

基于信息融合技术的单站无源定位原理分析与研究*

乔 梁

(广东金融学院 计算机系, 广东 广州 510520)

摘 要: 探讨了基于辐射源的信号到达时间(TOA)、到达方向(DOA)及多普勒频率信息,利用单站对机动目标进行无源定位与跟踪的新方法。将融合技术应用于单站无源定位,能更好地解决多参数测量集条件下的单站无源定位跟踪问题,滤波性能更好。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 信息融合 方位角 到达时间

Analysis and reserch of single observer passive location based on information fusion

QIAO Liang

(Guangdong finance university computer department, Guangzhou 510520, China)

Abstract: An algorithm for the moving emitter passive location based on TOA, DOA and Doppler frequency measurements by a single station is given. Fusion technology is applied in passive locating by single station. This method solves the problem of single observer passive location in case of many parameter measurements sets better. With the help of computer simulation, the method is proven to be correct and effective.

Key words: passive location; information fusion; azimuth angle; time of arrival

单站无源定位技术因为具有隐蔽性和高度的独立性等特点而受到重视,并广泛应用于现代电子战和无线通信系统。单站无源定位的方法很多,其中比较实用的方法是通过测量到达时间(TOA)、到达方向(DOA)及多普勒频率信息来实现无机动单站对运动辐射源的快速、稳定的定位跟踪。由于定位系统既可以测量得到目标的时域、空域信息,又可以测量得到目标的频域信息,运用信息融合技术可以充分利用这些观测量进行定位,提高无源定位的定位性能^[1]。

1 系统模型的建立

设定位系统可以同时测量到辐射源的时域、空域和频域信息,可用于定位的测量参数子集分别为 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \Delta TOA\}$ 和 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, f_d\}$ 。前者利用了时域和空域参数^[2]被称为系统 I;后者利用了频域和空域参数^[3]被称为系统 II。两个系统的状态矢量分别为:

$$X_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k \ \Delta T_{rk}]^T \text{ 和 } X'_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k \ 1/f_T]^T$$

其中, T_r 和 f_T 分别为脉冲重复周期和信号载频。相应的状态方程分别为:

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1,k} X_k + W_k$$

$$X'_{k+1} = \Phi'_{k+1,k} X'_k + W'_k$$

其中:

$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} I_3 & TI_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{4 \times 1} & I4 \end{bmatrix},$$

$$W_k = \left[\frac{T^2}{2} w_{xk} \ \frac{T^2}{2} w_{yk} \ \frac{T^2}{2} w_{zk} \ Tw_{xk} \ Tw_{yk} \ Tw_{zk} \ 0 \right]^T,$$

对于测量子集 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \Delta TOA\}$ 和 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, f_d\}$, 测量方程分别为:

$$\begin{cases} \beta_k = \arctan(\frac{x_k}{y_k}) + \delta_{\beta k} \\ \varepsilon_k = \arctan(\frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}) + \delta_{\varepsilon k} \\ \dot{\beta}_k = \frac{y_k \dot{x}_k - x_k \dot{y}_k}{x_k^2 + y_k^2} + \delta_{\dot{\beta} k} \\ \Delta TOA_k = (r_k - r_{k-1})/c + N\hat{T}_{rk} + N\Delta T_{rk} + \delta_{rk} \end{cases}$$

* 基金项目:总装备部基金资助项目(5140104C703CB0102)

$$\begin{cases} \beta_k = \arctan\left(\frac{x_k}{y_k}\right) + \delta_{\beta k} \\ \varepsilon_k = \arctan\left(\frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}\right) + \delta_{\varepsilon k} \\ \dot{\beta}_k = \frac{y_k \dot{x}_k - x_k \dot{y}_k}{x_k^2 + y_k^2} + \delta_{\dot{\beta} k} \\ f_{dk} = \frac{f_T(x_k \dot{x}_k + y_k \dot{y}_k + z_k \dot{z}_k)}{c \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}} + \delta_{f_{dk}} \end{cases}$$

分别令以上两式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_k^1 &= \mathbf{h}^1(\mathbf{X}_k) + \mathbf{N}_k^1 \\ \mathbf{Z}_k^2 &= \mathbf{h}^2(\mathbf{X}_k') + \mathbf{N}_k^2 \end{aligned}$$

取共同的运动状态矢量 $\mathbf{Y}_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T$, 则有 $\mathbf{X}_k = [\mathbf{Y}_k^T \ \Delta T_{rk}]^T$ 和 $\mathbf{X}_k' = [\mathbf{Y}_k^T \ 1/f_T]^T$, 且 $\mathbf{Y}_{k+1} = \Phi^Y \mathbf{Y}_k + \mathbf{W}_k^Y$

其中, $\Phi^Y = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{T}\mathbf{I}_3 \\ 0 & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$, $\mathbf{W}_k^Y = \mathbf{W}_k[1:6]$

2 定位跟踪融合算法

融合算法的工作原理是^[4]: 先在两个系统中分别代入未知参数 $k-1$ 时刻的估计值, 通过定位跟踪算法估计目标的运动变量, 得到 $\hat{\mathbf{Y}}_k^1$ 和 $\hat{\mathbf{Y}}_k^2$; 然后利用融合算法得到精度更高的估计值 $\hat{\mathbf{Y}}_k^F$ 。将融合结果 $\hat{\mathbf{Y}}_k^F$ 和 $\mathbf{P}_k^F$ 代入两个系统中, 分别估计参数 T_r 和 f_T 。由于在融合算法有效的条件下, 通过融合算法得到的 $\hat{\mathbf{Y}}_k^F$ 可以比 $\hat{\mathbf{Y}}_k^1$ 和 $\hat{\mathbf{Y}}_k^2$ 的估计精度更高, 所以对参数 T_r 和 f_T 的估计也更加有利。在系统 I 和 II 中分别代入参数 T_r 和 f_T 的估计值, 并采用 MGEKF 算法进行定位跟踪。

设在每个 k 时刻得到目标运动状态矢量的估计值 $\hat{\mathbf{Y}}_k^1$ 和 $\hat{\mathbf{Y}}_k^2$, 以及运动状态矢量估计误差协方差 $\mathbf{P}_{Yk}^1$ 和 $\mathbf{P}_{Yk}^2$ 。

$$\text{令: } \mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}}_k^1 \\ \hat{\mathbf{Y}}_k^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 \\ \mathbf{I}_6 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_k + \begin{bmatrix} \mathbf{m}_k^1 \\ \mathbf{m}_k^2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{Y}_k + \begin{bmatrix} \mathbf{m}_k^1 \\ \mathbf{m}_k^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{m}_k^1$ 和 $\mathbf{m}_k^2$ 分别为系统 I 和 II 对目标运动状态变量估计的误差。令:

$$\mathbf{M}_k = [\mathbf{m}_k^1 \ \mathbf{m}_k^2]^T$$

则误差协方差为:

$$\mathbf{P}_k^z = E\{\mathbf{M}_k \mathbf{M}_k^T\} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_k^1 & \mathbf{P}_k^{12} \\ \mathbf{P}_k^{21} & \mathbf{P}_k^2 \end{bmatrix}$$

对于系统 I, k 时刻状态滤波值为:

$$\hat{\mathbf{Y}}_{k|k}^1 = \Phi^Y \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1 + \mathbf{K}_k^1 [\mathbf{Z}_k^1 - \mathbf{H}_k^1 (\Phi^Y \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1)]$$

所以估计误差为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{Y}}_{k|k}^1 &= \mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k}^1 = \mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1 - \mathbf{K}_k^1 \mathbf{v}_k^1 \\ &= (\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_{k-1|k-1}^1) - \mathbf{K}_k^1 (\mathbf{H}_k^1 \mathbf{Y}_k + \mathbf{N}_k^1 - \mathbf{H}_k^1 \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1) \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^1 \mathbf{H}_k^1) \Phi^Y \tilde{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1 + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^1 \mathbf{H}_k^1) \mathbf{W}_{k-1}^Y - \mathbf{K}_k^1 \mathbf{N}_k^1 \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{v}_k^1 = \mathbf{Z}_k^1 - \mathbf{H}_k^1 (\Phi^Y \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1)$ 为系统 I 在 k 时刻的信息矢量, $\tilde{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1 = \mathbf{Y}_{k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1$, $\mathbf{H}_k^1 = \frac{\partial \mathbf{h}^1(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{Y}_k} \Big|_{\mathbf{Y}_k = \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^1}$ 。

对于系统 II, 同理可得:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{Y}}_{k|k}^2 &= \mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k}^2 = \mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^2 - \mathbf{K}_k^2 \mathbf{v}_k^2 \\ &= (\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_{k-1|k-1}^2) - \mathbf{K}_k^2 (\mathbf{H}_k^2 \mathbf{Y}_k + \mathbf{N}_k^2 - \mathbf{H}_k^2 \hat{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^2) \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^2 \mathbf{H}_k^2) \Phi^Y \tilde{\mathbf{Y}}_{k-1|k-1}^2 + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^2 \mathbf{H}_k^2) \mathbf{W}_{k-1}^Y - \mathbf{K}_k^2 \mathbf{N}_k^2 \end{aligned}$$

所以互协方差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^{12} &= E\{\tilde{\mathbf{Y}}_{k|k}^1 (\tilde{\mathbf{Y}}_{k|k}^2)^T\} \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^1 \mathbf{H}_k^1) [\Phi^Y \mathbf{P}_{k-1}^{12} (\Phi^Y)^T + \mathbf{Q}_{k-1}^Y] (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^2 \mathbf{H}_k^2)^T + \mathbf{K}_k^1 \mathbf{R}_k^{12} (\mathbf{K}_k^2)^T \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{Q}_{k-1}^Y = E\{\mathbf{W}_{k-1}^Y (\mathbf{W}_{k-1}^Y)^T\}$ 为状态矢量的噪声方差,

$$\mathbf{R}_k^{12} = E\{\mathbf{N}_k^1 (\mathbf{N}_k^2)^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{\beta}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\dot{\beta}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为系统 I 和 II 测量矢}$$

量的噪声协方差。

于是对式 (1) 采用加权最小二乘法, 可以得到目标运动矢量的融合估计值:

$$\hat{\mathbf{Y}}_k^F = [\mathbf{H}^T (\mathbf{P}_k^Z)^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{P}_k^Z)^{-1} \mathbf{Z}_k$$

其估计误差为:

$$\mathbf{P}_k^F = [\mathbf{H}^T (\mathbf{P}_k^Z)^{-1} \mathbf{H}]^{-1}$$

通过上述过程可以得到系统 I 和 II 中目标运动状态 $\mathbf{Y}_k$ 的信息融合估计结果^[5]。然后把 $\hat{\mathbf{Y}}_k^F$ 和 $\mathbf{P}_k^F$ 分别代入系统 I 和 II 中进一步估计目标参数 T_r 和 f_T 。

3 计算机仿真

仿真一: 系统 I 或系统 II 中一组参数测量误差较大的情况下单站无源定位跟踪融合算法仿真。实验条件:

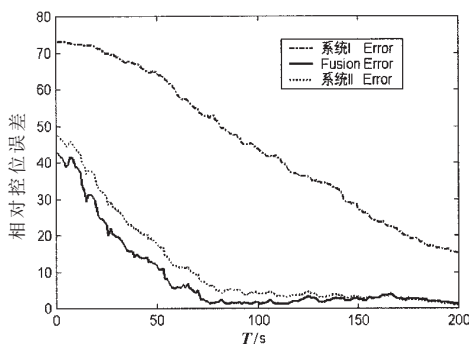
观测站位于坐标原点, 测量参数集为 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \Delta TOA\}$ 和 $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, f_d\}$, 目标初始状态为: $\mathbf{x}_0 = [120\text{km} \ 80\text{km} \ 8\text{km} \ -300\text{m/s} \ 150\text{m/s} \ 0\text{m/s}]^T$, 仿真结果取 100 次 Monte-Carlo。目标信号重复周期为 $T_r = 1\text{ms}$, 波长为 0.1m 。仿真结果如图 1 所示。从图 1 可以看出, 当其中一个测量集测量误差较大导致定位跟踪性能很差时, 融合算法结果接近定位性能较好的测量子集的定位跟踪结果。

仿真二: 载频参数抖动, 系统 II 定位曲线发散情况下单站无源定位跟踪融合算法仿真。实验条件同仿真一, 仿真结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 融合算法不但可以提高定位性能, 而且使得无源定位跟踪过程更加可靠, 即定位性能不会因为某些参数的变化或者测量误差增大而突然变得很差。

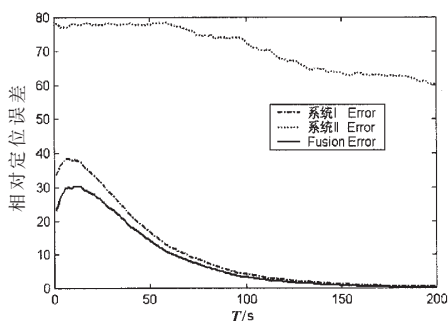
仿真三: 单站无源定位跟踪融合算法仿真。实验条件同仿真一, 仿真结果如图 3 所示。

从图 3 中的仿真结果可以看出, 采用融合算法的定位结果要好于两种测量子集各自的定位结果。实际上, 这一点从融合算法的计算过程中也容易看出。

近年来, 信息融合技术越来越受到人们的关注, 而且融合技术在很多领域得到广泛应用。理论分析和仿真



(a) 系统 I 参数测量误差较大



(b) 系统 II 参数测量误差较大

图 1 测量误差较大时单站无源定位跟踪融合算法仿真结果

结果均表明,将融合技术应用于单站无源定位,能更好地解决多参数测量集条件下的单站无源定位跟踪问题,是一种有效的定位方法,这种方法定位精度比较高,收敛速度快。本文的分析与仿真结果对于确定具体定位与跟踪系统战术指标,以及滤波算法的选用具有实用价值。随着现代科技的发展,无源定位精度已大大提高^[6]。在现代战争日益强调隐蔽性、快速性和准确性的今天,只要紧密跟踪技术的发展,综合运用多种手段,解决好需求与可能的矛盾,其应用前景是非常令人鼓舞的。

参考文献

- [1] 何友,王国宏,彭应宁.多传感器信息融合及其应用.北京:电子工业出版社,2000.
- [2] LI Zong Hua, FENG Dao Wang, SUN Zhong Kang, et al. Passive location using time of arrival along with direction

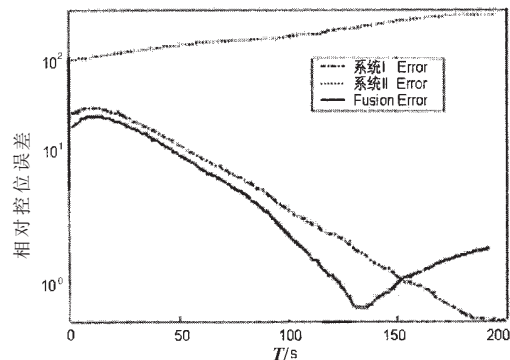


图 2 定位曲线发散情况单站无源定位跟踪融合算法仿真结果

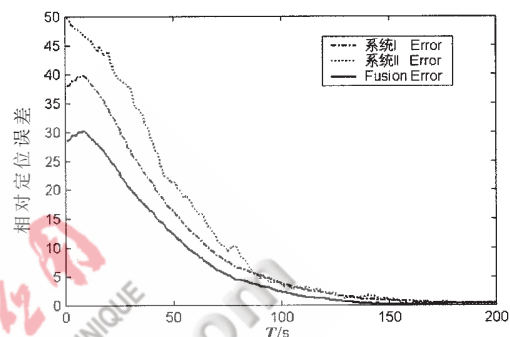


图 3 单站无源定位跟踪融合算法仿真结果

of arrival and its changing rate. The IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (ICRISSP'03), China, Oct. 2003.

- [3] 许耀伟,周一宇,孙仲康.引入测频信息进行无源被动定位的方法研究.国防科技大学学报,1998,20(5):61-65.
- [4] SAHA R K, CHANG K C. An efficient algorithm for multisensor track fusion. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 200-210.
- [5] SAHA R K. Track-to-Track fusion with dissimilar sensors. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3): 1021-1028.
- [6] 孙仲康,周一宇.单多基地有源无源定位技术[M].北京:国防工业出版社,1996:196-312.

(收稿日期:2007-02-06)