

引用格式:景桐,田威,黄高明.基于到达时间和多普勒频率的海战场无源跟踪模型[J].电光与控制,2019,26(7):29-35,50. JING T, TIAN W, HUANG G M. A passive tracking model based on time of arrival and Doppler frequency in naval battlefield[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7):29-35, 50.

## 基于到达时间和多普勒频率的海战场无源跟踪模型

景桐, 田威, 黄高明  
(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

**摘要:**传统被动相干定位系统(PCLS)利用固定的观测站和外辐射源(IO)实现对目标的跟踪,而这种体制无法应用于真实的海战场环境。针对这种不足,提出了一种基于多个机动观测站和单一机动IO的PCLS目标跟踪模型。针对仅利用到达时间(TOA)的PCLS目标状态估计精度不足的问题,该模型以TOA和多普勒频率的联合测量信息为目标观测,以信号到达角(AOA)为IO观测,实现对目标和IO的同时跟踪。仿真结果证明了模型的有效性。

**关键词:**无源跟踪;被动相干定位系统;机动观测站;机动外辐射源;多普勒频率

**中图分类号:** TN953 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.006

## A Passive Tracking Model Based on Time of Arrival and Doppler Frequency in Naval Battlefield

JING Tong, TIAN Wei, HUANG Gao-ming

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The Passive Coherent Location System (PCLS) uses a fixed observer and an non-cooperative Illuminator of Opportunity (IO) to track targets, which is not applicable to a real sea battlefield environment. In response to this deficiency, this paper proposes a PCLS target tracking model based on multiple maneuvering observer and a single maneuvering IO. For the problem that the PCLS target state estimation is imprecise by only using Time of Arrival (TOA), the model takes the joint measurement of TOA and Doppler frequency as the target observation, with the signal's Angle of Arrival (AOA) measurement as the IO observation, so that simultaneous tracking of targets and IOs is achieved. The simulation results prove the validity of the model.

**Key words:** passive tracking; Passive Coherent Location System (PCLS); maneuvering observer; maneuvering IO; Doppler frequency

### 0 引言

利用无源探测系统对目标进行跟踪的方法常分为两种:利用目标自身辐射的电磁波直接对其进行跟踪;以外辐射源(Illuminators of Opportunity, IO)发射的直达波信号为参考,对目标反射的回波信号进行相干处理实现对目标的跟踪,也被称为被动相干定位系统(Passive Coherent Location System, PCLS)。目前可用于PCLS的信号包括数字视频广播(Digital Video Broadcasting, DVB)信号<sup>[1]</sup>、调频广播信号<sup>[2]</sup>以及多种有源雷

达信号等。PCLS由于其具有抗隐身、抗干扰、抗反辐射导弹和抗低空突防等特点,一直受到学者们的广泛关注<sup>[3-8]</sup>。

在PCLS中,目标的跟踪精度依赖于IO和观测站的位置、测量误差以及目标状态等。传统的PCLS利用固定的观测站和IO实现对目标的跟踪,然而在海战场环境中,IO和观测站通常处于机动状态,使得传统模型无法直接用于评估系统的目标跟踪效能。相关研究仍存在不足,目前还没有文献对此类问题做出具体的量化分析。文献[9]论述了一种综合利用非合作探测技术和电子侦察技术的方法实现对机动目标和IO的同时定位,但未能给出目标跟踪的具体模型;文献[10]以中国移动多媒体广播(CMMB)信号作为IO,开展了基于移动接收站的外辐射源雷达实验,并验证了方法的可行性,但未涉及IO机动的情况。文献[8]仅

收稿日期:2018-06-22

修回日期:2018-10-09

基金项目:中国博士后科学基金(2017M613370);国家自然科学基金(61601491)

作者简介:景桐(1995—),男,辽宁葫芦岛人,硕士生,研究方向为无源定位和信号处理。

利用到达时间(TOA)作为观测量的PCLS的目标状态估计精度不足,尤其是目标速度状态,这是因为在滤波过程中,观测量的更新负责对目标状态预测值进行反馈,新的观测测量与状态模型的先验估计共同影响目标状态的后验估计。而多普勒频率与目标速度有着直接对应关系,将多普勒频率作为观测测量代入量测更新方程,通过矫正目标速度的预测估计,最终可以得到最优的速度估计,即通过不断对目标速度的预估和纠正,实现对目标速度的递归循环,达到平滑速度的目的。因此,加入多普勒观测测量可以提高目标速度状态的估计精度<sup>[11]</sup>;同时,冗余观测测量的加入也可在一定程度上提高目标位置的估计精度。

本文针对海战场上观测站和IO皆机动的情况,提出了一种多收发发的PCLS跟踪模型;针对仅利用TOA的PCLS目标状态估计精度不足的问题,提出了一种基于联合TOA和多普勒频率观测测量的跟踪方法。该方法以TOA和多普勒频率为目标观测测量,以到达角(AOA)为IO观测测量,在利用滤波器进行数据融合的过程中,以 $k+1$ 时刻IO的状态估计为参量来计算目标量测预测值和量测方程的雅可比矩阵,进而获得 $k+1$ 时刻的目标位置和速度估计,实现对IO和目标的跟踪。由于系统模型是非线性的,本文选用扩展卡尔曼滤波(EKF)实现测量数据的融合<sup>[12]</sup>。

## 1 系统模型

### 1.1 外辐射源状态模型

为方便问题的讨论,本文建立一个2维PCLS目标跟踪模型,包含 $N$ 个舰载观测站和1个舰载IO,如图1所示。

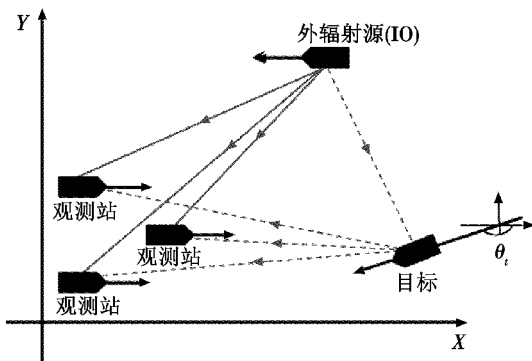


图1 基于机动观测站和IO的PCLS二维目标跟踪场景

Fig. 1 Two-dimensional target tracking scenario for the PCLS based on maneuvering observer and the IO

假设观测站、目标和IO分别以速度 $v_o$ 、 $v_t$ 和 $v_e$ 做匀速直线运动,系统的采样间隔为 $T$ ,则机动IO的离散状态模型为

$$X_e(k+1) = AX_e(k) + v_e(k) \quad (1)$$

式中: $A = \begin{pmatrix} I_{2 \times 2} & TI_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix}$ ,  $I_{2 \times 2}$ 和 $0_{2 \times 2}$ 分别代表 $2 \times 2$ 的单位矩阵和 $2 \times 2$ 的零矩阵; $X_e^T = (r_e^T \ v_e^T)$ 为IO的状态向量, $r_e^T = (x_e \ y_e)$ 为IO位置状态, $v_e^T = (v_{x_e} \ v_{y_e})$ 表示IO速度状态; $v_e$ 为IO过程噪声向量,且假设 $v_e$ 为零均值、互不相关的高斯白噪声序列,其协方差矩阵

$$Q_e \text{ 表示为: } Q_e = p_e \begin{pmatrix} T^3/3 & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & T^3/3 & 0 & T^2/2 \\ T^2/2 & 0 & T & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 & T \end{pmatrix}, \text{ 其中,}$$

$p_e$ 为考虑IO过程噪声的确定性参数。

### 1.2 外辐射源量测模型

假设多个观测站之间能够进行精确的数据关联,且在每个测量时刻能够同时获得目标和IO的量测数据,则由第 $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ )个观测站测得AOA观测测量为

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{y_e - y_{o_i}}{x_e - x_{o_i}}\right) + w_{e_i} \quad (2)$$

式中: $x_{o_i}$ 和 $y_{o_i}$ 分别为第 $i$ 个观测站的横坐标和纵坐标, $w_{e_i}$ 为量测噪声,其方差为 $\sigma_{e_i}^2$ 。

将式(2)转换为矩阵形式,得到IO量测模型为

$$z_e(k+1) = h_e(X_e(k+1)) + W_e(k+1) \quad (3)$$

式中: $z_e^T = (\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_N)$ 为IO量测向量; $h_e(\cdot)$ 为IO量测方程; $W_e$ 为其量测噪声向量,且假设 $W_e$ 为零均值、互不相关的高斯白噪声序列,其协方差矩阵 $R_e$ 可表示为 $R_e = \text{diag}(\sigma_{e_1}^2 \ \dots \ \sigma_{e_N}^2)$ 。

### 1.3 目标状态模型

与IO状态模型类似,目标的状态模型为

$$X_t(k+1) = AX_t(k) + v_t(k) \quad (4)$$

式中: $X_t^T = (r_t^T \ v_t^T)$ 为目标的状态向量; $r_t^T = (x_t \ y_t)$ 为目标位置状态; $v_t^T = (v_{x_t} \ v_{y_t})$ 为目标速度状态。 $v_t$ 为目标状态过程噪声向量,且假设 $v_t$ 为零均值、互不相关的高斯白噪声序列,其协方差矩阵 $Q_t$ 可表示为 $Q_t =$

$$p_t \begin{pmatrix} T^3/3 & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & T^3/3 & 0 & T^2/2 \\ T^2/2 & 0 & T & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 & T \end{pmatrix}, \text{ 其中, } p_t \text{ 为考虑目标过}$$

程噪声的确定性参数。

### 1.4 目标量测模型

目标观测量为系统在匹配滤波阶段得到的TOA和多普勒频率信息。根据图1所示平面几何结构,基于TOA观测测量可以得到第 $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ )个观测站获得的距离和量测信息为<sup>[13]</sup>

$$l_i = \|r_{o_i} - r_t\|_2 + \|r_t - r_e\|_2 + w_{l_i} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{r}_{o_i}^T = (x_{o_i} \ y_{o_i})$ 为第*i*个观测站的位置状态； $w_{l_i}$ 为距离和量测噪声，其方差为 $\sigma_{l_i}^2$ 。

假设 $f_c$ 为IO信号频率，根据多普勒频率与目标的对应关系<sup>[14]</sup>，第*i*个观测站获得的多普勒频率观测量为

$$f_{d_i} = -\frac{f_c}{c} \left[ \frac{(\mathbf{r}_{o_i} - \mathbf{r}_1)^T (\mathbf{v}_{o_i} - \mathbf{v}_1)}{\|\mathbf{r}_{o_i} - \mathbf{r}_1\|_2} + \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_e)^T (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_e)}{\|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_e\|_2} - \frac{(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_{o_i})^T (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_{o_i})}{\|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_{o_i}\|_2} \right] + w_{f_i} \quad (6)$$

式中： $c$ 为光速； $\mathbf{v}_{o_i}^T = (v_{x_{o_i}} \ v_{y_{o_i}})$ 为第*i*个观测站的速度状态； $w_{f_i}$ 为多普勒频率量测噪声，其方差为 $\sigma_{f_i}^2$ 。

将式(5)和式(6)转换为矩阵形式，得到目标量测模型为

$$\mathbf{z}_i(k+1) = \mathbf{h}_i(\mathbf{X}_i(k+1)) + \mathbf{W}_i(k+1) \quad (7)$$

式中： $\mathbf{z}_i^T = (l_1 \ l_2 \ \dots \ l_N \ f_{d_1} \ f_{d_2} \ \dots \ f_{d_N})$ 为目标量测向量； $\mathbf{h}_i(\cdot)$ 为目标量测方程； $\mathbf{W}_i$ 为其量测噪声向量，且假设 $\mathbf{W}_i$ 为零均值、互不相关的高斯白噪声序列，其协方差矩阵 $\mathbf{R}_i$ 表示为 $\mathbf{R}_i = \text{diag}(\sigma_{l_1}^2 \ \dots \ \sigma_{l_N}^2 \ \sigma_{f_1}^2 \ \dots \ \sigma_{f_N}^2)$ 。

### 1.5 观测站机动模型

假设观测站在每个时刻对自身的状态精确已知且不存在过程噪声，则其机动状态模型为

$$\mathbf{X}_{o_i}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}_{o_i}(k) \quad (8)$$

式中： $\mathbf{X}_{o_i}^T = (\mathbf{r}_{o_i}^T \ \mathbf{v}_{o_i}^T)$ 为第*i*个观测站的状态向量。

## 2 目标跟踪

在PCLS中，目标位置的解算方法通常基于IO位置是已知的。在海战场上，IO位置的获取方式一般有两种：1)由某些有源探测系统向PCLS提供IO位置坐标；2)由PCLS接收机网络自身对IO实施无源定位。前者在处理过程中会存在因有源探测平台隐蔽性低而易受到摧毁、多源异构数据融合、信息传递存在延迟以及额外资源分配的负担，所以，IO位置的获取方法应选用后者。由于IO位置的误差会严重影响目标的定位精度，保持对IO位置的跟踪可以减少由单次测量带来的误差浮动，因此，在目标和IO皆机动的情况下，系统实现对目标跟踪的前提是保持对IO的精确跟踪。

本文提出的模型采用串行工作方式对数据进行处理，实现对IO和目标的跟踪。首先，模型根据多个观测站获得的AOA观测实现IO的跟踪。假设AOA的观测噪声满足高斯假设，则IO的估计误差协方差矩阵 $\mathbf{P}_e(k)$ 为基于IO观测 $\mathbf{z}_e(k)$ 的最小均方差估计矩阵，即IO状态得到了最优的最小方差估计 $\hat{\mathbf{X}}_e(k+1)$ 。

其次，根据式(5)和式(6)可知，目标的量测方程 $\mathbf{h}_i(\cdot)$ 是关于IO位置的函数。因此，在第二步目标状态的估计中，目标的量测预测 $\hat{\mathbf{z}}_i(k+1|k)$ 和量测方程的雅可比矩阵 $\mathbf{H}_i(k+1)$ 中的IO状态参数应用同一跟踪循环内的IO状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_e(k+1)$ 代替。此外，通过在目标观测中加入与速度有直接关系的多普勒频率观测，使得每次目标速度的预测估计得到矫正，通过递归循环最终得到稳定准确的速度估计。这样，模型就能在实现对IO跟踪的同时完成对目标的精确跟踪。

本文选用EKF算法作为数据融合的工具，假设IO具有良好的稳定性，且在整个跟踪过程中持续向空间辐射电磁波。图2为本文所提出模型的一个M步跟踪循环流程图。在时刻k，滤波器利用N个观测站获得的AOA观测估计出k+1时刻的IO状态 $\hat{\mathbf{X}}_e(k+1)$ ，并以此为参考计算出目标量测预测值 $\hat{\mathbf{z}}_i(k+1|k)$ 和量测方程的雅可比矩阵 $\mathbf{H}_i(k+1)$ ，进而推算出目标的状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_i(k+1)$ 。

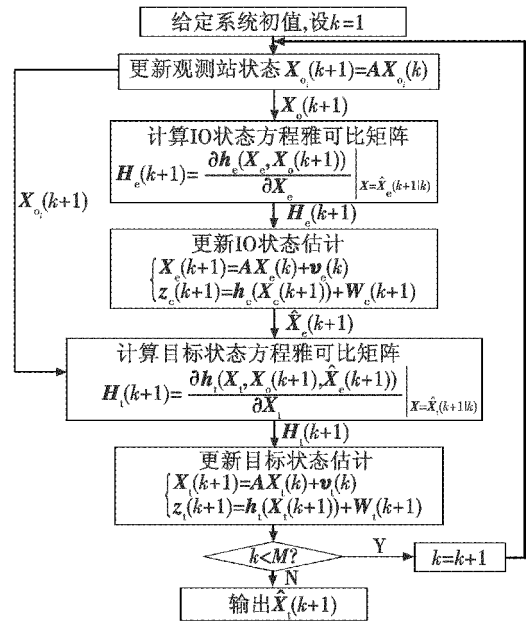


图2 M步循环的目标跟踪流程图

Fig. 2 Flow chart for M-step loop of target tracking

图2中，雅可比矩阵 $\mathbf{H}_e(k+1)$ 形式为：

$$\mathbf{H}_e(k+1) = \begin{pmatrix} y_{o_1} - y_e & x_e - x_{o_1} & 0 & 0 \\ \rho_{eo_1} & \rho_{eo_1} & & \\ y_{o_2} - y_e & x_e - x_{o_2} & 0 & 0 \\ \rho_{eo_2} & \rho_{eo_2} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{o_N} - y_e & x_e - x_{o_N} & 0 & 0 \\ \rho_{eo_N} & \rho_{eo_N} & & \end{pmatrix}_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_e(k+1|k)},$$

$\rho_{eo_i}$ 为第*i*个观测站与IO之间的距离；雅可比矩阵

$$H_1(k+1) = \begin{pmatrix} \frac{x_t - \hat{x}_e}{\hat{\rho}_{te}} + \frac{x_t - x_{o1}}{\rho_{to1}} & \frac{y_t - \hat{y}_e}{\hat{\rho}_{te}} + \frac{y_t - y_{o1}}{\rho_{to1}} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_t - \hat{x}_e}{\hat{\rho}_{te}} + \frac{x_t - x_{oN}}{\rho_{toN}} & \frac{y_t - \hat{y}_e}{\hat{\rho}_{te}} + \frac{y_t - y_{oN}}{\rho_{toN}} & 0 & 0 \\ -\frac{f_c}{c} \left( \frac{a_1}{\rho_{to1}^3} + \frac{b_1}{\hat{\rho}_{te}^3} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{c_1}{\rho_{to1}^3} + \frac{d_1}{\hat{\rho}_{te}^3} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{x_t - x_{o1}}{\rho_{to1}} + \frac{x_t - \hat{x}_e}{\hat{\rho}_{te}} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{y_t - y_{o1}}{\rho_{to1}} + \frac{y_t - \hat{y}_e}{\hat{\rho}_{te}} \right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{f_c}{c} \left( \frac{a_N}{\rho_{toN}^3} + \frac{b_N}{\hat{\rho}_{te}^3} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{c_N}{\rho_{toN}^3} + \frac{d_N}{\hat{\rho}_{te}^3} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{x_t - x_{oN}}{\rho_{toN}} + \frac{x_t - \hat{x}_e}{\hat{\rho}_{te}} \right) & -\frac{f_c}{c} \left( \frac{y_t - y_{oN}}{\rho_{toN}} + \frac{y_t - \hat{y}_e}{\hat{\rho}_{te}} \right) \end{pmatrix}_{X=\hat{X}(k+1)}$$

其中:  $\hat{x}_e$  和  $\hat{y}_e$  为 IO 状态估计  $\hat{X}_e(k+1)$  中的位置估计;  $\hat{\rho}_{te} = \sqrt{(\hat{x}_e - x_t)^2 + (\hat{y}_e - y_t)^2}$  为目标与 IO 间的距离;  $\rho_{to_i}$  为第  $i$  个观测站与目标间的距离。  $a_i, b_i, c_i$  和  $d_i$  的算式分别为

$$a_i = \rho_{to_i}^2 v_{x_{o_i}} - r_{o_i t}^T v_{o_i t} x_{to_i} \quad (9)$$

$$b_i = \hat{\rho}_{te}^2 v_{y_{o_i}} - r_{te}^T v_{te} x_{te} \quad (10)$$

$$c_i = \rho_{to_i}^2 v_{y_{o_i}} - r_{o_i t}^T v_{o_i t} y_{to_i} \quad (11)$$

$$d_i = \hat{\rho}_{te}^2 v_{y_{te}} - r_{te}^T v_{te} y_{te} \quad (12)$$

式中:  $v_{x_{o_i}} = v_{x_i} - v_{x_{o_i}}, v_{y_{o_i}} = v_{y_i} - v_{y_{o_i}}, v_{x_{te}} = v_{x_t} - v_{x_e}, v_{y_{te}} = v_{y_t} - v_{y_e}; r_{o_i t} = r_{o_i} - r_t, r_{te} = r_t - r_e, v_{o_i t} = v_{o_i} - v_t, v_{te} = v_t - v_e; x_{to_i} = x_t - x_{o_i}, x_{te} = x_t - x_e, y_{to_i} = y_t - y_{o_i}, y_{te} = y_t - y_e。$

### 3 仿真实验

本章通过仿真实验量化分析 IO 信号频率、系统量测误差和舰载观测站编队方式对目标跟踪精度的影响,验证模型的有效性和先进性。仿真场景设置为:3 个舰载机动观测站以相同速度  $\|v_{o_i}\|_2 = 15 \text{ m/s}$  按照图 3a 所示的编队方式 1 沿  $x$  轴正半轴航行,其初始位置分别为  $r_{o_1}(0) = (0 \ 0)^T, r_{o_2}(0) = (-1 \ 0)^T$  和  $r_{o_3}(0) = (-2 \ 0)^T$  (单位 km);舰载 IO 沿  $x$  轴负半轴航行,目标以角度  $\theta_t = -150^\circ$  航行,两者速度分别为  $\|v_e\|_2 = 15 \text{ m/s}$  和  $\|v_t\|_2 = 35 \text{ m/s}$ ,初始位置估计分别为  $\hat{r}_t(0) = (40\sqrt{3} \ -40)^T$  和  $\hat{r}_e(0) = (40\sqrt{3} \ 40)^T$  (单位 km)。假设所有观测站的同种量测误差大小相等,过程噪声参数  $p_t = p_e = 0.1$ ,初始状态估计误差协方差矩阵为  $P_t(0) = P_e(0) = \text{diag}(10^2 \ 10^2 \ 10 \ 10)$ ,系统采样间隔  $T = 1 \text{ s}$ 。

每个实验做 1500 次蒙特卡罗仿真。目标位置和  $x$  轴方向速度、 $y$  轴方向速度的均方根误差 (RMSE) 分别定义为

$$E_{\text{RMSE}}(X) = \sqrt{\frac{1}{1500} \sum_{n=1}^{1500} [(\hat{x}_n - x_t)^2 + (\hat{y}_n - y_t)^2]} \quad (13)$$

$$E_{\text{RMSE}}(v_x) = \sqrt{\frac{1}{1500} \sum_{n=1}^{1500} (\hat{v}_{x_n} - v_{x_t})^2} \quad (14)$$

$$E_{\text{RMSE}}(v_y) = \sqrt{\frac{1}{1500} \sum_{n=1}^{1500} (\hat{v}_{y_n} - v_{y_t})^2} \quad (15)$$

式中:  $\hat{x}_n$  和  $\hat{y}_n$  分别为目标  $x$  轴坐标  $x_t$  和  $y$  轴坐标  $y_t$  在第  $n$  次蒙特卡罗仿真中的估计值;  $\hat{v}_{x_n}$  和  $\hat{v}_{y_n}$  分别为目标  $x$  轴方向速度  $v_{x_t}$  和  $y$  轴方向速度  $v_{y_t}$  在第  $n$  次蒙特卡罗仿真中的估计值。

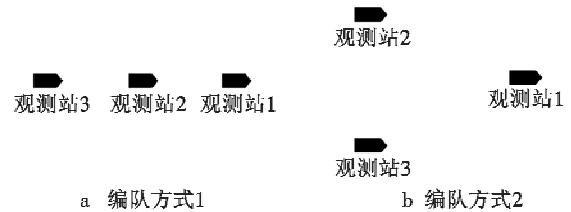
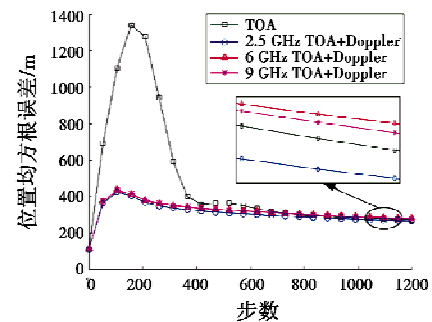


图3 不同编队方式下观测站平面分布图

Fig. 3 The observer's planar geometries for different formation modes

#### 3.1 IO 信号频率对目标跟踪精度的影响 (仿真 1)

仿真 1 分析不同 IO 信号频率对目标状态估计精度的影响,并统计 RMSE 作为评价指标。设置 AOA 量测误差  $\{w_{o_i}\}_{i=1}^3 = 0.1^\circ$ ,多普勒频率量测误差  $\{w_{f_i}\}_{i=1}^3 = 0.1 \text{ Hz}$ ,距离和量测误差  $\{w_{l_i}\}_{i=1}^3 = 500 \text{ m}$ ,令 IO 信号频率  $f_c$  分别为 2.5 GHz, 6 GHz 和 9 GHz,仿真结果见图 4。



a 目标位置估计误差

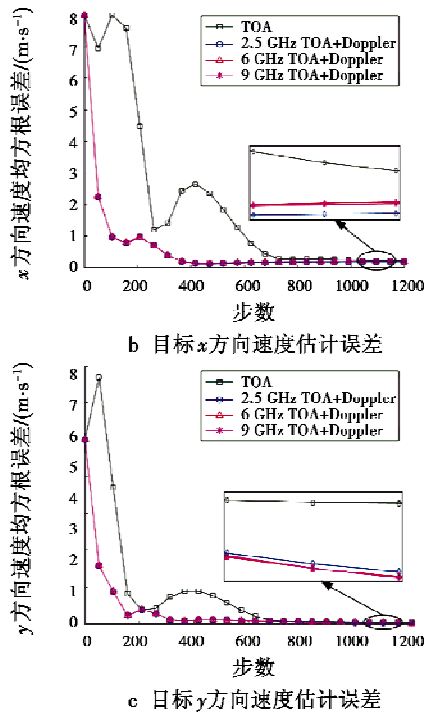


图4 IO 信号频率对目标跟踪精度的影响  
Fig.4 The target tracking accuracy under different IO frequencies

从图4中可以看出,本文提出的方法相比于仅利用TOA作为目标观测量的方法,能够大幅缩减误差收敛时间,目标位置和速度状态的估计精度得到了有效提高;相比较来说,IO信号频率较低时能够获得更好的目标状态估计精度。

### 3.2 AOA 量测误差对目标跟踪精度的影响(仿真2)

仿真2分析IO量测误差对目标跟踪精度的影响。设置IO信号频率 $f_c = 6$  GHz,多普勒频率量测误差 $\{w_{f_i}\}_{i=1}^3 = 5$  Hz,距离和量测误差 $\{w_{l_i}\}_{i=1}^3 = 100$  m,令AOA量测误差 $\{w_{\alpha_i}\}_{i=1}^3$ 分别为 $0.1^\circ, 0.5^\circ$ 和 $1^\circ$ ,其余参数保持不变,仿真结果如图5所示。

从图5中可以看出,随着AOA量测误差的逐渐增大,目标位置和速度的估计精度在跟踪前期会下降,但随着观测时间的增加,两者的误差会逐渐收敛至较低的水平。这说明,IO量测误差对目标跟踪精度的影响主要体现在跟踪前期,随着跟踪步数的增加,系统对IO的跟踪逐渐稳定,这种误差对目标状态估计的影响会逐渐减小。此外,目标y方向速度估计误差的波动明显小于x方向,这是因为根据目标和观测站的运动模型,目标在x轴上的运动分量与观测站相对变化较快,致使目标速度估计误差波动较大。

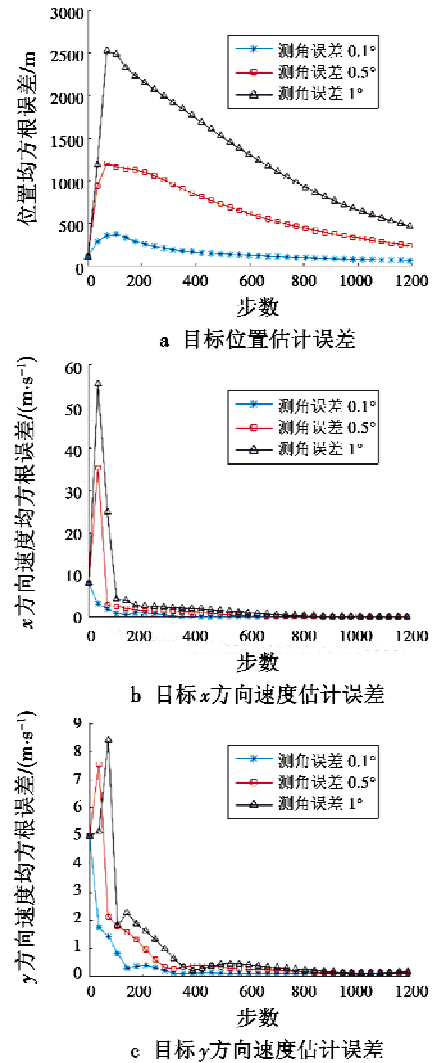


图5 AOA 量测误差对目标跟踪精度的影响  
Fig.5 The target tracking accuracy under different AOA measurement errors

### 3.3 距离和量测误差对目标跟踪精度的影响(仿真3)

仿真3分析目标观测量中距离和量测误差对目标跟踪精度的影响。设置IO信号频率 $f_c = 6$  GHz,多普勒频率量测误差 $\{w_{f_i}\}_{i=1}^3 = 1$  Hz, AOA量测误差 $\{w_{\alpha_i}\}_{i=1}^3 = 0.1^\circ$ ,令距离和量测误差 $\{w_{l_i}\}_{i=1}^3$ 分别为150 m,300 m和500 m,其余参数保持不变,仿真结果如图6所示。

从图6中可以看出,距离和量测误差对目标的速度估计基本不产生影响,而对目标的位置估计影响较严重。当距离和量测误差增大时,目标位置的估计精度将急剧下降。与图5a不同的是,由于距离和量测误差直接影响目标的状态估计,导致当量测误差增大时,目标位置的估计误差无法收敛至相对较低的水平。

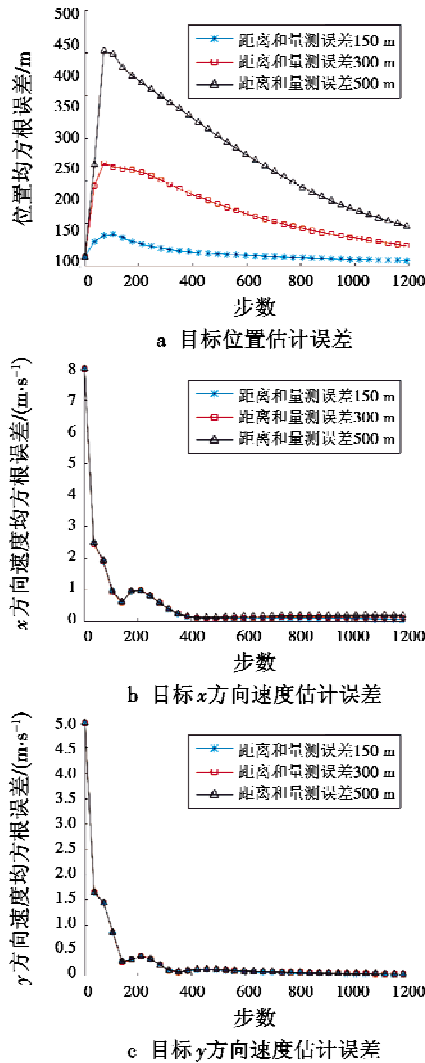


图6 距离和量测误差对目标跟踪精度的影响  
Fig. 6 The target tracking accuracy under different distance sum measurement errors

### 3.4 多普勒频率量测误差对目标跟踪精度的影响 (仿真4)

仿真4分析目标观测量中多普勒频率的量测误差对目标跟踪精度的影响,设置IO信号频率 $f_c = 2.5$  GHz, AOA测量误差 $\{w_{\alpha_i}\}_{i=1}^3 = 0.1^\circ$ ,距离和量测误差 $\{w_{r_i}\}_{i=1}^3 = 500$  m,令多普勒频率量测误差分别为0.2 Hz, 1 Hz和5 Hz,其余参数保持不变,仿真结果如图7所示。

从结果可知,与图6相比,多普勒频率量测误差主要影响目标的速度估计,对目标位置估计的影响相对较小。因此,在本文提出的模型中,目标位置的估计精度主要受距离和量测误差影响,而目标速度的估计精度则取决于系统的多普勒频率量测误差。

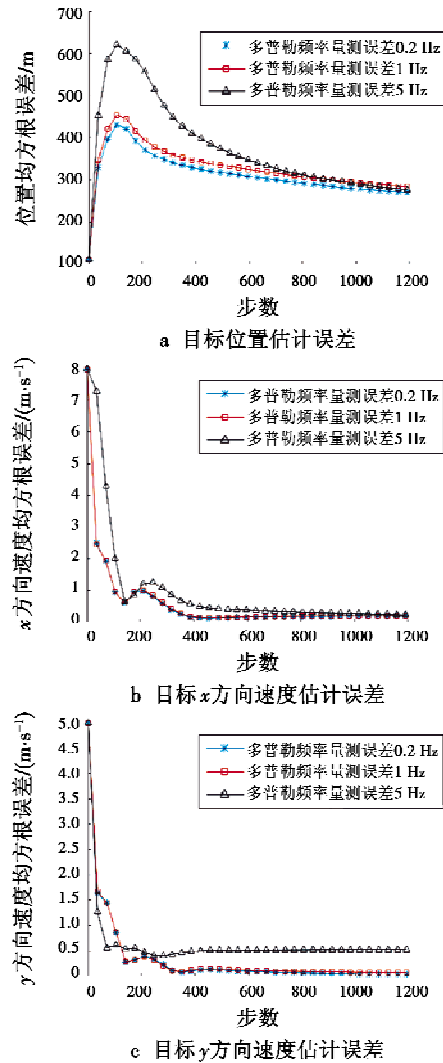


图7 多普勒频率量测误差对目标跟踪精度的影响  
Fig. 7 The target tracking accuracy under different Doppler frequency measurement errors

### 3.5 舰载观测站不同编队方式对目标跟踪精度的影响 (仿真5)

仿真5分析舰载观测站的编队布局对目标跟踪精度的影响。假设3个舰载观测站按图3b所示编队方式2编队航行,其初始位置分别为 $r_{o_1}(0) = (0 \ 0)^T$ ,  $r_{o_2}(0) = (-0.5\sqrt{3} \ 0.5)^T$ 和 $r_{o_3}(0) = (-0.5\sqrt{3} \ -0.5)^T$  (单位km)。在图3的两种编队方式下分别设置IO信号频率 $f_c = 6$  GHz,多普勒频率量测误差 $\{w_{f_i}\}_{i=1}^3 = 1$  Hz, AOA量测误差 $\{w_{\alpha_i}\}_{i=1}^3 = 0.1^\circ$ ,距离和量测误差 $\{w_{r_i}\}_{i=1}^3 = 500$  m,其余仿真条件不变,结果如图8所示。

从图8中可以看出,编队方式2下的舰载观测站布局对目标状态的估计精度更高,这要求在实际作战

中尽量选择布局较为理想的舰载观测站编队方式。

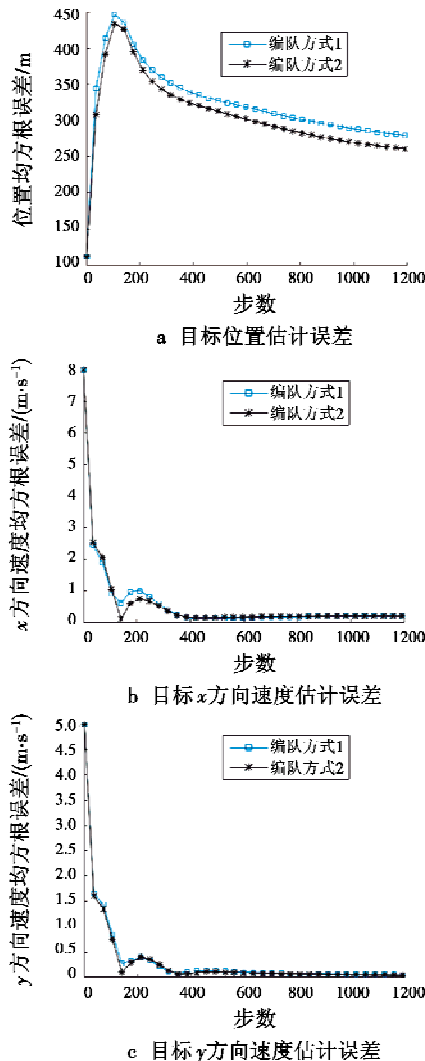


图8 舰载观测站编队方式对目标跟踪精度的影响  
Fig.8 The target tracking accuracy under different shipborne observer formation modes

#### 4 运算量分析

假设每个观测站包含多个天线和与之匹配的通道,其系统信号流程如图9所示。

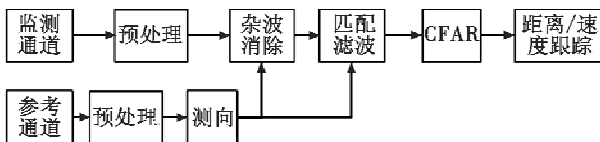


图9 信号处理流程图  
Fig.9 Flow chart of signal processing

直达波和目标回波信号分别由参考通道和监测通道进入,并进行一定的预处理,在参考通道完成对IO信号方向的估计。接着,经过处理的直达波信号将被用来消除监测通道中的杂波和干扰,并与较纯净的目

标回波信号进行互相关处理,通过恒虚警概率的检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)完成对目标的距离和速度跟踪。

只考虑 AOA, TOA 和多普勒频率 3 种观测量的运算复杂度,忽略其他影响。图 9 中获得 IO 信号 AOA 的方法有很多种,如幅法、相位于干涉仪法和空间谱估计法等。假设系统采用阵列天线,阵元数为  $M$ ,快拍数为  $N$ ,信源数为  $P$ ,利用文献[15]中的加权特征方程法(Characteristic Equation-Based Method, CEM)估计 IO 的信号方向,运算量为  $O_{AOA} = O(M^2N) + MP(P+1) + O(P^3)$ ; TOA 和多普勒频率观测量则是在匹配滤波阶段获得,假设系统采样点数为  $N_s$ ,则运算量为  $O_m = N_s \ln(2^{N_s})$ 。目前已有大量文献对匹配滤波阶段的算法进行了改进,大大缩减了运算量,如文献[16],这里不再赘述。因此,每个观测站获取 3 种观测量的运算量约为  $O_s = O_{AOA} + O_m$ 。

#### 5 结束语

本文提出一种基于机动观测站和机动 IO 的 PCLS 目标跟踪模型。针对仅利用 TOA 观测量的 PCLS 目标状态估计精度不足的问题,提出了一种基于联合 TOA 和多普勒频率观测量的无源跟踪方法,通过 EKF 进行数据融合,实现对目标和 IO 的同时跟踪。量化分析了 IO 信号频率、系统量测误差和舰载观测站编队方式对目标跟踪精度的影响,结果表明:本文提出的模型能够有效提高目标整体的状态估计精度,大幅缩减误差收敛时间,且在 IO 信号频率较低时获得更好的跟踪精度;IO 量测误差对目标跟踪精度的影响会随着观测时间的增加而逐渐减小,目标量测误差是影响跟踪精度的主要因素;目标的速度估计精度主要取决于多普勒频率量测误差,而位置估计精度主要受距离和量测误差的影响;合理选择 IO 的信号频率和观测站编队方式可以有效提升目标的跟踪精度。

#### 参考文献

- [1] CHABRIEL G, BARRÉRE J. Adaptive target detection techniques for OFDM-based passive radar exploiting spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65 (22): 5873-5884.
- [2] TONG C, INGS M, MAASDORP F. Performance improvements using the separated reference configuration for a multi-static FM broadcast band radar system[C]//International Conference on Radar, IEEE, 2013: 224-229.
- [3] FABRIZIO G, COLONE F, LOMBARDO P, et al. Adaptive beamforming for high-frequency over-the-horizon passive radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2009, 3(4): 384-405.

占位,在位置  $W_1$  发射 2 枚导弹,保持平飞至  $W_2$  结束导弹中段制导指令校正;接下来,对剩余目标,确定首要攻击目标为  $T_4$ ,可同时攻击目标  $T_1$ ,引导我机在  $W_3$  发射 2 枚导弹,而后保持平飞至  $W_4$  结束导弹中段制导指令校正,完成对 4 个目标的攻击。从攻击过程航线可以看出,本文提出的决策方法确保了对首要危险目标的攻击,同时兼顾其他目标并尽可能迎头以较小进入角攻击目标,攻击航线合理,符合设计目标。

### 3 结束语

新型战机的隐身多目标攻击是热点问题,也是一个复杂的问题,本文给出了一种预警机引导新型战机进行单机多目标攻击的占位决策、航线求解的思路和方法。仿真结果表明,预警机引导单机多目标攻击,可充分利用预警机的情报与指控优势,提高攻击决策的预见性,增加隐身攻击的突然性,对于提升单机多目标攻击的效果具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 王海青. 飞机多目标攻击试验探讨[J]. 飞机设计, 2006(2):72-77.
- [2] 王红,高晓光,何建华. 多目标攻击中的飞机操纵[J]. 西北工业大学学报,1997,15(2):273-277.
- [3] 蓝伟华. 空对空多目标攻击载机攻击航线求解逻辑[J]. 电光与控制,2007,14(3):16-18.
- [4] 赵磊,李仁松,常国任. 预警机引导战斗机空战目标分配模型[J]. 指挥控制与仿真,2008,30(5):34-36.
- [5] 祁炜,李侠,蔡万勇,等. 空袭中预警机阵位选择及航线规划[J]. 火力与指挥控制,2016,41(12):64-68.
- [6] 李永宾,张凤鸣,李俊涛. 基于组合赋权方法的多目标攻击排序[J]. 火力与指挥控制,2006,31(9):37-42.
- [7] 谢希权,李伟仁. 单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(7):28-31.
- [8] 兰俊龙,赵思宏,寇英信,等. 多机协同多目标攻击空战战术决策[J]. 电光与控制,2010,17(12):17-19.
- [9] 王丕宏,姜长生,杨承. 歼击机空战占位的模糊神经网络方法[J]. 电光与控制,2001,8(3):21-25.
- [10] 蒲小勃,缪炜星. 超视距空战中机载雷达的使用策略研究[J]. 电光与控制,2012,19(6):1-4.
- [11] LI S, ZENG T, LONG T, et al. Maneuvering target tracking based on multistatic system Doppler measurements [C]//International Conference on Signal Processing, IEEE, 2002:1484-1487.
- [12] EHRMAN L M, LANTERMAN A D. Extended Kalman filter for estimating aircraft orientation from velocity measurements [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2(1):12-16.
- [13] 李红伟,王俊,刘玉春. 粒子滤波和多站 TOA 的外辐射源雷达跟踪方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(11):2263-2267.
- [14] BECKER K. Three-dimensional target motion analysis using angle and frequency measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1):284-301.
- [15] 林文凤. 阵列快速 DOA 估计算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [16] ROGOZHNIKOVA V, POKAMESTOV D A, ABENOV R R. Decrease in the computational complexity of the signal processing algorithms for passive radars using the signals of illuminators of opportunity [C]//International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, IEEE, 2016:168-172.
- (上接第 35 页)
- [4] OLSEN K E, ASEN W. Bridging the gap between civilian and military passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 32(2):4-12.
- [5] WANG F, LI H, ZHANG X, et al. Signal parameter estimation for passive bistatic radar with waveform correlation exploitation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3):1135-1150.
- [6] SCHUPBACH C, O'HAGAN D W, PAINE S. Electronic attacks on DVB-T-based passive radar system [C]//IEEE Radar Conference(RadarConf18), 2018:417-422.
- [7] O'HAGAN D W, SETSUBI M, PAINE S. Signal reconstruction of DVB-T2 signals in passive radar[C]//IEEE Radar Conference(RadarConf18), 2018:1111-1116.
- [8] SANTI F, PIERALICE F, PASTINA D. Multistatic GNSS-based passive radar for maritime surveillance with long integration times: experimental results [C]//IEEE Radar Conference (RadarConf18), 2018:1260-1265.
- [9] 石林艳,蒋柏峰,王宏,等. 非合作探测技术与电子侦察技术的综合应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017,12(4):383-388.
- [10] 万显荣,梁龙,但阳鹏,等. 移动平台外辐射源雷达实验研究[J]. 电波科学学报,2015,30(2):383-390.