beta_i + cf_i f_T^{-1} = c \quad (7)$$

这就是在已知 β 、 f_i 条件下的速度测量方程。

已知 β 时的位置测量方程，可以由简单的几何知识得到，即

$$\beta_i = \text{tg}^{-1} \frac{y_i}{x_i}$$

也就是

$$x_i \sin\beta - y_i \cos\beta = 0 \quad (8)$$

取状态矢量 $X_i = [x_i \ y_i \ \dot{x}_i \ \dot{y}_i \ f_i^{-1}]^T$ ，则 (7)、(8) 式可整理为矩阵方程

$$Z_i = H_i X_i \quad (9)$$

其中

$$Z_i = [0 \ c]$$

$$H_i = \begin{bmatrix} \sin\beta & -\cos\beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\beta & \sin\beta & cf_i \end{bmatrix}$$

假设辐射源作匀速直线运动，则状态方程为

$$X_i = \Phi(t_i, t_0) X_0 - U_i \quad (10)$$

其中 $\Phi(t_i, t_0) = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & (t_i - t_0)I_{2 \times 2} & O_{2 \times 1} \\ O_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & O_{2 \times 1} \\ O_{1 \times 2} & O_{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix}$ ， $I_{2 \times 2}$ 是 2×2 的单位矩阵， $O_{2 \times 2}$ 、 $O_{2 \times 1}$ 和 $O_{1 \times 2}$ 分别是 2×2 、 2×1 和 1×2 的零矩阵， X_0 是初态，即 $t = t_0$ 时刻的状态量； $U_i = [u_i^{(1)} \ u_i^{(2)} \ u_i^{(3)} \ u_i^{(4)} \ 0]^T$ 表示运动观测平台的运动机动量。

如果系统 (9)、(10) 是可观测的，则获得三次以上的测量量后，可根据 (9)、(10) 式得到运动辐射源的位置。

2 可观测性分析

在进行可观测性分析之前，先引入如下可观测性判定准则^[1]：

【准则】系统

$$\begin{cases} X(t) = \Phi(t, t_0) X(t_0) + U(t) \\ Z(t) = H(t) X(t) \end{cases} \quad ()$$

在 $[t_0, t_1]$ 上可观测的充要条件是：对于任何非零常数矢量 Ξ ，总存在 $t \in [t_0, t_1]$ 满足

$$H(t) \Phi(t, t_0) \Xi \neq 0 \quad ()$$

上述充要条件等价于：

$$\{ \forall t \in [t_0, t_1], H(t) \Phi(t, t_0) \Xi = 0 \} \Rightarrow \{ \Xi = 0 \} \quad ()$$

现在运用 () 对系统 (9)、(10) 的可观测性进行分析。

取一个常数矢量 $\Xi = [\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5]^T$ ，令其满足

$$H_i \Phi(t_i, t_0) \Xi = 0 \quad (11)$$

如果方程 (11) 有唯一零解，则系统 (9)、(10) 是可观测的，否则系统 (9)、(10) 是不可观测的。将 H_i 、 $\Phi(t_i, t_0)$ 和 Ξ 代入 (11) 式可以得出等价的线性方程组：

$$[\xi_1 + (t_i - t_0)\xi_3] \sin\beta_i - [\xi_2 + (t_i - t_0)\xi_4] \cos\beta = 0 \quad (12a)$$

$$\xi_3 \cos\beta + \xi_4 \sin\beta + cf_i \xi_5 = 0 \quad (12b)$$

这样，系统 (9)、(10) 的可观测性判定就转化为线性方程组 (12a)、(12b) 是否有唯一零解的判定。

由 (7)、(8) 式可以看出， β_i 只与几何位置（观测平台和运动辐射源之间的几何关系）有关，而 f_i 除与几何位置有关外，还与观测平台和运动辐射源的运动速度有关。故 cf_i 不可能成为 $\cos\beta$ 和 $\sin\beta$ 的线性组合。因此由 (12b) 可以得出

$$\xi_5 = 0 \quad (13)$$

和

$$\xi_3 \cos\beta + \xi_4 \sin\beta = 0 \quad (14)$$

又由于函数 $\sin(\cdot)$ 和 $\cos(\cdot)$ 是线性无关的，因而得出

$$\xi_3 = \xi_4 = 0 \quad (15)$$

再将 (13)、(15) 代入 (12a) 式，得

$$\xi_1 \sin\beta_i - \xi_2 \cos\beta = 0 \quad (16)$$

基于同样的分析，由 (16) 得出

$$\xi_1 = \xi_2 = 0 \quad (17)$$

以上分析的前提是 β_i 不能为常数，但与 U_i 的取值无关。因此根据分析所得结果，由 () 可以得出如下结论：观测平台和运动辐射源不在同一条直线上运动时，系统 (9)、(10) 是可观测的，而无论观测平台采取何种机动形式或是否有机动，甚至观测平台还可以静止不动。

3 定位算法

将测量方程 (9) 伪线性化，得

$$Z_i = H_{mi} X_i + v_i \quad (18)$$

其中 H_{mi} 和 v_i 分别为含有噪声的测量矩阵和等效的测量误差，即

$$H_{mi} = \begin{bmatrix} \sin\beta_{mi} & -\cos\beta_{mi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\beta_{mi} & \sin\beta_{mi} & cf_{mi} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$v_i = [r_{mi} v_{\beta} \quad cf_{mi}^{-1} v_{f_i}] \quad (20)$$

这里， β_{mi} 和 f_{mi} 分别为含有噪声的角度测量量和频率测量量， v_{β} 、 v_{f_i} 分别为 β_i 和 f_i 的测量误差， $r_{mi} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 。

为便于滤波处理，现在将状态方程 (10) 形式稍作改变。容易看出，状态方程 (10) 等价于

$$X_i = \Phi(i, i-1) X_{i-1} + U_i \quad (21)$$

其中

$$\Phi(i, i-1) = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & (t_i - t_{i-1})I_{2 \times 2} & O_{2 \times 1} \\ O_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & O_{2 \times 1} \\ O_{1 \times 2} & O_{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

根据方程 (18)、(21)，我们可以得出如下伪线性滤波 (PLE) 算法。

$$\hat{X}_{i|i-1} = \Phi(i, i-1)\hat{X}_{i-1} + U_i \quad (23a)$$

$$P_{i|i-1} = \Phi(i, i-1)P_{i-1}\Phi^T(i, i-1) \quad (23b)$$

$$K_i = P_{i|i-1}H_{mi}^T[H_{mi}P_{i|i-1}H_{mi} + R_i]^{-1} \quad (23c)$$

$$\hat{X}_i = \hat{X}_{i|i-1} + K_i[Z_i - H_{mi}\hat{X}_{i|i-1}] \quad (23d)$$

$$P_i = (I - K_iH_{mi})P_{i|i-1}(I - K_iH_{mi})^T + K_iR_iK_i^T \quad (23e)$$

其中

$$R_i = E[\mathbf{v}_i\mathbf{v}_i^T] = \begin{bmatrix} E[r_{mi}^2\mathbf{v}_{\beta}^2] & 0 \\ 0 & E[c^2f_T^{-2}\mathbf{v}_{fi}^2] \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \hat{r}_{i|i-1}^2\sigma_{\beta}^2 & 0 \\ 0 & c^2\hat{f}_T^{-2}\sigma_f^2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{r}_{i|i-1}^2 = \hat{x}_{i|i-1}^2 + \hat{y}_{i|i-1}^2$$

这里假设 \mathbf{v}_{β} 、 \mathbf{v}_{fi} 为互不相关的高斯白噪声，且 $E[\mathbf{v}_{\beta i}] = E[\mathbf{v}_{fi}] = 0$ ， $E[\mathbf{v}_{\beta}^2] = \sigma_{\beta}^2$ ， $E[\mathbf{v}_{fi}^2] = \sigma_f^2$ 。

根据 (23a) ~ (23b)，就可以得出任一时刻的状态估计值：

$$\hat{X}_i = [\hat{x}_i \quad \hat{y}_i \quad \hat{\dot{x}}_i \quad \hat{\dot{y}}_i \quad \hat{f}_T^{-1}]^T$$

从而得出任一时刻辐射源的位置估计和速度估计：

$$\begin{aligned} \hat{x}_{Ti} &= \hat{x}_i + \hat{\dot{x}}_i, \hat{y}_{Ti} = \hat{y}_i + \hat{\dot{y}}_i \\ \hat{\dot{x}}_{Ti} &= \hat{\dot{x}}_i, \hat{\dot{y}}_{Ti} = \hat{\dot{y}}_i \end{aligned}$$

4 仿真验证

为方便起见，将观测平台和运动辐射源作图 2 所示安排。很显然，这样做并不失问题的一般性。

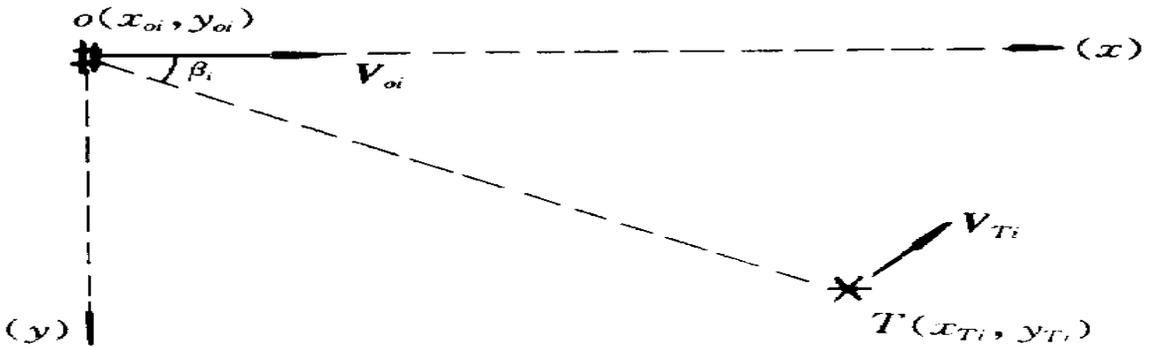


图 2

在图 2 中， T 表示辐射源在时刻的位置， O 表示观测平台在时刻 i 的位置， V_{oi} 和 V_{Ti} 分别表示观测平台和辐射源在时刻 i 的速度。

有关参数设定为： $f_T = 3\text{GHZ}$ ， $V_{oi} = 250\text{m/s}$ ，初始航路捷径为 50km ， $\sigma_{\beta} = 0.02^{\circ}$ 。

仿真结果如图 3 所示 (20 次 Monte-Carlo 实验)，图中的误差函数取为：

$$D = \sqrt{(x_{Ti} - \hat{x}_{Ti})^2 + (y_{Ti} - \hat{y}_{Ti})^2}, D_v = \sqrt{(\dot{x}_{Ti} - \hat{\dot{x}}_{Ti})^2 + (\dot{y}_{Ti} - \hat{\dot{y}}_{Ti})^2}$$

由图 3 可以看出，运用该算法，在这种轨迹安排下在一定的误差范围内可以实现对运动辐射源的定位和跟踪。而根据以往的研究，只用测角信息的定位方法在这种轨迹安排下是不能对运动辐射源定位的^[1]。

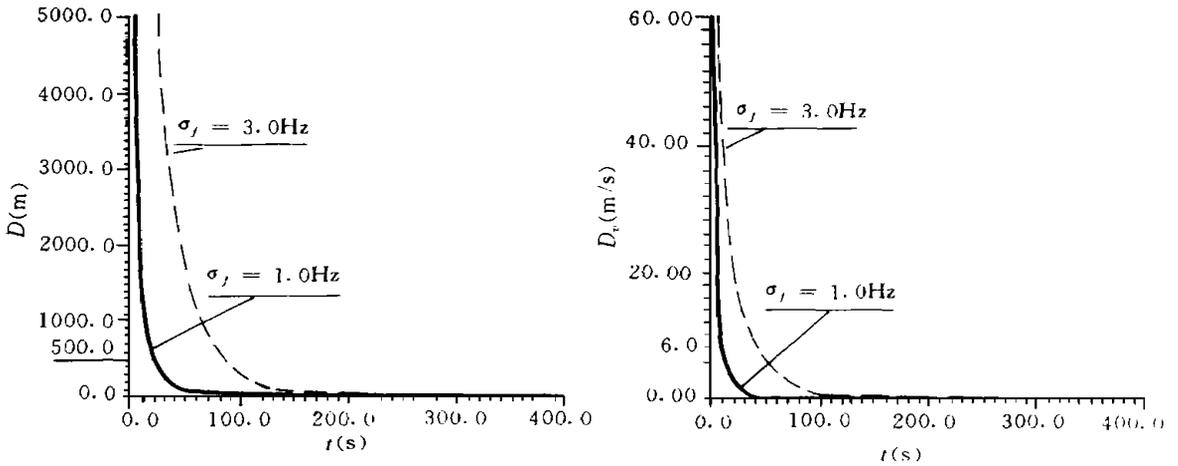


图 3

5 结束语

作者还在其它情况下对该定位方法进行了仿真, 结果表明, 该定位法在观测平台作任意加速度的直线运动、曲线运动及观测平台静止不动等情况下, 均可以实现对运动辐射源的定位。

与只利用测角信息的定位方式相比, 该定位法不要求观测平台做特殊的机动运动, 可操作性大大增强, 这就为该项技术的实际应用带来了方便。

参考文献

- 1 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术. 北京: 国防工业出版社. 1996. 5
- 2 许耀伟. 机载预警机对地(海)面干扰辐射源的无源被动定位: [硕士论文], 1995. 1
- 3 Claude Jauffret, Denis Pillon. Observability in Passive Target Motion Analysis, IEEE. 1996. 10
- 4 周一宇, 许耀伟. 单平台无源定位技术, 中国电子学会电子对抗分会与电子对抗国防科技重点实验室联合学术年会论文. 1997