

## 基于结构加权的海面编队预定目标选择方法\*

罗小波<sup>1,2</sup>, 宋志勇<sup>1</sup>, 赵明波<sup>1</sup>, 范红旗<sup>1</sup>, 付强<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 96363 部队, 天水 741020)

**摘要:**海面目标运动和编队阵型的约束特性,使得通过对装订阵型和末制导探测阵型进行点集匹配来选择预定目标成为一种有效途径。但当编队目标释放干扰时,会引起阵型结构发生局部变化,导致目标选择性能恶化。本文基于反舰导弹目标选择需求,分析了传感器导航和探测误差、装订信息误差、编队目标运动和释放干扰等因素所引起的位置点集变形,通过利用阵型中未污染的结构信息,提出了基于几何散列法和结构加权平均 Hausdorff 距离的编队预定目标选择方法。理论分析和实验结果表明,该方法不受传感器导航误差和编队目标整体运动的影响,在编队存在冲淡干扰时能有效提高目标选择能力。

**关键词:**预定目标选择;点集匹配;结构加权;Hausdorff 距离;点集差异性分析

**中图分类号:**TN95; TJ761 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0079-08

## Predetermined target selection method for maritime formation based on structure weighted

LUO Xiaobo<sup>1,2</sup>, SONG Zhiyong<sup>1</sup>, ZHAO Mingbo<sup>1</sup>, FAN Hongqi<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>

(1. ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. No. 96363 Troop, Tianshui 741020, China)

**Abstract:** Due to the restriction characteristics of maritime target movement and formation, point sets matching between the bound formation and the detected one by terminal guidance has become an effective approach in selecting the predetermined target. . But the jamming existing within formation can cause the formation structure to change partially, which results in deterioration of the target selection performance. Based on the target selection need for anti-ship missile, the factors causing the position point sets to be differently distorted are analyzed, which mainly contain the navigation and detection errors of sensor, the bound information error, the formation targets motion and the released jamming. Subsequently, through effectively using the uncontaminated structure information, a predetermined target selection method for maritime formation that integrates geometric hashing and structure weighted mean Hausdorff distance was presented. Theoretical analyses and experimental results show that the method is not affected by the sensor navigation error and formations unitary movement; moreover, this method can effectively improve the target selection capability when there exist dilute jammings.

**Key words:** predetermined target selection; point sets matching; structure weighted; hausdorff distance; difference analysis for point set

现代海战中舰船目标多以编队形式出现,且编队阵型具有相对稳定的特性,因此,许多研究者将反舰导弹攻击过程中的编队目标选择问题转化为发射前所装订的编队阵型与末制导雷达搜索获得的编队阵型之间的匹配问题,即从未制导雷达获取的目标位置点集中寻找预先装订目标点的对应点。

由于其较高的应用价值,国内外学者在该领域开展众多相关研究,但因受保密等因素限制,公开报道较少。Park 等<sup>[1]</sup>通过计算各个目标与预订目标之间的距离、传感器检测概率和各个目标在区域中某个已知点出现概率等因素获得每个目

标是所装订目标的准确概率,选择最大概率的目标作为预定目标;虽然作者对算法进行了简化,但仍然无法适应编队中目标数目(包括假目标和非目标)较多的情形。Gordon 等<sup>[2]</sup>则基于数据关联思想,通过多元假设方法获得了点集中每个目标为预定目标的后验概率模型,并根据最大后验概率来选择预定目标;但算法对由非目标(例如干扰)和杂波所引起的虚警适应性较差。董受全等<sup>[3]</sup>利用目标之间的方位差信息,实现编队队形的识别和目标点对应,但该方法只在目标相对位置固定时有效。沈剑锋<sup>[4]</sup>利用两个点集之间的最小马氏距离来寻找预先装订的目标,但该方法

\* 收稿日期:2012-11-14

作者简介:罗小波(1982—),男,陕西扶风人,博士研究生,E-mail:luoxiaobo0731@163.com;

付强(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:fuqiang1962@vip.sina.com

只考虑了目标的分布误差,难以适用于编队旋转情况下的目标选择。任建存等<sup>[5-6]</sup>利用几何匹配理论中的 ICP 算法来进行编队中预定目标的选择,但 ICP 算法主要针对刚体变换问题,无法适应编队目标阵型发生较大变形或扭曲的情况。卢毅等<sup>[7]</sup>基于编队目标的相互位置关系进行对应点匹配,但该方法只考虑了相对参考目标的位置信息,同样无法适用于两个点集发生较大旋转和扭曲的情况。可见,利用点集匹配的目标选择方法必须具备适应点集旋转和扭曲变形的能力。

Hausdorff 距离 (HD) 是两个集合之间距离的一种定义形式,能在一定程度上描述两个点集之间的相似程度,对点集形状的旋转和变形具有较好的适应性,近年来被用于目标选择<sup>[8-10]</sup>和定位<sup>[11]</sup>。现有基于 HD 的点集匹配方法对海面编队目标点集之间存在的定位误差和目标机动所导致的点集形状旋转和扭曲变形等问题已有一定对抗能力<sup>[8-10]</sup>,但在海战中编队舰船会释放冲淡干扰导致点集结构发生改变,使得现有方法的点集匹配效率显著下降。针对编队结构改变的情形,本文在采用几何散列法描述点集的基础上,根据目标施放的冲淡干扰数量来计算结构加权 Hausdorff 距离,以此来减小点集旋转和局部结构改变对两个点集形状匹配的影响,有效改善匹配效率,提高预定目标选择的成功概率。

## 1 问题描述

在反舰导弹发射准备时刻,飞控系统向导弹装订编队目标位置信息,导弹发射并经过自控段后,主动雷达开机,根据预先装订的目标信息在最大海域搜索,检测并实时估计目标的位置信息。导引头预先装订的编队信息和末制导雷达搜索获得的编队信息可以用平面上的点集来描述,因此编队中预定目标的选择可以转化为这两个编队目标位置点集中的对应点匹配问题,即从未制导雷达获得的编队目标点集中寻找所装订预定目标的对应点。

以点集模式  $P_G = \{p_k\}_{k=1}^{N_G}$  表示编队  $G$  内所有目标的真实位置集合,其中  $p_k = [x_k, y_k, z_k]^T$  表示  $G$  中第  $k$  个成员的位置矢量, $N_G$  为编队  $G$  内目标个数,假设预定目标为第  $k_0$  个成员。探测平台  $S_1$  和末制导雷达  $S_2$  两个传感器分别在  $t_1$  和  $t_2$  时刻 ( $t_1 < t_2$ ) 对编队  $G$  进行观测,将它们对编队成员的观测信息记为点集  $Z_1$  和  $Z_2$ , 其中  $Z_i = \{z_{ik}\}_{k=1}^{n_i}$ ,  $z_{ik} = [x_k^i, y_k^i, z_k^i]^T$  为第  $i$  个传感器所观测到的第  $k$  个元素的信息, $i=1,2$ ,  $n_i$  为第  $i$  各传感

器观测到的元素个数,根据点集  $Z_1$  装订的编队  $G$  的位置集合记为  $\hat{P}_G$ 。

理想情况下,末制导雷达探测到的目标集与预先装订的目标集位置信息完全一致,即  $Z_1 = Z_2$ ,则从未制导雷达探测到的目标点集中正确选择出预定目标的概率可达 100%。实际中,两个点集可能存在以下两个方面的差异性,影响预定目标的选择<sup>[7]</sup>:

(1) 编队目标数目不一致即  $n_1 \neq n_2$ 。可能的原因有:①探测平台探测到的目标未被末制导雷达探测到;②探测平台未探测到的目标被末制导雷达探测到;③末制导雷达将敌方施放的冲淡干扰探测为目标;④末制导雷达存在虚警。

(2) 末制导雷达探测到的与探测平台探测到的编队目标之间的相互位置关系并不完全一致,也就是  $z_{1k} \neq z_{2k}$ 。这可能由以下几种原因引起:①编队各目标的运动不完全一致;②探测平台和末制导雷达对目标的探测定位误差;③平台导航设备与弹上导航设备的初始对准误差;④探测平台和弹上导航设备的导航姿态和位置误差;⑤编队目标进行规避以躲避导弹袭击。

由此可见,基于点集匹配的舰船编队中预定目标选择问题实质上是从可能只有部分相似且存在非刚体变换的两个点集中寻找预定目标对应点的问题。因此,需要探索一种合理的点集匹配方法,能够较好地度量两个点集之间的相似程度,同时能够适应点集形状的变化和扭曲以及外部干扰等影响。

## 2 点集差异性建模

装订信息与探测信息之间的差异是由于编队目标数目不一致和目标相互位置不一致对两个点集的形状造成的。本文基于反舰导弹的作战背景,对二者造成的不同影响进行分析。

探测平台预先装订和主动雷达搜索获取的目标点集之间相互位置的不一致主要由这两个传感器对目标的定位误差、两次探测期间编队目标运动引起的误差以及装订信息误差三部分组成。

### (1) 传感器对目标定位误差

以编队  $G$  第  $k$  个目标为例,假设  $t_i$  时刻其在大地坐标系中的位置为  $p_k^i = [x_k^i, y_k^i, z_k^i]^T$ , 传感器  $S_i$  位置和姿态角分别为  $p_{S_i} = [x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i}]^T$  和  $\psi_{S_i} = [\psi_x^i, \psi_y^i, \psi_z^i]$ , 第  $k$  个目标在传感器  $S_i$  坐标系中的位置为  $p_k^i = [x_k^i, y_k^i, z_k^i]^T$ , 则传感器  $S_i$  计算出该在大地坐标系中的位置  $z_{ik}$  为

$$\mathbf{z}_{ik} = \mathbf{p}_{S_i} + \mathbf{R}(\psi_{S_i}) \mathbf{p}_k^{S_i} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{p}_k^{S_i} = \begin{bmatrix} r_k^{S_i} \cos(\varphi_k^{S_i}) \cos(\theta_k^{S_i}) \\ r_k^{S_i} \cos(\varphi_k^{S_i}) \sin(\theta_k^{S_i}) \\ r_k^{S_i} \sin(\varphi_k^{S_i}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $r_k^{S_i}, \varphi_k^{S_i}, \theta_k^{S_i}$  为第  $k$  个目标在传感器  $S_i$  坐标系中的极坐标,  $\mathbf{R}$  为坐标转换矩阵。

理想情况下,传感器计算出的目标位置和实际位置相一致,即  $\mathbf{z}_{ik} = \mathbf{p}_k^{i_i}$ 。但由于传感器存在初始对准误差、惯导误差和探测误差,其计算出的目标位置与真实值之间会存在一定误差。则传感器实际获得的目标点位置为

$$\mathbf{z}_{ik} = (\mathbf{p}_{S_i} + \Delta\mathbf{p}_{S_i}) + \mathbf{R}(\psi_{S_i} + \Delta\psi_{S_i}^0 + \Delta\psi_{S_i}) (\mathbf{p}_k^{S_i} + \Delta\mathbf{p}_k^{S_i}) \quad (3)$$

式中,  $\Delta\mathbf{p}_{S_i} = [\Delta x_{S_i}, \Delta y_{S_i}, \Delta z_{S_i}]^T$ 、 $\Delta\psi_{S_i} = [\Delta\psi_x^{S_i}, \Delta\psi_y^{S_i}, \Delta\psi_z^{S_i}]$ 、 $\Delta\psi_{S_i}^0 = [\Delta\psi_{x0}^{S_i}, \Delta\psi_{y0}^{S_i}, \Delta\psi_{z0}^{S_i}]$  分别为传感器的位置误差、姿态误差和初始对准误差;且目标在传感器  $S_i$  的极坐标系中自身位置为

$$\mathbf{p}_k^{S_i} + \Delta\mathbf{p}_k^{S_i} = \begin{bmatrix} (r_k^{S_i} + \Delta r_k^{S_i}) \cos(\varphi_k^{S_i} + \Delta\varphi_k^{S_i}) \cos(\theta_k^{S_i} + \Delta\theta_k^{S_i}) \\ (r_k^{S_i} + \Delta r_k^{S_i}) \cos(\varphi_k^{S_i} + \Delta\varphi_k^{S_i}) \sin(\theta_k^{S_i} + \Delta\theta_k^{S_i}) \\ (r_k^{S_i} + \Delta r_k^{S_i}) \sin(\varphi_k^{S_i} + \Delta\varphi_k^{S_i}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\Delta c_{S_i} = (\Delta r_k^{S_i}, \Delta\varphi_k^{S_i}, \Delta\theta_k^{S_i})$  为传感器的测距、俯仰和方位测角误差。

由于海面目标空间位置分布的特殊性,反舰导弹主要依靠方位平面的探测信息,俯仰误差对目标的水平位置探测影响很小。对于轴对称反舰导弹而言,滚转角及其变化值都较小,其对目标位置估计的影响可以忽略。因此,初始对准误差以及姿态误差可以只考虑在方位向上的分量对目标定位的影响。

## (2) 目标运动所造成的位置误差

编队目标运动通常可分解成一致运动和非一致运动<sup>[2]</sup>,其中一致运动是指整个编队的刚体运动,非一致运动是指单个目标与编队整体运动不相一致的速率和航向的偏差。在编队目标正常航行和进行规避时都存在一致运动和非一致运动,所不同的是,规避时非一致运动会增大。因此,单个目标的运动速度可表示为  $\mathbf{v}_k = \mathbf{v} + \Delta\mathbf{v}_k$ 。式中,  $\mathbf{v}_k$  为编队中第  $k$  个目标的速度,  $\mathbf{v}$  为编队的一致运动速度,  $\Delta\mathbf{v}_k$  为第  $k$  个目标的非一致运动速度。

由于两次观测期间编队目标的运动,将导致目标位置的变化,则末制导雷达探测时刻第  $k$  个目标的位置坐标  $\mathbf{p}_k^2 = \mathbf{p}_k^1 + \Delta\mathbf{p}_k$ ,  $\Delta\mathbf{p}_k = \mathbf{v}_k T$  代表两次观测期间目标运动导致的位置偏移,其中  $T = t_2$

-  $t_1$  为两次观测间隔时间。

## (3) 装订信息误差

编队目标位置信息装订所带来的误差是指前置点射击方式下对末制导雷达开机时刻编队目标位置的预测误差,主要来自于对目标速度的估计误差。由于探测平台对目标的定位误差和目标速度的估计误差,第  $k$  个目标的装订位置  $\hat{\mathbf{p}}_k$  为

$$\hat{\mathbf{p}}_k = \mathbf{z}_{1k} + (\mathbf{v} + \Delta\mathbf{v}) T \quad (5)$$

式中,  $\Delta\mathbf{v} \triangleq (|\Delta\mathbf{v}|, \Delta\mathbf{v}_\theta)$  是对编队  $G$  速度的估计误差,  $|\Delta\mathbf{v}|$  为速率估计误差,  $\Delta\mathbf{v}_\theta$  为航向估计误差。

由以上分析可知,  $t_2$  时刻主动雷达开机,第  $k$  个目标装订位置为  $\hat{\mathbf{p}}_k$ , 实际位置为  $\mathbf{p}_k^2$ , 主动雷达获得出的位置为  $\mathbf{z}_{2k}$ 。

将  $\hat{\mathbf{p}}_k$  和  $\mathbf{z}_{2k}$  之间的差别扩展到整个编队  $G$  目标中,可以得到:目标一致运动中的直线运动、编队速率估计误差和传感器导航位置误差引起点集平移,目标一致运动中的转弯运动、编队航向估计误差、传感器初始对准误差和导航姿态角误差引起点集形状旋转,非一致运动和传感器探测误差会引起点集形状扭曲。两个点集之间的形状变化可表示为如下的一般形式:

$$\begin{cases} T(\hat{P}_G, Z_2) = f_1(\Delta\mathbf{p}_k^{S_1}, \Delta\mathbf{p}_k^{S_2}, |\Delta\mathbf{v}|, v_d, T) \\ R(\hat{P}_G, Z_2) = f_2(\Delta\psi_{S_1}, \Delta\psi_{S_1}^0, \Delta\psi_{S_2}, \Delta\psi_{S_2}^0, \Delta\mathbf{v}_\theta, v_\theta, T) \\ D(\hat{P}_G, Z_2) = f_3(\Delta c_{S_1}, \Delta c_{S_2}, \Delta\mathbf{v}_k, T) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $T, R, D$  分别表示两个点集之间的平移、旋转和扭曲变形,  $v_d$  和  $v_\theta$  分别表示编队一致运动中的直线运动和转弯运动。

可见,两个传感器所探测的编队目标点集的相互位置之间的差异性主要存在平移、旋转和扭曲等变形,需要能够同时适应这三种变形的点集匹配方法来寻找点集中的对应点。

## 3 基于加权平均 Hausdorff 距离的预定目标选择方法

### 3.1 结构加权平均 Hausdorff 距离

Hausdorff 距离是一个用来度量两个不同形状之间相似程度的量。考虑两个点集  $A$  和  $B$ , 其中  $A$  为模板,  $B$  为场景, 当一个点集中的每个点都是另外一个点集中对应点的最近邻点时, 则两个点集的 Hausdorff 距离最小。设点集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ ,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ ,  $A$  与  $B$  之间的 Hausdorff 距离定义为<sup>[12]</sup>

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (7)$$

其中  $h(A, B)$  是从  $A$  到  $B$  的单向 Hausdorff 距离

$$h(A, B) = \max_{a_i \in A} \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \quad (8)$$

式中,  $\|\cdot\|$  表示  $L_2$  范数。显然, Hausdorff 距离是两个点集之间距离最远的两个点对之间的距离。

当存在噪声、遮挡和外部点(outliers)时,容易造成两个点集形状之间只有部分区域能够较好地匹配,此时常规 Hausdorff 距离误匹配较大。为解决这些问题,研究者提出了许多改进的 Hausdorff 距离方法,平均 Hausdorff 距离(MHD)<sup>[13]</sup>、部分 Hausdorff 距离(Partial HD, PHD)<sup>[12]</sup>、最小截断平方的 Hausdorff 距离(Least trimmed square-HD, LTS-HD)<sup>[11,14]</sup>、基于 M 估计的 Hausdorff 距离(M-HD)<sup>[14]</sup>, 这些方法都在不同程度上解决部分遮挡、扭曲和外部点的问题,其中 PHD、LTS-HD 和 M-HD 通常都需要事先根据经验或实验来确定部分分数或设定一个参数门限来剔除外部点的影响,实用性不强。

海面编队目标选择问题中两个点集数目的差异性是由两个传感器对编队目标的不完全检测或者编队目标释放干扰造成的。对于第一种因素,一般来说,两个传感器都能够探测到绝大部分目标且有着很小的虚警,即两个点集至少包含了编队目标点集的绝大部分区域且形状比较完整,这与 PHD 所针对的问题不同,因此基于 PHD 的算法性能反而会差一些,仿真实验结果也证明了这一点;第二种因素,相对于整个编队来说,干扰释放距离较小,通常分布在释放干扰的目标周围,只改变了其邻近区域形状,对编队目标点集的整体形状影响较小,两个点集在整体形状上依然能够保持较大的相似性。由于干扰围绕在目标周围,采用 M-HD 方法剔除干扰效果并不理想。同时,释放了干扰的目标,其邻近区域结构受到影响,可认为是对局部结构的污染,这种污染会降低两个点集之间的结构相似性,而没有释放干扰的目标邻近区域则较好地保留了结构相似性,在匹配中增大未污染区域的形状信息而降低污染区域形状的影响,有助于提高点集匹配的准确率。

借助图像匹配中对控制点或者重要区域采用加权 Hausdorff 距离的思想<sup>[15]</sup>, 本文在编队目标阵型匹配过程中,为目标点集中每个点引入结构权重来计算平均 Hausdorff 距离(WMHD, weighted Mean Hausdorff Distance)。根据目标释放干扰的数量来赋予目标位置点在点集形状中的权重,目标释放干扰越少,对邻近区域结构影响越小,点集的结构相似性保留越多,则权重越高。其  $A$  到  $B$  的单

向 WMHD 定义为

$$h_{WMHD}(A, B) = \frac{1}{\sum_{a_i \in A} W_{a_i b_j}} \sum_{a_i \in A} W_{a_i b_j} \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \quad (9)$$

式中,  $W_{a_i b_j} = 1/2(W_{a_i} + W_{b_j})$  是点对  $a_i$  和  $b_j$  的权重。 $W_{a_i}$  和  $W_{b_j}$  分别为点集  $A$  中点  $a_i$  和点集  $B$  中点  $b_j$  的权重,每一对  $\min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\|$  都根据两个点在形状匹配中的重要程度赋予相应权重。

目标点权重赋值方法为:设置门限  $T$ (根据干扰释放距离确定)对末制导雷达探测的目标点集进行聚类,假设点集中所有点聚为  $m$  类,每类中点的数量为  $n_i, i = 1, 2, \dots, m$ , 则点集中第  $i$  类的每个目标点权重  $w = \frac{1}{(m \cdot n_i)}$ 。显然,从理论上讲,当点集中不存在干扰时或者所有目标释放的干扰个数相等时,  $h_{WMHD}(A, B) = h_M(A, B)$ 。

通过这种结构加权方式,使得点集中所检测到的且未释放干扰的目标邻近区域的形状信息得到有效保留,同时减小了释放了干扰的目标的邻近区域的形状对点集匹配的影响。在此基础上,再用 MHD 方法对装订目标点集和探测目标点集进行匹配,可有效减少误匹配。

### 3.2 基于 WMHD 的预定目标选择算法

为进一步减小编队目标位置点集之间的变形所导致的点集误配率,采用几何散列法来描述目标位置点集,其实质是利用点集形状的上下文关系<sup>[16]</sup>,能有效去除点集之间刚体变换的影响,只保留编队目标的相对位置关系。将装订的目标点集定义为模板点集  $A$ , 末制导雷达探测获得的目标点集定义为场景点集  $B$ 。从模板点集  $A$  中以所装订预定目标  $a_{i_0}$  和其余任意一个点  $a_j$ , 构建新坐标系描述点集,形成新的点集  $A'(i_0, j)$ 。同样,从场景点集  $B$  中任意选择两个点  $b_k, b_l$ , 描述成新目标点集  $B'(k, l)$ , 显然共有  $N_B(N_B - 1)$  个互不相同的  $B'(k, l)$ ,  $N_B$  为点集  $B$  的势。寻找目标点集最优匹配的结果就是获得  $A'(i_0, j)$  与  $\{B'(k, l)\}$  的  $N_B(N_B - 1)$  个元素中距离最小的一个。由于  $A'(i_0, j)$ 、 $B'(k, l)$  的选择具有任意性,不考虑旋转和平移,使得点集描述方法与旋转和平移无关,进一步说明本文方法与传感器的初始对准误差、导航误差、目标编队的一致运动和编队速度估计误差无关。

通过上述分析,针对海面编队中的预定目标选择问题,建立如下的预定目标选择流程:

Step 1 从模板点集  $A$  中任意选择两个点  $a_i, a_j$ , 构建新坐标系描述点集,形成新的点集  $A'(i, j)$ ;

Step 2 从场景点集  $B$  中任意选择两个点  $b_k$ 、

$b_l$ , 构建新坐标系, 获得新的目标点集  $B'(k, l)$ ;

Step 3 计算两个点集  $A'(i, j)$  和  $B'(k, l)$  的加权 Hausdorff 距离, 即

$$H(k, l) = H_{WMHD}(A'(i, j), B'(k, l)) \quad (10)$$

Step 4 找出 Hausdorff 距离最小值时的点集描述方法, 即

$$B'(k_0, l_0) = \arg(\min_{B'(k, l)}(H(k, l))) \quad (11)$$

Step 5 按照双向最近邻准则从  $B'(k_0, l_0)$  中选出  $A'(i, j)$  中预定目标的对应点。

其中, Step 2 中, 若编队中目标较多或者释放的干扰较多, 导致  $N_B(N_B - 1)$  很大, 不利于实时进行目标选择, 且容易导致目标选择错误, 需要通过有效的方法来剔除那些不太可能的点集  $B'(k, l)$ , 具体方法可参照文献[10]。

具体算法流程图如图 1 所示。

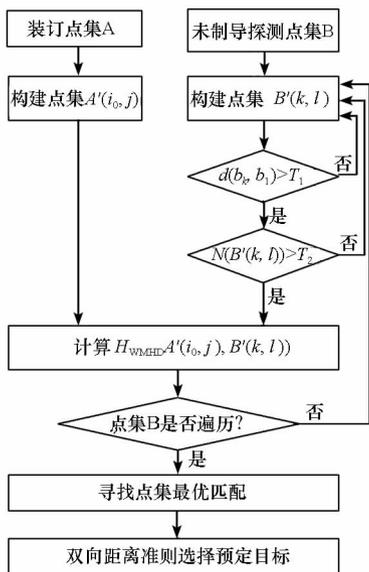


图 1 编队预定目标选择算法流程图

Fig. 1 The algorithm flowchart of predetermined target selection information

### 4 仿真实验分析

针对海上编队目标问题, 对前述方法进行实验验证与性能分析。仿真数据基于如图 2 所示的海上编队目标典型阵型生成, 目标间距如图 2 中所标注, 间距误差服从  $N(0, 0.5^2)$  分布。

目前探测平台和反舰导弹末制导雷达都具有较大的搜索范围, 对目标的探测概率接近 1 且虚警概率较小, 这说明两个传感器都能够探测到编队中绝大部分目标, 因此由于传感器探测所造成的两个点集中目标数目的差异很小。如上所述, 传感器探测和冲淡干扰都会造成两个点集中目标数目不一致, 对点集匹配性能的影响是类似的。

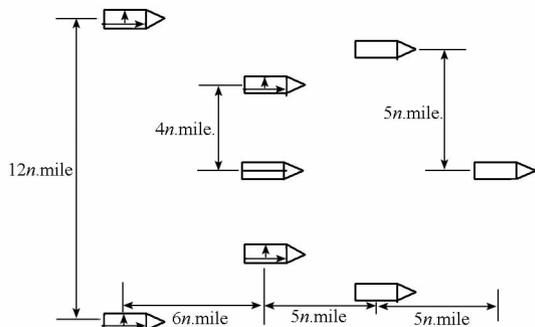


图 2 海上编队目标典型阵型

Fig. 2 Typical array shape of maritime formation targets

因此, 在仿真实验中只通过设置不同冲淡干扰数量来模拟点集中目标数目不一致的情形, 这不会影响仿真实验的可信性。

由于点集之间平移变换对点集匹配成功率影响较小, 且容易通过几何散列法剔除影响, 因此实验中相互位置的差异性只考虑旋转和扭曲变形两种影响。实验中固定探测平台和末制导雷达自身的姿态角误差、初始对准误差和测量误差, 通过设置不同的编队航向估计误差和不同规避时间来考察点集旋转和非一致运动造成点集扭曲变形时算法的性能。

不失一般性, 对模板点集和场景点集生成过程中各个误差作出以下假定: 传感器位置误差  $\Delta p_{s_i}$ 、姿态角误差  $\Delta \psi_{s_i}$ 、初始对准误差  $\Delta \psi_{s_i}^0$  以及探测误差  $\Delta c_{s_i}$  分别服从正态分布且相互独立, 且探测平台的导航误差小于末制导雷达, 探测误差大于末制导雷达; 探测平台对编队航向的估计误差服从正态分布, 编队中各个目标非一致运动速度服从正态分布且相互独立。传感器参数设置如表 1 所示, 其他场景参数设置如表 2 所示。

表 1 传感器实验参数设置

Tab. 1 The parameters setting for sensors

参数	探测平台	末制导雷达
位置误差	1n mile/h	10n mile/h
姿态误差	0.01°/h	0.1°/h
初始对准误差	0.01°	0.1°
探测误差	(500m, 1°, 1°)	(50m, 0.2°, 0.2°)

注: 传感器导航误差和初始对准误差来自文献[17]。

表 2 其他实验参数设置

Tab. 2 The other parameters setting

自控段	编队	舰船转弯	非一致运动
飞行时间	速度	角速度	加速度
680s	16m/s	0.1°/s	10m <sup>2</sup> /s

考虑到仿真实验中随机参数较多,且每次实验中随机生成模板点集和场景点集,在模板点集中随机选择预定目标;此外,存在干扰时释放干扰的舰船和干扰释放方位都随机生成,故将蒙特卡罗实验次数设定为  $10^4$  次。

首先考察特定干扰条件下本文所提算法的性能,设编队中释放干扰的目标舰船数量为 3 艘,每艘舰船形成 2 个有效冲淡干扰。

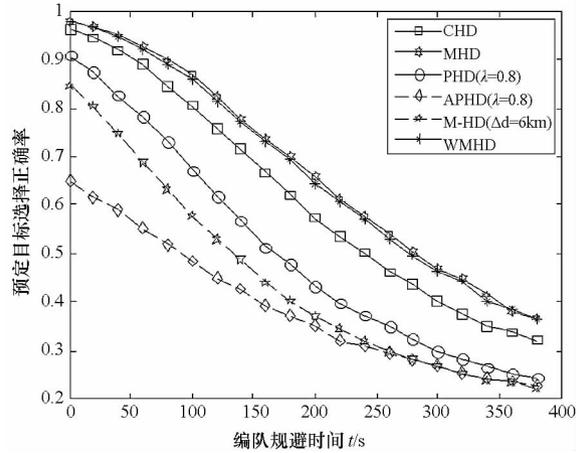
仿真实验 1: 设编队航向估计误差  $\sigma = 5^\circ$ , 采用本文算法对图 2 所示典型场景进行编队预定目标选择,考察算法在不同规避时间下的性能,即考察算法对点集扭曲变形的适应性。

基于编队不释放干扰和存在特定干扰两种不同场景来考察本文算法对预定目标的选择性能,同时与常规 Hausdorff 距离 (CHD)、平均 Hausdorff 距离 (MHD)、部分 Hausdorff 距离 (PHD)、平均部分 Hausdorff 距离 (APHD) 和基于 M 估计的 Hausdorff 距离 (M-HD) 5 种算法进行对比分析。图 3 给出了 6 种算法在编队目标不同规避时间下的目标选择性能,PHD 方法和 APHD 方法中的  $\lambda = 0.8$  表示 Hausdorff 距离序列选择系数为 0.8, M-HD 方法中  $\Delta d = 6\text{km}$  表示距离的成本函数门限为 6km。

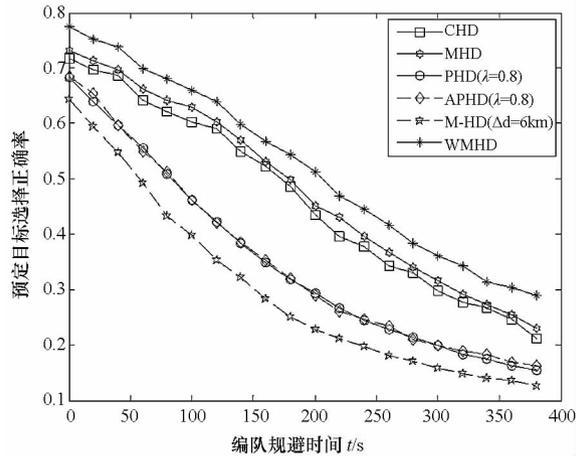
从图 3 的实验结果可以看出,当编队舰船不释放干扰时,WMHD 方法与 MHD 方法性能非常接近,这与前文分析相一致,而且相比于其他四种算法,两者性能最好;释放干扰时,WMHD 算法比 MHD 算法的性能大致提升了 5%。当释放干扰时,WMHD 性能较好的原因是由于 WMHD 算法增强了未释放干扰的目标位置信息,降低了污染区域的错误影响,提高了预定目标选择的正确率。

图 3 中结果清楚地显示 PHD、APHD 和 M-HD 三种算法在性能上要优于 CHD、MHD、WMHD 三种算法。在仿真实验中考察了  $\lambda = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  和  $\Delta d = 6\text{km}, 8\text{km}, 10\text{km}, 12\text{km}$  几种不同的参数下的 PHD、APHD 和 M-HD 三种算法性能,发现随着  $\lambda$  和  $\Delta d$  增大,三者性能逐渐提高。当  $\lambda = 1$  时,PHD 和 APHD 算法等同于 MHD,其实验性能也与 MHD 非常接近,与理论相符;对于实验 1 中的两个场景,当  $\Delta d = 10\text{km}$  时, M-HD 算法性能近似 MHD,继续增大  $\Delta d$ , M-HD 算法性能没有改善,可以理解为  $\Delta d = 10\text{km}$  可以有效地保留整个点集的形状信息。这说明了对于海面编队目标点集匹配来说,整体的结构信息比较重要,只选择部分结构信息容易导致错误,特别是在存在干扰的情况下,若选择的部分结构信息

中包含干扰,会导致算法性能恶化。图 3 中这三者的算法性能曲线比较平滑的原因是由于蒙特卡罗次数较多,有效地平均了包含污染区域的结构信息对算法性能的影响。



(a) 无干扰



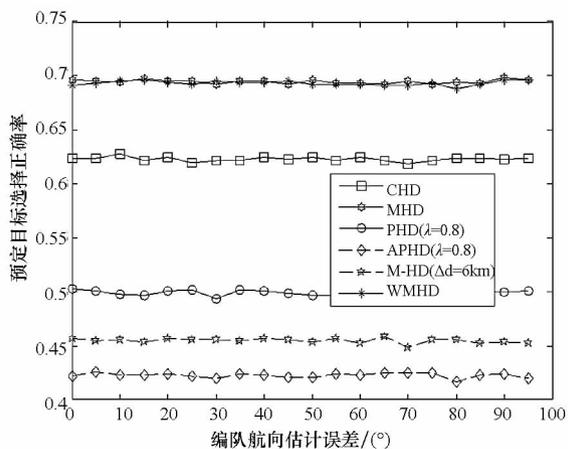
(b) 存在冲淡干扰

图 3 不同规避时间下的预定目标选择算法性能分析  
Fig. 3 Performance analysis of predetermined target selection algorithm under different elusion time

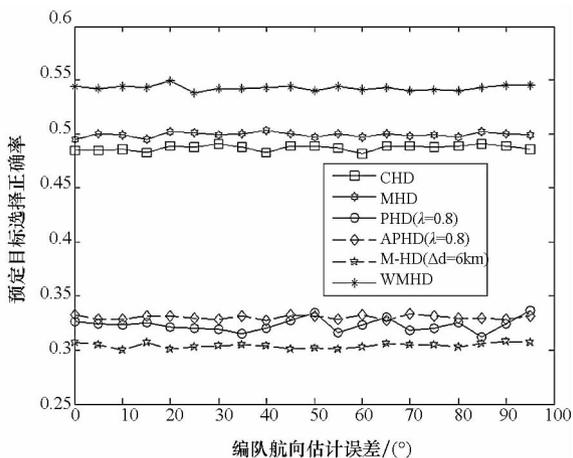
仿真实验 2: 设规避时间  $t = 180\text{s}$ , 考察本文算法在不同航向估计误差下的编队预定目标选择性能,即考察算法对点集旋转的适应性。

同样考察实验 1 中 6 种算法在无干扰和所设定的干扰模式两种不同场景下的预定目标选择性能,图 4 给出了 6 种算法在不同航向估计误差下的目标选择性能。

从图 4 的实验结果可以看出,不同航向估计误差条件下,无干扰时,WMHD 算法与 MHD 性能非常接近,且性能最好,CHD 次之,其他 3 种选择点集部分形状信息的算法较差;存在干扰时,WMHD 算法相比 MHD 和 CHD 算法,性能大致提升了 5%,其原因同样是由于 WMHD 降低了污染区域结构信息对点集匹配的错误影响。



(a) 无干扰



(b) 存在冲淡干扰

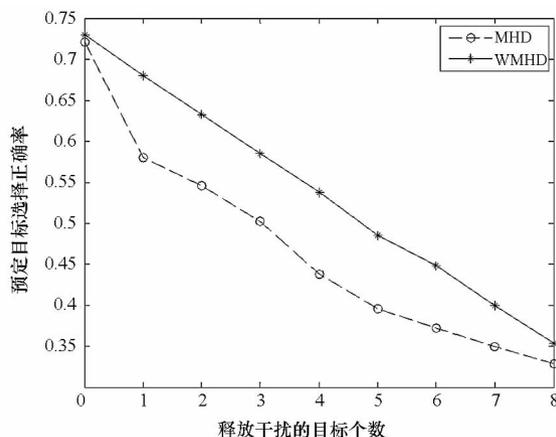
图4 不同航向估计误差下的预定目标选择算法性能分析  
Fig.4 Performance analysis of predetermined target selection algorithm under different estimate error of course

从图4中很容易发现,PHD、APHD和MHD三种算法的性能明显劣于其他三种算法,同样考察了这三种算法在不同参数下的性能,结果与实验1相似,随着 $\lambda$ 和 $\Delta d$ 增大,三者性能也逐渐提高,直到结果近似MHD,继续增大 $\Delta d$ ,性能不再提升,这再次说明了在海面编队目标点集匹配中整体结构信息的重要性。相比于图4(a),图4(b)中这三者的算法性能曲线略有起伏,这是由于干扰导致局部结构信息的污染,所选择的区域不同导致算法性能起伏增大,多次蒙特卡洛会减小但不能完全消除算法的不稳定性。需要说明的是,图4中6种算法性能曲线都比较稳定,目标选择正确率没有随着航向估计误差的增大而恶化,其原因是各个算法中点集都是基于几何散列法进行描述的,有效去除了点集之间的旋转和平移变换,与前文理论分析一致,进一步说明本文提出的编队预定目标选择算法性能不受编队速度估计误差的影响。

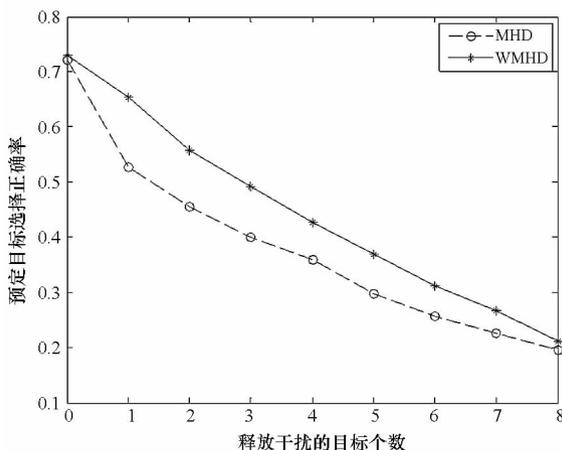
仿真实验3:编队航向估计误差 $\sigma = 5^\circ$ ,规避时间 $t = 180s$ ,本文算法在编队不同干扰模式下的预定目标选择性能分析。

由实验1和实验2可以看出,在点集发生旋转和扭曲的情况下,无论编队目标点集中是否存在干扰,MHD算法和本文所提出的WMHD算法都要优于其他4种算法,文献[12]也指出MHD算法在点集匹配中性能优越,此外,本文算法是在MHD算法基础上改进的,故在这里只分析比较WMHD和MHD在不同干扰模式下的算法性能。图5比较了在三组不同干扰释放方式下两种算法的性能,其中(a)表示所选择的每个舰船目标随机释放1个干扰,同理,(b)和(c)分别表示随机释放了2个和3个干扰。

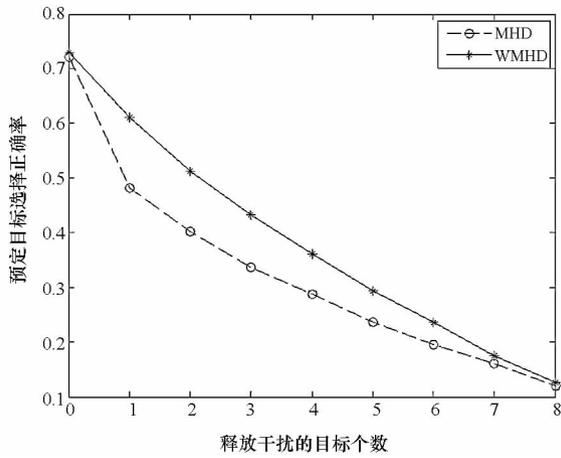
在图3(a)和图4(a)的实验结果中,不存在干扰时,WMHD和MHD算法性能近似,与理论分析一致;而图5的实验结果显示,存在干扰时,在各个不同的干扰模式下WMHD算法性能都要明显优于MHD,这说明在海面编队目标选择问题中,相对于传统MHD算法,本文算法有着较强的鲁棒性。



(a) 每个目标释放1个干扰



(b) 每个目标释放2个干扰



(c) 每个目标释放 3 个干扰

图 5 不同干扰模式下的预定目标选择算法性能分析

Fig. 5 Performance analysis of predetermined target selection algorithm under different jamming mode

图 5 中两条算法性能曲线的趋势表明:随着编队中释放干扰的目标个数的增加,点集中被污染的局部区域逐渐增多,通过结构加权来减小局部污染区域对整体形状影响的作用会减弱,从而导致 WMHD 算法性能与 MHD 算法性能的逐渐接近。但各个目标释放干扰个数相等时,两者性能没有完全相等,这与前文理论分析不相一致,其原因是编队中多个目标和干扰之间距离的随机性导致聚类算法不能完全正确地将每个目标和对应的干扰完全聚为一类,从而造成点集的结构权重赋值不完全正确造成的。对比图 5(a)、(b)、(c) 中释放干扰目标个数同为 8 时二者性能曲线可以发现,随着释放干扰数量的增加,这种差异性逐渐减小,究其原因,在每个目标释放多个干扰时,聚类算法虽然不能够完全正确地将目标和其释放的所有干扰聚为一类,但能够判断出每个目标都释放了干扰,只是数量不一定正确,相比于干扰数量较小时的不准确聚类,减小了权重赋值误差所引入的错误影响,从而减小了两种算法性能差异。

## 5 结 论

海面目标运动特性和编队阵型的约束特性,使得反舰导弹通过编队目标阵型匹配选择预定攻击目标成为可能,而编队目标阵型信息在探测平台和末制导雷达中表现为位置点集的结构信息,如何有效地利用这种结构信息成为基于点集匹配进行预定目标选择的关键。借鉴几何散列法描述点集,在去除点集平移和旋转影响的基础上,采用结构加权 Hausdorff 距离来充分利用点集中未受

污染的结构信息,可以有效降低点集匹配的误配率。理论分析和实验结果表明,在较大的规避和航向估计误差下,本文算法都有着较好的性能,且相比于传统 MHD 算法,提高了在编队目标释放冲淡干扰时的目标选择能力。

## 参考文献 (References)

- [1] Park H R, Whang I H. An effective target selection algorithm for ASM (Anti-ship Missile) [C]//SICE-ICASE International Joint Conference, Bexco, Busan, Korea, Oct. 2006: 2930 - 2934.
- [2] Gordon N, Salmond D. Bayesian pattern matching technique for target acquisition [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1999, 22(1): 68 - 77.
- [3] 董受全,宋伟. 基于空间方向相似性的编队队形识别算法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(11): 167 - 169.  
DONG Shouquan, SONG Wei. Identification algorithm of combat warship formation based on similarity between spatial directions [J]. Fire Control and Command Control, 2010, 35(11): 167 - 169. (in Chinese)
- [4] 沈建锋. 舰艇队形识别目标选择算法[J]. 火力与指挥控制. 2010, 35(9): 98 - 100.  
SHEN Jianfeng. A target selection algorithm using naval ships formation identification [J]. Fire Control and Command Control. 2010, 35(9): 98 - 100. (in Chinese)
- [5] 任建存,卢毅,刘兴明,等. 基于 ICP 的编队预定目标选择方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(8): 91 - 95.  
REN Jiancun, LU Yi, LIU Xingming, et al. A method to select the expect target from a ship formation based on ICP algorithm [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(8): 91 - 95. (in Chinese)
- [6] 卢毅,姜永华,翟龙军,等. 基于 GTLS-ICP 算法的反舰导弹预定目标选择方法[J]. 火箭与制导学报, 2011, 31(2): 40 - 44.  
LU Yi, JIANG Yonghua, ZHAI Longjun, et al. Target ship selection method for anti - ship missile based on GTLS-ICP algorithm [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(2): 40 - 44. (in Chinese)
- [7] 卢毅,姜永华. 反舰导弹对目标选择的一种新方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 778 - 784.  
LU Yi, JIANG Yonghua. A new method to target selection for anti-ship missile [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 778 - 784. (in Chinese)
- [8] 卢毅,姜永华,刘兴明,等. 基于 MHD 的反舰导弹预定目标选择方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(5): 114 - 117.  
LU Yi, JIANG Yonghua, LIU Xingming, et al. A destined target selection method for anti-ship missile based on mean Hausdorff distance [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(5): 114 - 117. (in Chinese)
- [9] 卢毅,姜永华,刘兴明,等. 基于 Hausdorff 距离的反舰导弹预定目标选择方法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(2): 146 - 151.  
LU Yi, JIANG Yonghua, LIU Xingming, et al. Target selection method for anti-ship missile based on Hausdorff distance [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(2): 146 - 151. (in Chinese)

- covered slot in the broad wall of a waveguide[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett*, 1, 1988;360-363.
- [6] Katehi P B. Dielectric-covered Waveguide Longitudinal Slots with Finite Wall Thickness [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 1990, AP-38;1039-1045.
- [7] 夏克金, 杨弃疾. 敷介质波导缝隙特性的研究[J]. *应用科学学报*, 1989, 7(2):115-122.
- XIA Kejin, YANG Qiji. On the characteristics of Dielectric Covered Waveguide Slots [J]. *Journal of Applied Sciences*, 1989, 7(2):115-122. (in Chinese)
- [8] Mazzarella G, Montisci G. A rigorous analysis of dielectric-covered narrow longitudinal shunt slots with finite wall thickness[J]. *Electromagn*, 1999, 19;407-418.
- [9] Manuilov M B, Lerer A M, Sinyavsky G P. Numerical-Analytical Implementation of Galerkin Technique for Analysis of Waveguide and Slotted Waveguide Antenna Arrays[C]. 2011 VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques, September, Kyiv, Ukraine, 2011.
- [10] Hirokawa J, Ando M. Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(5): 625-633.
- [11] Uchimura H, Takenoshita T, Fujii M. Development of a laminated waveguide[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1998, 46(12): 2438-2443.
- [12] Wu K, deslandes D, Cassivi Y. The substrate integrated circuits-A new concept for high-frequency electronics and optoelectronics[C]. 6th Int. Conf. on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, Oct. 2003.
- [13] Hong W. Development of Microwave Antennas, Components and Subsystems Based on SIW Technology. *IEEE Microwave [C]*. Antenna, Propagation and Electromagnetics Conference, Beijing, China, Aug. 8-12, 2005.
- [14] Bozzi M, Georgiadis A, Wu K. Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas[J]. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2011, 5(8):909-920.
- [15] Xu F, Zhang Y, Hong W, et al. Finite-difference frequency-domain algorithm for modeling guided-wave properties of substrate integrated waveguide [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2003, MTT-51(11):2221-2227.
- [16] Arneri E, Amendola G. Analysis of substrate integrated waveguide structures based on the parallel-plate waveguide green's function[J]. *IEEE Trans on MTT*, 2008, 56(7): 1615-1623.
- [17] Xu F, Wu K. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2005, 53(1):66-73.
- [18] Che W, Deng K, Wang D, Chow Y L. Analytical equivalence between substrate-integrated waveguide and rectangular waveguide[J]. *IET Microw. Antennas Propag*, 2008, 2(1):35-41.
- [19] Lyon R W, Sangster A J. Efficient moment method analysis of radiating slots in a thick-walled rectangular waveguide[C]// *IEE Proc. H, Microw. Opt. Antennas*, 1981, 128: 197-205.
- [20] Dural G, Aksun M I. Closed-form Green's functions for general sources and stratified media [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 1995, 43(7):1545-1552.
- [21] Elliott R S. An improved design procedure for small arrays of shunt slots [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, AP-31(1):48-53.
- [22] Stern G J, Elliott R S. Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation: Theory and experiment [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 1985, AP-33(11): 1264-1271.
- [23] Montisci G, Mazzarella G. Full wave analysis of a waveguide printed Slot [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52:2168-2171.
- [24] 郑秋容. 微波光子晶体带隙特性及其在天线中的应用[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2007.
- ZHENG Qiu rong. Characteristics of microwave photonic crystals and their applications in antennas [D]. P. H. D, National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)

## (上接第 86 页)

- [10] 卢毅, 姜永华, 范照盛. 一种基于点集匹配的反舰导弹目标选择方法[J]. *宇航学报*, 2011, 32(9): 2037-2044.
- LU Yi, JIANG Yonghua, FAN Zhaosheng. A point set matching based on target selection method for anti-ship missile [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(9): 2037-2044. (in Chinese)
- [11] Bustos J P, Donoso F, Guesalaga A, et al. Matching radar and satellite images for ship trajectory estimation using the Hausdorff distance[J]. *IET Radar Sonar Navig*, 2007, 1(1): 50-58.
- [12] Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(9):850-863.
- [13] Dubuisson M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching [C]//*Proc. 12th Int. Conf. Pattern Recognition*, Jerusalem, Israel, Oct. 1994: 556-568.
- [14] Sim D, Kwon O, Park R. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(3): 425-429.
- [15] Gao Y. Efficiently comparing face images using a modified Hausdorff distance [J]. *IEE Proc. - Vis. Image Signal Process*, 2003, 150(6): 346-350.
- [16] Zheng Y, Doermann D. Robust point matching for nonrigid shapes by preserving local neighborhood structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 643-649.
- [17] 吴俊伟. 惯性技术基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- WU Junwei. Fundamentals of inertia technology [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2003. (in Chinese)