



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102183754 B

(45) 授权公告日 2012. 07. 25

(21) 申请号 201110051200. 6

(22) 申请日 2011. 03. 03

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路  
38 号

(72) 发明人 刘兴高 闫正兵

(74) 专利代理机构 杭州天正专利事务所有限公  
司 33201

代理人 王兵 王利强

(51) Int. Cl.

G01S 7/41 (2006. 01)

G06F 19/00 (2011. 01)

(56) 对比文件

WO 2008/112361 A2, 2008. 09. 18, 全文 .

CN 101806887 A, 2010. 08. 18, 全文 .

CN 101881826 A, 2010. 11. 10, 全文 .

CN 101887119 A, 2010. 11. 17, 全文 .

CN 101140324 A, 2008. 03. 12, 全文 .

郭锦成 . 对海雷达目标检测性能测试方  
法 . 《舰船电子对抗》. 2010, 第 33 卷 (第 2 期),  
第 70-71, 75 页 .

审查员 经志军

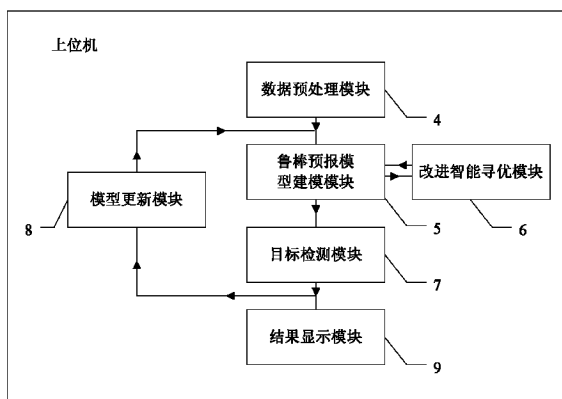
权利要求书 4 页 说明书 10 页 附图 1 页

(54) 发明名称

一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统及方法

(57) 摘要

一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统,包括  
雷达、数据库以及上位机 ;雷达、数据库和上位机  
依次相连,所述雷达对所检测海域进行照射,并将  
雷达海杂波数据储存到所述的数据库,所述的上  
位机包括数据预处理模块、鲁棒预报模型建模模  
块、改进智能寻优模块、目标检测模块、模型更新  
模块以及结果显示模块。以及提出了一种鲁棒智  
能雷达海上目标检测方法。本发明提供一种具有  
鲁棒性、避免人为因素影响、智能性高的智能雷  
达海上目标检测系统和方法。



1. 一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统,包括雷达、数据库以及上位机,雷达、数据库和上位机依次相连,其特征在于:所述雷达对所检测海域进行照射,并将雷达海杂波数据储存在所述的数据库,所述的上位机包括:

数据预处理模块,用以进行雷达海杂波数据预处理,采用如下过程完成:

1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本,  $i = 1, \dots, N$ ;

2) 对训练样本进行归一化处理,得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ :

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

其中,  $\min x$  表示训练样本中的最小值,  $\max x$  表示训练样本中的最大值;

3) 将归一化后的训练样本重构,分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ :

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \dots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \dots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \dots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_M \end{bmatrix}$$

其中,  $D$  表示重构维数,  $D$  为自然数,且  $D < N$ ,  $D$  的取值范围为 50-70;

鲁棒预报模型建模模块,用以建立预报模型,采用如下过程完成:

将得到的  $X$ 、 $Y$  代入如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

其中  $V_y = \text{diag}\left\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\right\}$

权重因子  $v_i$  由下式计算:

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $\hat{s}$  是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计,  $c_1, c_2$  为常量;

求解得待估计函数  $f(x)$ :

$$f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\| / \theta^2) + b^*$$

其中,  $M$  是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$ , 上标  $T$  表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M, b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\| / \theta^2)$  均为支持向量机的核函

数,  $x_j$  为第  $j$  个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数,  $x$  表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数; 改进智能寻优模块, 用以采用进化遗传算法对预报模型的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化, 采用如下过程完成:

5. 1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码;
5. 2) 随机产生初始种群;
5. 3) 计算每个个体的适应度, 并判断是否符合算法终止条件, 若符合, 输出最佳个体及其代表的最优解, 并结束计算, 否则继续迭代;
5. 4) 采用正态分布概率选择个体;
5. 5) 通过单点线性交叉产生新个体;
5. 6) 通过均匀变异方式产生新个体;
5. 7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优;
5. 8) 产生的新一代种群, 返回 5. 3) 进行迭代;

其中, 初始种群大小为 50-200, 最大代数 50-300, 最佳个体选择概率为 0. 05-0. 1, 交叉概率为 0. 5-0. 9, 变异概率为 0. 001-0. 01, 个体适应度选择模型的泛化均方根误差, 终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变;

目标检测模块, 用以进行目标检测, 采用如下过程完成:

1) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ,  $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值,  $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值;

2) 进行归一化处理;

$$\overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

3) 代入预报模型建模模块得到的待估计函数  $f(x)$  计算得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值;

4) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ , 计算控制限  $Q_\alpha$  :

$$Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$\theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, i=1, 2, 3$$

$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2^2}$$

其中,  $\alpha$  是置信度,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, h_0$  是中间变量,  $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方,  $k$  是样本维数,  $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计;

5) 进行检测判断: 当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_\alpha$  时, 该点存在目标, 否则没有目标。

2. 如权利要求 1 所述的鲁棒智能雷达海上目标检测系统, 其特征在于: 所述上位机还包括: 判别模型更新模块, 用以按设定的采样时间间隔采集数据, 将得到的实测数据与模型预报值比较, 如果相对误差大于 10%, 则将新数据加入训练样本数据, 更新预报模型。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的鲁棒智能雷达海上目标检测系统, 其特征在于: 所述上位机还包括: 结果显示模块, 用以将目标检测模块的检测结果显示在上位机显示。

4. 一种如权利要求 1 所述的鲁棒智能雷达海上目标检测系统所使用的雷达海上目标

检测方法,其特征在于:所述的方法包括以下步骤:

- (1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本,  $i = 1, \dots, N$ ;
- (2) 对训练样本进行归一化处理,得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ :

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

其中,  $\min x$  表示训练样本中的最小值,  $\max x$  表示训练样本中的最大值;

- (3) 将归一化后的训练样本重构,分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ :

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \cdots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \cdots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}$$

其中,  $D$  表示重构维数,  $D$  为自然数,且  $D < N$ ,  $D$  的取值范围为 50-70;

- (4) 将得到的  $X$ 、 $Y$  代入如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

其中  $V_\gamma = \text{diag}\left\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\right\}$

权重因子  $v_i$  由下式计算:

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $\hat{s}$  是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计,  $c_1, c_2$  为常量;

求解得待估计函数  $f(x)$ :

$$f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\| / \theta^2) + b^*$$

其中,  $M$  是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$ , 上标  $T$  表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M$ ,  $j = 1, \dots, M$ ,  $b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\| / \theta^2)$  均为支持向量机的核函数,  $x_j$  为第  $j$  个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数,  $x$  表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数;

- (5) 用进化遗传算法对步骤 (4) 的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化,采用如下过程完成:

5.1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码;

5.2) 随机产生初始种群；

5.3) 计算每个个体的适应度，并判断是否符合算法终止条件，若符合，输出最佳个体及其代表的最优解，并结束计算，否则继续迭代；

5.4) 采用正态分布概率选择个体；

5.5) 通过单点线性交叉产生新个体；

5.6) 通过均匀变异方式产生新个体；

5.7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优；

5.8) 产生的新一代种群，返回 5.3) 进行迭代；

其中，初始种群大小为 50-200，最大代数 50-300，最佳个体选择概率为 0.05-0.1，交叉概率为 0.5-0.9，变异概率为 0.001-0.01，个体适应度选择模型的泛化均方根误差，终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变；

(6) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ， $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值， $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值；

(7) 进行归一化处理；

$$\overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

(8) 代入步骤 (4) 得到的待估计函数  $f(x)$  计算得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值；

(9) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ ，计算控制限  $Q_\alpha$ ：

$$Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$\theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, i=1,2,3$$

$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2}$$

其中， $\alpha$  是置信度， $\theta_1$ ， $\theta_2$ ， $\theta_3$ ， $h_0$  是中间变量， $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方， $k$  是样本维数， $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计；

(10) 进行检测判断：当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_\alpha$  时，该点存在目标，否则没有目标。

5. 如权利要求 4 所述的雷达海上目标检测方法，其特征在于：所述的方法还包括：

(11)、按设定的采样时间间隔采集数据，将得到的实测数据与模型预报值比较，如果相对误差大于 10%，则将新数据加入训练样本数据，更新预报模型。

6. 如权利要求 4 或 5 所述的雷达海上目标检测方法，其特征在于：在所述的步骤 (10) 中，将目标检测模块的检测结果显示在上位机显示。

## 一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及雷达数据处理领域,特别地,涉及一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统及方法。

### 背景技术

[0002] 海杂波,即来自于海面的雷达后向散射回波。近几十年来,随着对海杂波认识的深入,德国、挪威等国家相继尝试利用雷达观测海杂波获取雷达海浪图像来反演海浪信息,以获得关于海洋状态的实时信息,如海浪的波高、方向和周期等,从而进一步对海上微小目标进行检测,这对海上活动具有十分重要的意义。

[0003] 海上目标检测技术具有重要的地位,提供准确的目标判决是对海雷达工作的重要任务之一。雷达自动检测系统依据判决准则在给定的检测阈值下做出判决,而强海杂波往往成为微弱目标信号的主要干扰。如何处理海杂波将直接影响到雷达在海洋环境下的检测能力:1) 识别导航浮标、小片的冰,漂浮在海面的油污,这些可能会对导航带来潜在的危机;2) 监测非法捕鱼是环境监测的一项重要任务。

[0004] 在传统的目标检测时,海杂波被认为是干扰导航的一种噪声被去掉。然而,在雷达对海观测目标时,微弱的运动目标回波常常湮没在海杂波中,信杂比较低,雷达不易检测到目标,同时海杂波的大量尖峰还会造成严重虚警,对雷达的检测性能产生较大影响。对于各种对海警戒和预警雷达而言,研究的主要目标是提高海杂波背景下目标的检测能力。因此,不仅具有重要的理论意义和实际意义,而且也是国内外海上目标检测的难点和热点。

### 发明内容

[0005] 为了克服已有雷达海上目标检测方法鲁棒性不高、易受人为因素影响、智能性不足的缺点,本发明提供一种具有鲁棒性、避免人为因素影响、智能性高的智能雷达海上目标检测系统及方法。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0007] 一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统,包括雷达、数据库以及上位机,雷达、数据库和上位机依次相连,所述雷达对所检测海域进行照射,并将雷达海杂波数据储存到所述的数据库,所述的上位机包括:

[0008] 数据预处理模块,用以进行雷达海杂波数据预处理,采用如下过程完成:

[0009] 1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本,  $i = 1, \dots, N$ ;

[0010] 2) 对训练样本进行归一化处理,得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ :

$$[0011] \quad \bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

[0012] 其中,  $\min x$  表示训练样本中的最小值,  $\max x$  表示训练样本中的最大值;

[0013] 3) 将归一化后的训练样本重构,分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ ;

[0014]

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \cdots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \cdots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$[0015] \quad Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}$$

[0016] 其中, D 表示重构维数, D 为自然数, 且  $D < N$ , D 的取值范围为 50-70 ;

[0017] 鲁棒预报模型建模模块, 用以建立预报模型, 采用如下过程完成 :

[0018] 将得到的 X、Y 代入如下线性方程 :

$$[0019] \quad \begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

[0020] 其中  $V_\gamma = \text{diag}\left\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\right\}$ [0021] 权重因子  $v_i$  由下式计算 :

[0022]

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

[0023] 其中  $\hat{s}$  是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计,  $c_1, c_2$  为常量 ;[0024] 求解得待估计函数  $f(x)$  :

$$[0025] \quad f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\| / \theta^2) + b^*$$

[0026] 其中, M 是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|x_i - x_j\| / \theta^2)$ , 上标 T 表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M$ ,  $b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\| / \theta^2)$  均为支持向量机的核函数,  $x_j$  为第 j 个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数, x 表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数 ;

[0027] 改进智能寻优模块, 用以采用进化遗传算法对预报模型的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化, 采用如下过程完成 :[0028] 5.1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码 ;

[0029] 5.2) 随机产生初始种群 ;

[0030] 5.3) 计算每个个体的适应度, 并判断是否符合算法终止条件, 若符合, 输出最佳个体及其代表的最优解, 并结束计算, 否则继续迭代 ;

[0031] 5.4) 采用正态分布概率选择个体 ;

[0032] 5.5) 通过单点线性交叉产生新个体 ;

[0033] 5.6) 通过均匀变异方式产生新个体；

[0034] 5.7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优；

[0035] 5.8) 产生的新一代种群,返回 5.3) 进行迭代；

[0036] 其中,初始种群大小为 50-200,最大代数 50-300,最佳个体选择概率为 0.05-0.1,交叉概率为 0.5-0.9,变异概率为 0.001-0.01,个体适应度选择模型的泛化均方根误差,终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变；

[0037] 目标检测模块,用以进行目标检测,采用如下过程完成：

[0038] 1) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ,  $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值,  $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值；

[0039] 2) 进行归一化处理；

$$[0040] \quad \overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

[0041] 3) 代入预报模型建模模块得到的待估计函数  $f(x)$  计算得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值；

[0042] 4) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ , 计算控制限  $Q_\alpha$ ：

$$[0043] \quad Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$[0044] \quad \theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, i = 1, 2, 3$$

$$[0045] \quad h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2}$$

[0046] 其中,  $\alpha$  是置信度,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, h_0$  是中间变量,  $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方,  $k$  是样本维数,  $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计；

[0047] 5) 进行检测判断:当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_\alpha$  时,该点存在目标,否则没有目标。

[0048] 作为优选的一种方案:所述上位机还包括:判别模型更新模块,用以按设定的采样时间间隔采集数据,将得到的实测数据与模型预报值比较,如果相对误差大于 10%,则将新数据加入训练样本数据,更新预报模型。

[0049] 作为优选的另一种方案:所述上位机还包括:结果显示模块,用以将目标检测模块的检测结果显示在上位机显示。

[0050] 一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统所使用的雷达海上目标检测方法,所述的方法包括以下步骤：

[0051] (1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本,  $i = 1, \dots, N$ ；

[0052] (2) 对训练样本进行归一化处理,得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ ：

$$[0053] \quad \bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

[0054] 其中,  $\min x$  表示训练样本中的最小值,  $\max x$  表示训练样本中的最大值；

[0055] (3) 将归一化后的训练样本重构,分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ ：



[0056]

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \cdots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \cdots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$[0057] \quad Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}$$

[0058] 其中, D 表示重构维数, D 为自然数, 且  $D < N$ , D 的取值范围为 50-70 ;

[0059] (4) 将得到的 X、Y 代入如下线性方程 :

$$[0060] \quad \begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

[0061] 其中  $V_\gamma = \text{diag}\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\}$ [0062] 权重因子  $v_i$  由下式计算 :

[0063]

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

[0064] 其中  $\hat{s}$  是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计,  $c_1, c_2$  为常量 ;[0065] 求解得待估计函数  $f(x)$  :

$$[0066] \quad f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\| / \theta^2) + b^*$$

[0067] 其中, M 是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|x_i - x_j\| / \theta^2)$ , 上标 T 表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M$ ,  $b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| / \theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\| / \theta^2)$  均为支持向量机的核函数,  $x_j$  为第 j 个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数, x 表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数 ;

[0068] (5) 用进化遗传算法对步骤 (4) 的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化, 采用如下过程完成 :

[0069] 5.1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码 ;

[0070] 5.2) 随机产生初始种群 ;

[0071] 5.3) 计算每个个体的适应度, 并判断是否符合算法终止条件, 若符合, 输出最佳个体及其代表的最优解, 并结束计算, 否则继续迭代 ;

[0072] 5.4) 采用正态分布概率选择个体 ;

[0073] 5.5) 通过单点线性交叉产生新个体 ;

[0074] 5.6) 通过均匀变异方式产生新个体 ;

[0075] 5.7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优；

[0076] 5.8) 产生的新一代种群,返回 5.3) 进行迭代；

[0077] 其中,初始种群大小为 50-200,最大代数 50-300,最佳个体选择概率为 0.05-0.1,交叉概率为 0.5-0.9,变异概率为 0.001-0.01,个体适应度选择模型的泛化均方根误差,终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变；

[0078] (6) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ,  $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值,  $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值；

[0079] (7) 进行归一化处理；

$$[0080] \quad \overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

[0081] (8) 代入步骤 (4) 得到的待估计函数  $f(x)$  计算得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值；

[0082] (9) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ , 计算控制限  $Q_\alpha$ ：

$$[0083] \quad Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$[0084] \quad \theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, i = 1, 2, 3$$

$$[0085] \quad h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2}$$

[0086] 其中,  $\alpha$  是置信度,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, h_0$  是中间变量,  $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方,  $k$  是样本维数,  $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计；

[0087] (10) 进行检测判断:当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_\alpha$  时,该点存在目标,否则没有目标。

[0088] 作为优选的一种方案:所述的方法还包括：

[0089] (11)、按设定的采样时间间隔采集数据,将得到的实测数据与模型预报值比较,如果相对误差大于 10%,则将新数据加入训练样本数据,更新预报模型。

[0090] 作为优选的另一种方案:在所述的步骤 (10) 中,将目标检测模块的检测结果在上位机显示。

[0091] 本发明的技术构思为:本发明针对雷达海杂波的混沌特性,对雷达海杂波数据进行重构,并对重构后的数据进行非线性拟合,建立雷达海杂波的预报模型,计算雷达海杂波的预报值和实测值的差,引入鲁棒智能优化方法,有目标存在时的误差会显著大于没有目标时,引入鲁棒智能优化方法,从而实现海杂波背景下的鲁棒智能目标检测。

[0092] 本发明的有益效果主要表现在:1、可在线检测海上目标;2、所用的检测方法只需较少样本;3、鲁棒性强、智能性、高避免了人为因素的影响。

## 附图说明

[0093] 图 1 是本发明所提出的系统的硬件结构图；

[0094] 图 2 是本发明所提出的上位机的功能模块图；

### 具体实施方式

[0095] 下面结合附图对本发明作进一步描述。本发明实施例用来解释说明本发明，而不是对本发明进行限制，在本发明的精神和权利要求的保护范围内，对本发明作出的任何修改和改变，都落入本发明的保护范围。

[0096] 实施例 1

[0097] 参照图 1、图 2，一种鲁棒智能雷达海上目标检测系统，包括雷达 1、数据库 2 及上位机 3，雷达 1、数据库 2 和上位机 3 依次相连，所述雷达 1 对所检测海域进行照射，并将雷达海杂波数据储存到所述的数据库 2，所述的上位机 3 包括：

[0098] 数据预处理模块 4，用以进行雷达海杂波数据预处理，采用如下过程完成：

[0099] 1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本， $i = 1, \dots, N$ ；

[0100] 2) 对训练样本进行归一化处理，得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ ：

$$[0101] \quad \bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

[0102] 其中， $\min x$  表示训练样本中的最小值， $\max x$  表示训练样本中的最大值；

[0103] 3) 将归一化后的训练样本重构，分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ ：

[0104]

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \cdots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \cdots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$[0105] \quad Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}$$

[0106] 其中， $D$  表示重构维数， $D$  为自然数，且  $D < N$ ， $D$  的取值范围为 50-70；

[0107] 鲁棒预报模型建模模块 5，用以建立预报模型，采用如下过程完成：

[0108] 将得到的  $X$ 、 $Y$  代入如下线性方程：

$$[0109] \quad \begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

[0110] 其中  $V_\gamma = \text{diag}\left\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\right\}$

[0111] 权重因子  $v_i$  由下式计算：

[0112]

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

[0113] 其中  $\hat{s}$  是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计， $c_1, c_2$  为常量；

[0114] 求解待估计函数  $f(x)$  :

$$[0115] \quad f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\|/\theta^2) + b^*$$

[0116] 其中,  $M$  是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|x_i - x_j\|/\theta^2)$ , 上标  $T$  表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M$ ,  $j = 1, \dots, M$ ,  $b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|/\theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\|/\theta^2)$  均为支持向量机的核函数,  $x_j$  为第  $j$  个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数,  $x$  表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数;

[0117] 改进智能寻优模块 6, 用以采用进化遗传算法对预报模型的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化, 采用如下过程完成:

[0118] 5.1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码;

[0119] 5.2) 随机产生初始种群;

[0120] 5.3) 计算每个个体的适应度, 并判断是否符合算法终止条件, 若符合, 输出最佳个体及其代表的最优解, 并结束计算, 否则继续迭代;

[0121] 5.4) 采用正态分布概率选择个体;

[0122] 5.5) 通过单点线性交叉产生新个体;

[0123] 5.6) 通过均匀变异方式产生新个体;

[0124] 5.7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优;

[0125] 5.8) 产生的新一代种群, 返回 5.3) 进行迭代;

[0126] 其中, 初始种群大小为 50-200, 最大代数 50-300, 最佳个体选择概率为 0.05-0.1, 交叉概率为 0.5-0.9, 变异概率为 0.001-0.01, 个体适应度选择模型的泛化均方根误差, 终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变;

[0127] 目标检测模块 7, 用以进行目标检测, 采用如下过程完成:

[0128] 1) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ,  $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值,  $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值;

[0129] 2) 进行归一化处理;

$$[0130] \quad \overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

[0131] 3) 代入预报模型建模模块得到的待估计函数  $f(x)$  得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值;

[0132] 4) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ , 计算控制限  $Q_\alpha$  :

$$[0133] \quad Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$[0134] \quad \theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$[0135] \quad h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2^2}$$

[0136] 其中,  $\alpha$  是置信度,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $h_0$  是中间变量,  $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方,  $k$  是样本维数,  $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计;

[0137] 5) 进行检测判断:当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_a$  时,该点存在目标,否则没有目标。

[0138] 所述的上位机 3 还包括:模型更新模块 8,按设定的时间间隔采集数据,将得到的实测数据与模型预报值比较,如果相对误差大于 10%,则将新数据加入训练样本数据,更新预报模型。

[0139] 所述上位机 3 还包括:结果显示模块 9,将目标检测模块的检测结果显示在上位机显示。

[0140] 所述上位机 3 的硬件部分包括:I/O 元件,用于数据的采集和信息的传递;数据存储单元,存储运行所需的数据样本和运行参数等;程序存储器,存储实现功能模块的软件程序;运算器,执行程序,实现指定的功能;显示模块,显示设置的参数和检测结果。

[0141] 实施例 2

[0142] 参照图 1、图 2,一种鲁棒智能雷达海上目标检测方法,所述的方法包括以下步骤:

[0143] (1) 从数据库中采集  $N$  个雷达海杂波回波信号幅值  $x_i$  作为训练样本,  $i = 1, \dots, N$ ;

[0144] (2) 对训练样本进行归一化处理,得到归一化幅值  $\bar{x}_i$ :

$$[0145] \quad \bar{x}_i = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}$$

[0146] 其中,  $\min x$  表示训练样本中的最小值,  $\max x$  表示训练样本中的最大值;

[0147] (3) 将归一化后的训练样本重构,分别得到输入矩阵  $X$  和对应的输出矩阵  $Y$ :

[0148]

$$X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_D \\ \bar{x}_2 & \bar{x}_3 & \cdots & \bar{x}_{D+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{N-D} & \bar{x}_{N-D+1} & \cdots & \bar{x}_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$[0149] \quad Y = \begin{bmatrix} \bar{x}_{D+1} \\ \bar{x}_{D+2} \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}$$

[0150] 其中,  $D$  表示重构维数,  $D$  为自然数,且  $D < N$ ,  $D$  的取值范围为 50-70;

[0151] (4) 将得到的  $X$ 、 $Y$  代入如下线性方程:

$$[0152] \quad \begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & K + V_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b^* \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix}$$

[0153] 其中  $V_\gamma = \text{diag}\left\{\frac{1}{\gamma v_1}, \dots, \frac{1}{\gamma v_M}\right\}$

[0154] 权重因子  $v_i$  由下式计算:

[0155]

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if } |\xi_i / \hat{s}| \leq c_1 \\ \frac{c_2 - |\xi_i / \hat{s}|}{c_2 - c_1} & \text{if } c_1 \leq |\xi_i / \hat{s}| \leq c_2 \\ 10^{-4} & \text{其他} \end{cases}$$

[0156] 其中 $\hat{\sigma}$ 是误差变量  $\xi_i$  标准差的估计,  $c_1, c_2$  为常量;

[0157] 求解得待估计函数  $f(x)$  :

$$[0158] \quad f(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i^* \exp(-\|x - x_i\|/\theta^2) + b^*$$

[0159] 其中,  $M$  是支持向量的数目,  $1_v = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha^* = [\alpha_1^*, \dots, \alpha_M^*]^T$ ,  $K = \exp(-\|x_i - x_j\|/\theta^2)$ , 上标  $T$  表示矩阵的转置,  $\alpha_i^*$  是拉格朗日乘子, 其中,  $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M, b^*$  是偏置量,  $\exp(-\|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|/\theta^2)$  和  $\exp(-\|x - x_i\|/\theta^2)$  均为支持向量机的核函数,  $x_j$  为第  $j$  个雷达海杂波回波信号幅值,  $\theta$  是核参数,  $x$  表示输入变量,  $\gamma$  是惩罚系数;

[0160] (5) 用进化遗传算法对步骤 (4) 的核参数  $\theta$  和惩罚系数  $\gamma$  进行优化, 采用如下过程完成:

[0161] 5.1) 采用实数编码方法对  $\theta$  和  $\gamma$  进行编码;

[0162] 5.2) 随机产生初始种群;

[0163] 5.3) 计算每个个体的适应度, 并判断是否符合算法终止条件, 若符合, 输出最佳个体及其代表的最优解, 并结束计算, 否则继续迭代;

[0164] 5.4) 采用正态分布概率选择个体;

[0165] 5.5) 通过单点线性交叉产生新个体;

[0166] 5.6) 通过均匀变异方式产生新个体;

[0167] 5.7) 对新个体用单纯性法进行确定性寻优;

[0168] 5.8) 产生的新一代种群, 返回 5.3) 进行迭代;

[0169] 其中, 初始种群大小为 50-200, 最大代数 50-300, 最佳个体选择概率为 0.05-0.1, 交叉概率为 0.5-0.9, 变异概率为 0.001-0.01, 个体适应度选择模型的泛化均方根误差, 终止条件为达到最大代数或者连续五代适应度不变;

[0170] (6) 在采样时刻  $t$  采集  $D$  个海杂波回波信号幅值得到  $TX = [x_{t-D+1}, \dots, x_t]$ ,  $x_{t-D+1}$  表示第  $t-D+1$  采样时刻的海杂波回波信号幅值,  $x_t$  表示第  $t$  采样时刻的海杂波回波信号幅值;

[0171] (7) 进行归一化处理;

$$[0172] \quad \overline{TX} = \frac{TX - \min x}{\max x - \min x}$$

[0173] (8) 代入步骤 (4) 得到的待估计函数  $f(x)$  计算得到采样时刻  $(t+1)$  的海杂波预报值;

[0174] (9) 计算海杂波预报值与雷达回波实测值的差值  $e$ , 计算控制限  $Q_\alpha$  :

$$[0175] \quad Q_\alpha = \theta_1 \left[ \frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_2} \right]^{\frac{1}{h_0}}$$

$$[0176] \quad \theta_i = \sum_{j=k+1}^N \lambda_j^i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$[0177] \quad h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2^2}$$

[0178] 其中,  $\alpha$  是置信度,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, h_0$  是中间变量,  $\lambda_j^i$  表示协方差矩阵的第  $j$  个特征值的  $i$  次方,  $k$  是样本维数,  $C_\alpha$  是正态分布置信度为  $\alpha$  的统计;

- [0179] (10) 进行检测判断 : 当  $e^2$  差值大于控制限  $Q_c$  时, 该点存在目标, 否则没有目标。
- [0180] 所述的方法还包括 : (11)、按设定的时间间隔采集数据, 将得到的实测数据与模型预报值比较, 如果相对误差大于 10%, 则将新数据加入训练样本数据, 更新预报模型。
- [0181] 所述的方法还包括 : 在所述的步骤 (10) 中, 将目标检测模块的检测结果在上位机显示。

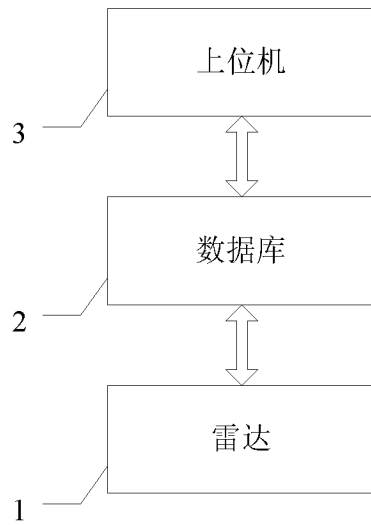


图 1

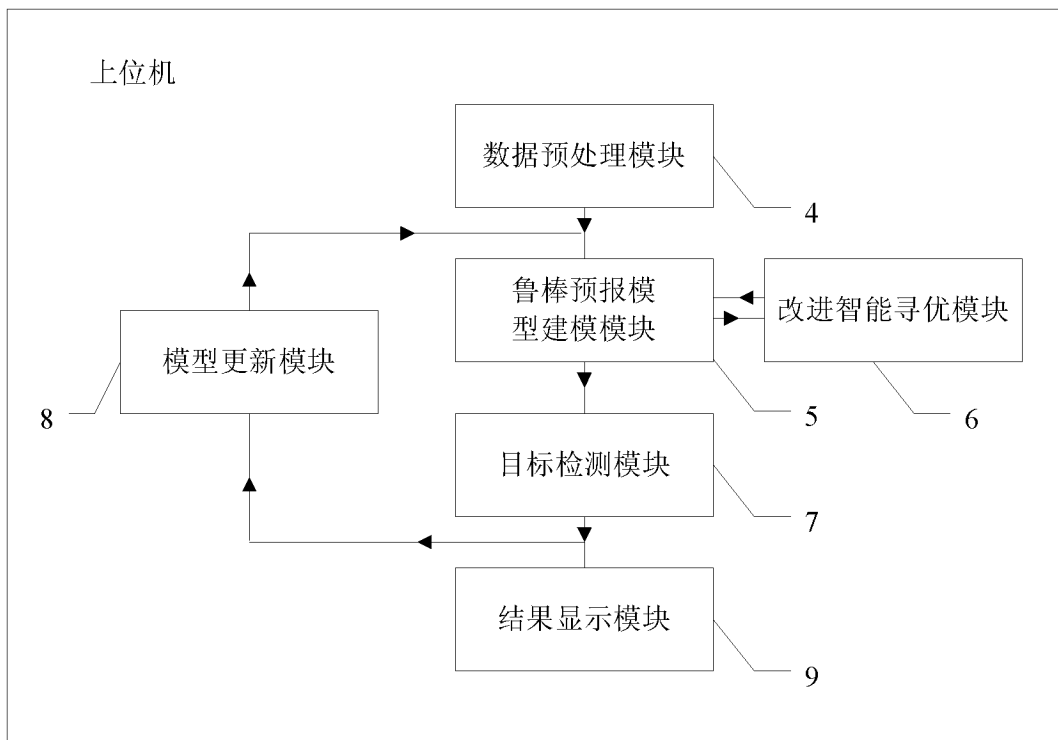


图 2