

双基地中两坐标收站的三维定位跟踪算法

陈永光 孙仲康

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘要 文中讨论了 T/R-R 型双基地系统中无俯仰信息收站对运动目标的三维定位跟踪能力;通过若干观测点上测量数据的组合,较好地实现了对运动目标的三维定位跟踪,从而可以将目标的高度信息从变化的距离和之差的测量值中提取出来。文中以仿真手段证明了这种方法的可行性。

关键词 定位跟踪, 运动目标, 距离和

分类号 TN971.1

A 3-D Location & Tracking Algorithm of Two-Coordinate Observer in Bistatic System

Chen Yongguang Sun Zhongkang

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

Abstract The paper discusses the capacity of the single observer in a T/R-R type bistatic system without elevation message to locate and track moving targets in three dimensional space. The 3-D location and tracking of moving targets is well achieved by means of the combination of measurement data got at several observation points. Therefore the height message of targets can be extracted from variant measurement values of the difference of distance sum. The feasibility of this way is proved in the paper with the help of simulation.

Key words location & tracking, moving target, distance sum

随着电子对抗技术的不断发展,在对运动目标的定位跟踪方面,有源辐射的主动式雷达开始暴露出弱点——易被侦察、被干扰^[1]。因此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及免除了复杂的时间同步装置,因而更加引人注目。

* 1995年11月10日收稿

双基地系统采用 SOPLAT 技术使接收站增强定位跟踪的独立性能。系统中的主/被动站之间彼此独立,由发射站向目标照射,接收站利用反射波获得 DOA 和 TOA 信息对目标定位跟踪。

与单个雷达的情况类似,一般而言,双基地中的接收站需要测量目标的方位角、俯仰角和时间差(相继两次反射波的到达时间差);但是有些接收站没有测俯仰角的设备,因此必须研究在特定条件下双基地系统中收站无俯仰角或高度数据时对运动目标的三维定位跟踪能力。

1 定位跟踪原理

双基地雷达系统中的发射站向目标照射,被动站测量反射信号的到达时间差(ΔTOA)^m和方位角 φ^m (上标 m 表示测量值)。考虑到测量噪声,有:

$$(\Delta\text{TOA})_{k,k-1}^m = T + (r_{t,k} + r_{r,k} - r_{t,k-1} - r_{r,k-1})/c + \eta_{\Delta t,k-1} \quad (1)$$

$$\varphi_k^m = \text{tg}^{-1} \frac{y_k - y_r}{x_k - x_r} + \eta_{\varphi,k} \quad (2)$$

其中: $\eta_{\Delta t,k-1}$ 和 $\eta_{\varphi,k}$ 分别是时差、方位角的测量噪声; c 为光速; T 是取样间隔; r_t 、 r_r 分别是目标与发射站、接收站的距离;目标在第 k 点坐标 (x_k, y_k, z_k) ;发射站站址 (x_t, y_t, z_t) ;接收站站址 (x_r, y_r, z_r) 。

式(1)中, $(\Delta\text{TOA})^m$ 包含了目标高度信息,这是因为:

$$\begin{aligned} r_{t,k} + r_{r,k} - r_{t,k-1} - r_{r,k-1} = & \sqrt{(x_k - x_t)^2 + (y_k - y_t)^2 + (z_k - z_t)^2} \\ & + \sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2 + (z_k - z_r)^2} \\ & - \sqrt{(x_{k-1} - T v_x - x_t)^2 + (y_{k-1} - T v_y - y_t)^2 + (z_{k-1} - T v_z - z_t)^2} \\ & - \sqrt{(x_{k-1} - T v_x - x_r)^2 + (y_{k-1} - T v_y - y_r)^2 + (z_{k-1} - T v_z - z_r)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

虽然 $(\Delta\text{TOA})^m$ 中含有的高度信息有可能被提取出来,从而可以不测俯仰角而对运动目标定位,但由于方位角 φ 中不含高度信息,因此必须有变化丰富的 TOA 信息才能得到满意的定位效果。

2 定位跟踪算法

2.1 滤波公式

引入如下滤波公式(称为加权 MEKF, 或 WMEKF):

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{g}_k^T (\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) [\mathbf{g}_k (\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{g}_k^T (\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) + \mathbf{R}_k]^{-1} \\ \mathbf{P}_{k/k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{g}_k (\mathbf{z}_k^m, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})] \mathbf{P}_{k/k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k^m - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})] \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k/k} \\ \mathbf{P}_{k+1/k} = \Phi \mathbf{P}_{k/k} \Phi^T + \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (4)$$

2.2 测量方程的建立

用 ΔTOA 和方位角对目标定位跟踪需要目标在多个位置上的测量值组成测量方程。

取 4 个测量点, 则第 K 次滤波利用 $K, K-N_k, K-N_k-I_k, K-N_k-I_k-J_k$ 4 点所测数据, 其中 N_k, I_k, J_k 为大于 1 的正整数。得 7 个测量值组成的测量方程

$$z_k^m = h(x_k) + \eta_k$$

其中: $z_k^m = [\varphi_k^m, \varphi_{k-N_1}^m, \varphi_{k-N_2}^m, \varphi_{k-N_3}^m, \Delta S_{k,k-N_1}, \Delta S_{k-N_1,k-N_2}, \Delta S_{k-N_2,k-N_3}]^T$

$\Delta S_{i,i-j}$ 是第 i 和 $i-j$ ($i > j$) 时刻目标与发射站、接收站的距离和之差。其为:

$$\Delta S_{i,i-j} = c[\Delta TOA]_{i,i-j}^m - jT] = r_{i,i} + r_{r,i} - r_{i,i-j} - r_{r,i-j} + \sum_{n=0}^{j-1} \eta_{\Delta S_{i-n,i-n-1}}; \quad (5)$$

$\eta_{\Delta S} = c\eta_{\Delta}$ 是由测时差引起的距离和之差的噪声。

z_k^m 表达式中

$$N_1 = N_k, N_2 = N_k + I_k, N_3 = N_k + I_k + J_k;$$

$$E[\eta_k] = \mathbf{0}; \text{COV}\{\eta_k, \eta_j\} = \mathbf{R}_k \delta_{kj};$$

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}[\sigma_{\varphi}^2, \sigma_{\varphi}^2, \sigma_{\varphi}^2, \sigma_{\varphi}^2, N_k \sigma_{\Delta S}^2, I_k \sigma_{\Delta S}^2, J_k \sigma_{\Delta S}^2]$$

式中: $\sigma_{\varphi}, \sigma_{\Delta S}$ 分别表示方位角及距离和之差测量误差噪声的标准差。用 6 点或 8 点测量数据组成测量方程的方法同上。

2.3 滤波公式的应用

方位角的滤波算法详见文献[2]。

距离和之差测量方程采用 EKF 算法滤波。

$$h_{\Delta S,k}^N(x_k) = (r_{i,k-k_2} + r_{r,k-k_2}) - (r_{i,k-k_1} + r_{r,k-k_1})$$

$$\frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial x_k} = \frac{x_k - x_i - k_2 T \nu_{x_k}}{r_{i,k-k_2}} + \frac{x_k - x_r - k_2 T \nu_{x_k}}{r_{r,k-k_2}}$$

$$- \frac{x_k - x_i - k_1 T \nu_{x_k}}{r_{i,k-k_1}} - \frac{x_k - x_r - k_1 T \nu_{x_k}}{r_{r,k-k_1}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{x_k}} = k_1 T \left[\frac{x_k - x_i - k_1 T \nu_{x_k}}{r_{i,k-k_1}} + \frac{x_k - x_r - k_1 T \nu_{x_k}}{r_{r,k-k_1}} \right]$$

$$- k_2 T \left[\frac{x_k - x_i - k_2 T \nu_{x_k}}{r_{i,k-k_2}} + \frac{x_k - x_r - k_2 T \nu_{x_k}}{r_{r,k-k_2}} \right] \quad (7)$$

分别以 y 和 z 代替 x (含角标) 代

入 (6)、(7) 式可以得到 $\frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial y_k}$,

$$\frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial z_k}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{y_k}}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{z_k}}.$$

以表 1 中 k_1, k_2 的三组值组成一个 3×6 阶矩阵 $g_{\Delta S,k}(z_k^m, \hat{x}_{k/k-1})$, 其中每一个子矩阵可写为:

$$g_{\Delta S,k}^N(z_k^m, \hat{x}_{k/k-1}) = \left[\frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial x_k}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial y_k}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial z_k}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{x_k}}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{y_k}}, \frac{\partial h_{\Delta S,k}^N(x_k)}{\partial \nu_{z_k}} \right]_{j_k = i_k/k-1}$$

表 1 k_1, k_2 取值

| k_2 | 0 | N_k | $N_k + I_k$ |
|-------|-------|-------------|-------------------|
| k_1 | N_k | $N_k + I_k$ | $N_k + I_k + J_k$ |

运用(4)式滤波时,可取:

$$g_k(z_k^m, \hat{x}_{k/k-1}) = \begin{bmatrix} g_{\varphi,k}(z_k^m, \hat{x}_{k/k-1}) \\ g_{\Delta S,k}(z_k^m, \hat{x}_{k/k-1}) \end{bmatrix}; \quad h(\hat{x}_{k/k-1}) = \begin{bmatrix} h_{\varphi}(\hat{x}_{k/k-1}) \\ h_{\Delta S}(\hat{x}_{k/k-1}) \end{bmatrix}$$

3 仿真试验及结果分析

发射站站址(-60,0,0.1)km;接收站站址(30,0,0)km;目标起始跟踪点(50,60,10)km;目标航迹如图1所示。

试验中以8个测量点的信息组成测量方程,跟踪时间约250s。从图2中各航迹曲线,不难看出定位跟踪效果因航迹而异。

(1)航迹③效果最佳,因为在垂直于基线的航迹上 TOA 和方位角变化较大,多测量点组成测量方程时,该航迹的定位精度较高。

(2)航迹①的定位误差均值比航迹③的大,收敛速度也明显低于航迹③,z轴方向上的定

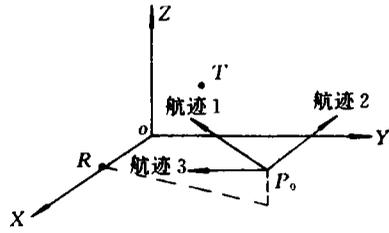
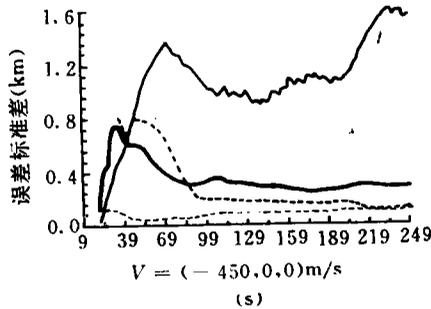
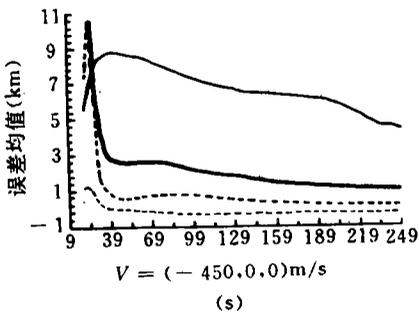
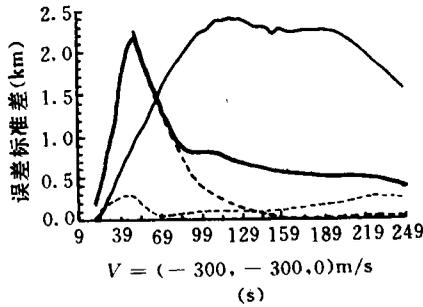
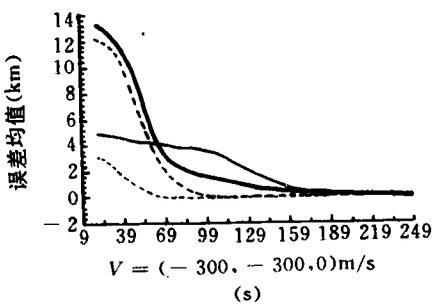


图1 目标航路图



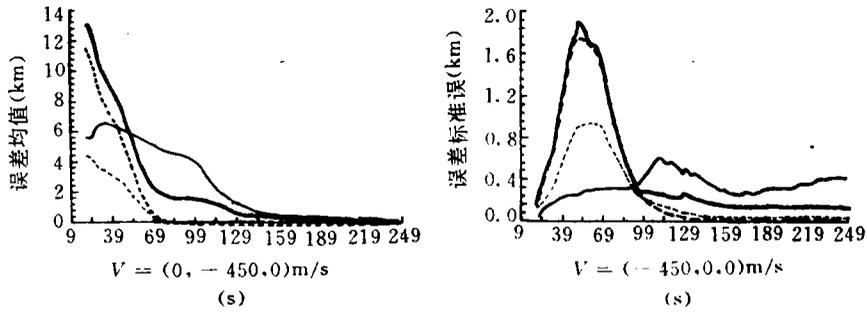


图2 定位跟踪误差

$\sigma_{\varphi} = 2$ 毫弧度, $\sigma_{AS} = 5$ 米; 八个测量点数据组合。

图中 X:; Y: -----; Z: ————; R: ——。

位误差标准差达到 2、3km; 但是, x, y 轴方向及斜距 R 的定位误差仍可收敛到 0.5km 之内。该航迹 TOA 信息的变化比航迹③小, 所以定位精度有所下降。

(3) 航迹②平行于基线, 整个跟踪时间段内目标基本上在准不可观测区域内飞行, TOA 变化不大(即每次测得的距离和之差很小), 从而导致测量值信噪比下降; 该航迹上定位跟踪失败。

参 考 文 献

- 1 孙仲康, 陈辉煌. 定位导航与制导. 北京: 国防工业出版社, 1987
- 2 陈永光. 基于融合算法的双基地系统定位跟踪技术研究: [博士论文]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1995

(责任编辑 潘 生)