基于空时融合隐马尔科夫模型的舰艇编队目标识别方法

但 波^{*①} 姜永华^① 李敬军^① 卢 毅^② ^①(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001) ^③(海军装备部 成都 610100)

摘 要:基于末制导雷达搜索舰艇编队目标时获得的目标大角域高分辨距离像(HRRP)信息,该文建立了描述单个 HRRP 样本内向量之间统计关系的"各态历经"空间隐马尔可夫模型(SHMM)和描述 HRRP 样本之间统计关系的 "从左到右"时间隐马尔可夫模型(THMM)。与对一类目标全方位角训练数据只建立一个 THMM 模型的方法相比, 该方法充分利用目标的大角域 HRRP 信息,提高了识别性能。通过对 5 类舰船目标的仿真和 3 类民用船只的外场 实测数据分析表明该方法的有效性。

关键词: 雷达高分辨距离像; 空间隐马尔可夫模型; 时间隐马尔可夫模型; 编队目标识别 中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2015)04-0926-07

DOI: 10.11999/JEIT140589

Ship Formation Target Recognition Based on Spatial and Temporal Fusion Hidden Markov Model

 ${\rm Dan}\; {\rm Bo}^{\mathbbm{O}} \qquad {\rm Jiang}\; {\rm Yong-hua}^{\mathbbm{O}} \qquad {\rm Li}\; {\rm Jing-jun}^{\mathbbm{O}} \qquad {\rm Lu}\; {\rm Yi}^{\mathbbm{O}}$

 $^{(1)}(Department\ of\ Electronic\ Information\ Engineering,\ Naval\ Aeronautical\ and$

Astronautical University, Yantai 264001, China)

⁽²⁾(Navy Armament Department, Chengdu 610100, China)

Abstract: Based on the target large angle domain High Resolution Range Profile (HRRP) information of the ship formation obtained by the terminal guidance radar during its search phase, this study establishes an "ergodic" Spatial Hidden Markov Model (SHMM) which describes statistical relationship between the vectors in a single HRRP sample and a "left to right" Temporal HMM (THMM) which describes statistical relationship between HRRP samples. In comparison with the method that it only establishes a THMM model with the training data of all-round angle of one target, the proposed method makes full use of the target HRRP information of large angle domain and can improve the recognition performance. Through the simulation of the five types of ship target and the field measured data analysis of three kinds of civilian vessels show that the effectiveness of the proposed method.

Key words: Radar High Resolution Range Profile (HRRP); Spatial Hidden Markov Model (SHMM); Temporal Hidden Markov Model (THMM); Formation target recognition

1 引言

雷达高分辨距离像是用宽带雷达信号获取的目标散射点子回波在雷达视线方向投影的矢量和,它反映了目标散射点在距离方向上的分布情况,对目标识别与分类具有重要意义^[1,2]。

隐马尔可夫模型是一种统计分析模型,在 80 年 代得到了 Bell 实验室 Rabiner 等人的传播进而在理 论上和实践上均有了突飞猛进的发展,并进一步应 用到了模式识别领域,目前已有很多文献进行了相关研究并取得了一定成效^[3-5]。

文献[6,7]探讨了基于单个雷达高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP)样本的特 征作为观察序列建立隐马尔可夫(Hidden Markov Model, HMM)的方法,对单个测试样本的识别实验 表明该方法具有较好的识别性能。但是该方法存在 如下不足:

(1)针对方位角变化为大角域的目标时没有充 分利用其在时间维上隐含的目标信息;

(2)识别时只考虑了单个测试样本,实际上忽略 了部分可利用的样本数量。

文献[8]将等角域划分后每一帧内的多个 HRRP

²⁰¹⁴⁻⁰⁵⁻⁰⁸ 收到, 2014-09-12 改回

上海市科学技术委员会资助课题(11DZ2260800)和省部级基金资助 课题

^{*}通信作者: 但波 lovelyn19841204@163.com

样本当做序列,对训练样本序列建立 HMM 模型。 但是该方法存在如下不足:

(1)训练样本是从一个近似认为符合同一散射 点模型中抽样得到,因此假设抽样后的样本间是独 立同分布并不合理;

(2)采用 RELAX 方法提取目标 HRRP 散射中 心幅度、位置参数作为特征,但是这种特征对噪声 和目标闪烁很敏感,而且其最终识别结果与指定的 强散射点个数有关;

(3)需要训练数据和测试数据采样率一致,这一 点很难满足。

文献[9,10]将等角域分帧处理后的多帧样本当 做序列,对全方位训练样本序列建立 HMM 模型。 其中,文献[9]中提出的方法存在文献[8]中的第(2)和 第(3)点不足,文献[10]提出的方法存在文献[8]中的 第(3)点不足。

为了解决上述问题,考虑到末制导雷达在搜索 舰艇编队目标阶段可获得的目标大角域角度变化信 息,建立了描述单个 HRRP 样本内向量之间统计关 系的"各态历经"SHMM 模型和描述 HRRP 样本 间统计关系的"从左到右"THMM 模型,识别时对 时域分类效果不佳的目标进一步采用基于分层识别 算法的空时融合 HMM 模型(Spatial and Temporal Fusion HMM with SHMM, S-STF-HMM)进行识 别,最后完成对整个编队目标舰船类型的识别。

2 问题描述及基本定义

2.1 问题描述

反舰导弹发射平台的火控雷达探测到远距离处的一个舰艇编队(如图 1 所示),图中 D 为编队相邻舰艇的距离,T₁~T₅分别代表 5 种不同类型的舰船。通过发射平台的火控系统向导弹装订由火控雷达探测到的编队目标的位置信息。经过导弹自控段飞行后,末制导雷达在t₀时刻开机,雷达在其最大搜索区域搜索一遍,录入所有探测到的目标信息。t₁时刻为末制导雷达搜索结束时刻,然后利用搜索阶段获取的目标信息完成对目标的识别。

2.2 基本定义

2.2.1 编队队形散布圆的定义 将编队队形的最大



外接圆所覆盖区域称为"编队队形散布圆", R_{BD}表示其半径大小。

2.2.2 实际捕捉坐标系 末制导雷达对目标的实际 捕捉坐标系为固定在舰船上的 OXYZ坐标系。过编 队散布圆心 O 与编队运动方向定义为 X 轴, Y 轴垂 直于 X 轴, OZ 轴垂直于 OXY 构成的平面。以图 1 所示的环形编队为例,设其初始航行方向为0°。设 在末制导雷达搜索时刻,编队的实际航向为ζ,则 让编队队形绕编队队形散布圆的圆心旋转角度ζ, 导引头开始搜索时实际捕捉坐标系如图 2 所示。



图 2 末制导雷达实际捕捉系示意图

其中, R_0 为导引头与编队圆心的距离, M 和 M' 分别为导弹 $t_0 和 t_1$ 时刻在坐标系中的投影。 $v_d 和 v_s 分$ 别为导弹和舰艇编队运动速度。 $\Delta \varphi$ 为末制导雷达 在搜索过程中的相对于编队目标 T_1 的方位角变化, $\delta 和 \theta 分别为 t_0 和 t_1$ 时刻导弹与目标 T_1 相对于导弹 运动方向的夹角, α 表示雷达入射余角, β 为雷达 入射方向相对于编队 1 中心舰船初始航向的方位 角,则雷达入射方向可表示为^[11]

 $\psi = -\left|\cos\alpha\cos\beta\ \cos\alpha\sin\beta\ \sin\alpha\right| \tag{1}$

在导弹搜索时间 Δt 内,设弹目相对运动速度为 v,以 ω_n 表示导引头飞行与舰船航行所产生的有效 转动角速度矢量,它垂直于雷达视线与弹目相对速 度矢量所构成的平面:

$$\boldsymbol{\omega}_m = \frac{\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\psi}}{R_0} \tag{2}$$

(1)由 ω_m 导致的弹目相对转角变化

$$\Delta \alpha_s = -\frac{\Delta t \cdot |\boldsymbol{v}_s| \cdot \sqrt{1 - (\cos \alpha \cdot \cos \beta)^2}}{R_0} \tag{3}$$

假设导弹飞行速度为 300 m/s, 初始俯仰角 $\alpha_{v,\psi}$ = 5° (雷达在搜索阶段高度较低), 飞行时间 Δt = 60 s, 距离编队圆心的距离为 30 km, 舰船航速为 30 kn, 约 15 m/s, β = 60°。则舰船航行产生的转 角变化为 0.021°, 由于舰船速度远小于导引头运动

速度,所以该部分转角变化可以忽略。以上分析均 针对编队1的中心目标,对其它目标分析类似。

(2)导引头飞行引起的与舰船方位角变化 因为导弹的飞行方向是朝向编队散布圆的圆心,所以位于编队圆心的舰船在导弹飞行过程中的方位角不 会发生变化,考虑编队圆心外的其它舰船*T*₁。

因为编队的实际航向为 ζ ,经推导得到实际捕捉系中的一点 $T_1'[x_1',y_1']^T$,是其初始位置 $T_1[x_1,y_1]^T$ 绕其旋转基准点 $O[x_0,y_0]^T$ 旋转角度 ζ 后的位置。

导弹距离海平面高度远小于导弹与编队的距离,可近似认为 $|OM| = R_0$,经过一段飞行时间 Δt 后,可得

$$\Delta \varphi = \arccos\left(\frac{\left|T_{1}^{'}M\right|^{2} + \left|T_{1}^{'}M'\right|^{2} - \left|MM'\right|^{2}}{2\left|T_{1}^{'}M\right| \times \left|T_{1}^{'}M'\right|}\right)$$
(5)

假设探测到的 $\zeta = 45^\circ$, $\beta = 80^\circ$, $\Delta t = 60$ s。计算 可得方位角变化 $\Delta \varphi = 13.62^\circ$, 初始方位角可表示为 $\lambda = \delta + \beta - \zeta$ 。其中, δ 代表 T'_1OM 构成三角形的角, β 代表雷达入射方向相对于舰船航向的方位角, ζ 代表编队初始方位角。其中

$$\delta = \arccos\left(\frac{\left|T_{1}^{'}M\right|^{2} + |MO|^{2} - \left|T_{1}^{'}O\right|^{2}}{2\left|T_{1}^{'}M\right| \times |MO|}\right)$$
(6)

按照上述假设条件计算可得 $\delta = 6.32^{\circ}$,此时获 得的弹目相对方位角变化范围为 41.31° ~ 54.93°。同 理根据图 1 所示的编队初始位置及上述分析的具体 变换可以推导出其它目标的相对角度变化关系。经 推导可得 0° ≤ Δφ ≤ 15.58°,当| $\beta - \zeta$ | = 0°时对应方 位角变化最小为 0°, $|\beta - \zeta| = 57^{\circ}$ 时对应方位角变 化最大为 15.58°。

3 空时 HMM 建模方法研究

3.1 HRRP 时频特征提取

3.1.1 时域特征 在不发生越距离单元走动 (Migration Through Resolution Cell, MTRC)的角 度范围内(本文均认为为3°),可认为各距离单元的 散射点和其复反射系数是不变的。目标 HRRP 可用 复向量表示为 $h = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$,其中"T"表示转置运算。 h_n 表示第n个距离单元的子回波, N表示 HRRP 中距离单元个数。

对 HRRP 进行取模操作即可得到 HRRP 的时 域特征:

$$\boldsymbol{x} = |\boldsymbol{h}| = [x_1, x_2, \cdots, x_N]^{\mathrm{T}}$$
(7)

式(7)表示的就是时域特征,其直观地反映了目标的尺寸和散射点分布等物理结构特性。

3.1.2 频域特征 对时间连续的实信号 $x_T = \{x(t), t \in T\}$ 做快速傅里叶变换可以定义目标的频域特征,其功率谱定义为

$$F(\omega) = |X(\omega)|^2 = X(\omega)X^*(\omega)$$
(8)

其中

$$X(\omega) = \int x(t)e^{-j\omega t} \mathrm{d}t \tag{9}$$

3.2 HMM 参数学习

传统的 HMM 训练前指定隐状态总数的选择直接影响最终识别结果,基于 TSB-HMM 的识别方法 可避免该问题。此方法能在估计参数集的同时,自 动确定隐状态个数,较适合于训练数据小角域未知 "状态"的 SHMM 模型^[6]。而对于训练数据大角域 的情况,在有限临近的方位关系集合中,目标散射 物理特性变化较缓慢,相应的 HRRP 可近似统计为 平稳的。每个这样的方位角度集合可抽象为一个"状 态",该状态物理意义较为明确。因此,对 SHMM 模型参数的学习采用 Visual Basic 算法^[6,12],而对 THMM 模型参数的学习采用经典 Baum-Welch 算 法^[9,13]。

3.3 大小角域样本识别处理流程

以图 1 中环形编队为例,通过式(5)式及舰艇编 队初始方位角 $\zeta = 0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,间隔为 1°, $\beta = 80^{\circ}$, $\Delta t = 60$ s 的仿真条件计算得到舰艇编队各个目标 相对方位角度 $\Delta \varphi$ 的变化如图 3 所示。其中, T_1 舰 船的相对方位角变化 $\Delta \varphi$ 在 ζ 位于 0° ~ 37°及 53° ~ 90°时大于门限值(门限值选定为 4°是考虑到建立 THMM 模型时需要覆盖目标的多帧角度范围,而 MTRC 角度已在第 3.1.1 节中设置为 3°); $T_2 = T_4$ 舰船的相对方位角变化 $\Delta \varphi$ 在 ζ 的整个变化范围内 均大于门限值; T_3 舰船的相对方位角变化 $\Delta \varphi$ 在 ζ 位于 0° ~ 31°及 59° ~ 90°时大于门限值;而位于编 队散布圆圆心的 T_5 的 $\Delta \varphi$ 恒等于 0。



图 3 舰艇编队各个目标相对方位角度 $\Delta \varphi$ 的变化

3.3.1 小角域样本识别处理流程 针对小角域目标 直接对不发生 MTRC 角度范围内的每帧的距离像 样本进行非相干平均后依次建立 SHMM 模型,这样 若对于每个目标0°~180°方位角范围进行建模,每 类目标需要建立 60 个基于时域特征的 SHMM 模型 和 60 个基于频域特征的 SHMM 模型。识别时如果 待识别目标是运动的,此时可以获知其起始方位角 和方位角的变化范围,然后将小角域的多个测试样 本进行非相干平均后输入对应 SHMM 模型进行匹 配识别,从而减少匹配识别的运算量;如果待识别 目标是静止的,则直接将小角域的多个测试进行非 相干平均后输入 SHMM 模型进行匹配,通过输出最 大似然概率判断测试样本所属目标类型。

3.3.2 大角域样本识别处理流程 针对大角域目标 的 THMM 建模首先将获得的角域按照 MTRC 进行 帧划分,对每帧的样本进行非相干平均处理作为大 角域 THMM 建模的序列。同时每帧内获得的非相 干平均样本用作小角域 SHMM 模型建模。然后可将 建立 THMM 模型需要的角度范围可设定为6°,9°, 12°和15°(按照 3.3 节中分析, 15°足以反映目标的 最大方位角变化),对每个目标0°~180°方位角范围 进行 THMM 建模,每类目标需要建立 230 个基于 时域特征的 THMM 模型和 230 个基于频域特征的 THMM 模型,这在测试数据进行识别时的运算量是 相当大的。如果待识别目标是运动的,则可以获知 其起始方位角和方位角的变化范围,这时可以利用 获得的方位角变化范围减小 3/4 的计算量,同时, 可以利用起始方位角进一步限制搜索的 HMM 模型 的起始方位,从而大量降低匹配的计算量。

设对于方位角变化为大角域采用 STF-HMM 模型得到的一次识别结果为 Γ 。首先将大角域和小 角域的识别结果(判断正确为 1,错误为 0)权重等概 率设置,即大角域权重设置为 0.5,对于划分成的小 角域权重设置为 0.5/Mc, Mc 为大角域划分成小角 域包含的帧数目,然后综合大小角域的样本识别结 果,若 $\Gamma \ge 0.5$,则认为该次为正确判别,否则为错 误判别。这样认为只要大角域判断正确,或者小角 域全部判断正确,则认为该次的识别是正确的。

对于非合作目标时,由于目标的有意非一致运动,会造成编队队形一定程度的扭曲,对于目标的 角域信息获取也会发生较大改变,此时可按照 3.3.1 节所述的小角域样本识别处理流程对目标进行识 别,只需少数几个测试样本进行非相干平均后输入 对应 SHMM 模型即可进行匹配识别。

3.4 基于 S-STF-HMM 的雷达目标识别步骤

(1)训练阶段

步骤 1 采用等间隔角域划分方法来确定整段 训练数据的方位帧,并认为在方位帧范围内可以忽 略散射点 MTRC 效应,将训练样本进行能量归一化 和包络对齐;

步骤 2 采用 3.1.1 节以及 3.1.2 节提出的方法 分别提取目标的时域特征及频域特征;

步骤 3 对距离像样本进行帧内非相干平均后 依次建立帧内基于时域和频域的 SHMM,按照 3.2 节学习模型参数;

步骤 4 对距离像样本进行帧内非相干平均后 依次建立帧间基于时域和频域的 THMM,按照 3.2 节学习模型参数,帧间角度范围取为 3°;

步骤 5 保存训练完后的模型参数,建立训练 模板库。

(2)测试阶段

步骤 1 对测试样本数据进行预处理,包括包 络对齐及能量归一化等操作;

步骤 2 采用 3.1.1 节以及 3.1.2 节提出的方法 分别提取目标的时域特征及频域特征;

步骤 3 针对小角域与大角域样本,分别按照 3.3.1 节与 3.3.2 节的方法,采用基于时域特征的 S-STF-HMM 模型对目标进行分类;

步骤 4 对于时域特征分类效果不佳的情况, 采用基于分层算法的 S-STF-HMM 模型对测试样本 进行重新分类,最后综合编队所有目标的识别结果 完成对编队目标的整体识别。

4 仿真实验与分析

4.1 仿真实验数据分析

本文首先采用某电磁仿真软件仿真计算了某型 濒海战斗舰、某型护卫舰 A(Frigate A, FRA)、某型 护卫舰 B(Frigate B, FRB)和某型驱逐舰和某型航 母一共五类舰船目标的转台数据。为了增加对同型 护卫舰的识别难度,将 FRB 的模型参数进行了缩 放,并和 FRA 的尺寸参数保持一致。其中,濒海战 斗舰长 127.5 m,宽 31.2 m,高 32.5 m;护卫舰长 98.8 m,宽 9.8 m,高 27.3 m;驱逐舰长 135.8 m, 宽 14.6 m,高 26.4 m;航母长 253.9 m,宽 49.7 m, 高 62.4 m。仿真采用的方位角为 0°~360°(0°为正 对船头方向,顺时针方向为方位角增加方向),掠射 角为 0°,单次样本按 0.1°等方位角间隔产生。雷达 参数为中心频率 10 GHz,脉冲重复频率为 2000 Hz, 信号带宽为 150 MHz。

按照等间隔角域划分方法以3°间隔对每类目标进行等角域划分,对每类目标每帧范围内分别抽取20个样本作为训练数据。将舰船编队初始方位角

为 $\zeta = 0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,间隔变化为1°的情况下,舰船编队 目标按照式(5)计算得到的方位角度变化作为测试数 据。其中设定编队目标的之间的距离D = 5 km,雷 达入射方向相对于舰船航向的方位角 $\beta = 80^{\circ}$,导弹 飞行时间 $\Delta t = 60$ s,设定 SHMM 的隐状态个数 *I* 的初始值为 30。

4.2 基于时频域特征及分层算法的 S-STF-HMM 实 验结果及分析

以编队 1 为例进行分析,假设 T_1 和 T_3 目标分 别为 FRA 和 FRB, T_2 目标为濒海战斗舰, T_4 目标 为驱逐舰, T_5 目标为航母。按照 4.1 节设置的仿真 条件,这样训练数据一共包括 20×600 = 12000 个 HRRP。按照 3.3 节分析可知 T_5 目标方位角度变化 恒等于 0°,因此此处采用 SHMM 对 T_5 目标进行识 别,而对于 $T_1 \sim T_4$ 舰船当方位角变化大于门限值的 时候采用 STF-HMM 模型,小于门限值的时候采用 SHMM 模型。

对 $T_1 \sim T_5$ 目标 HRRP 的时频特征识别的混淆 矩阵如表 1 所示。

由表 1 可知,在针对 T_1 和 T_3 目标时,时域特

20×120个训练样本	基于时域特征的 S-STF-HMM					基于频域特征的 S-STF-HMM				
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
T_1	91.1	1.1	1.1	6.7	0	71.2	3.3	14.4	10.0	1.1
T_2	3.3	80.1	3.3	10.0	3.3	2.2	90.1	2.2	1.1	4.4
T_3	1.1	0	93.3	5.6	0	13.2	4.4	73.5	3.3	5.6
T_4	2.2	11.1	2.2	82.3	2.2	3.3	3.3	3.3	87.9	2.2
T_5	3.3	5.6	3.3	1.1	86.7	2.2	3.3	2.2	6.7	85.6
平均识别率			86.7					81.7		

表1 基于时频特征识别的 S-STF-HMM 识别结果(%)

征的识别效果更好;而针对 T_2 和 T_4 目标时,频域 特征的识别效果更好;针对 T_5 目标,时域与频域特 征的识别效果相近。因此,为进一步提高编队目标 的整体识别率,采用分层识别的方法对上述测试样 本重新进行识别^[6]。对时域特征判断为 T_1 和 T_3 目标 的直接作为识别结果,而判断为 T_2 和 T_4 的目标采 用频域特征重新判断,并将新的结果作为最终结果, 分层识别结果如表 2 所示。

由表 2 可知分层识别算法进一步提高了编队目标的平均识别率。

4.3 算法运算量分析

仿真实验采用硬件平台 CPU 主频为 3.4 GHz、 内存为 16 GB 的计算机,软件平台是 Matlab2009,

表 2 基于分层识别算法的 S-STF-HMM 识别结果(%)

20×120	分层识别算法							
207120 01551774	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5			
T_1	91.1	1.1	1.1	6.7	0			
T_2	3.3	89.0	3.3	1.1	3.3			
T_3	1.1	0	93.3	5.6	0			
T_4	2.2	1.1	2.2	92.3	2.2			
T_5	3.3	5.6	3.3	1.1	86.7			
平均识别率			90.5					

算法耗时采用 cputime 函数计算得到。

首先,需要对舰船目标全方位角建立匹配识别时所需要的 HMM 模型数据库。按照每帧样本数目不同,采用 4.3.1 节中的仿真算法训练时间如表 3 所示。t₁和 t₂分别表示基于时域特征和频域特征的 S-STF-HMM 数据库训练时间。由表 3 可知,随每帧样本数据增加,训练 HMM 模型数据库的时间均有所增加,这是因为训练模型时样本数增加会增加算法收敛的迭代时间。对于两种方法在每帧样本数目一致情况下,基于频域特征的 S-STF-HMM 方法训练时间比基于时域特征的 S-STF-HMM 方法训练时间比基于时域特征的 S-STF-HMM 方法要少一半,这是因为功率谱是实对称的,可将原特征向量维数降低一半,减少运算量。

基于时域特征的 S-STF-HMM 方法平均识别时 间为 0.32 s,基于频域特征的 S-STF-HMM 方法平 均识别时间为 0.19 s,基于分层算法的 S-STF-HMM 方法平均识别时间最长为 0.39 s,这是因为识别时

表 3 基于时域特征和频域特征的 S-STF-HMM 数据库训练时间(s)

每帧样 本数目	1	2	5	10	20	30
t_1	66.06	131.36	192.48	255.65	318.90	381.35
t_2	34.19	66.21	94.57	130.32	150.48	186.44

进行了二次匹配。基于分层算法的 BS-STF-HMM 方法平均识别时间最短为 0.11 s,这是因为识别时 匹配的 HMM 模型数量相对最小。

为了验证本文提出的 S-STF-HMM 识别方法的 有效性,通过对海实测数据进行了进一步验证。

4.4 实测实验数据处理及说明

本文通过雷达测量获取一种小型货船和两种大型客船的实测数据,雷达测量系统工作频率为 X 波段,波形采用线性调频方式,距离分辨率为 7.3 m, 采样频率为 40 MHz。客船 1 长 164 m,宽 26 m, 吃水深度 6 m;客船 2 长 164 m,宽 25 m,吃水深度 6 m;货船长 98 m,宽 21 m,吃水深度 3.9 m。

文中对 3 种船型数据的数据是分时录入的。对 客船1某两次天线扫描图如图4所示。



图 4 客船 1 某两个时刻的回波扫描图

图 4 中圆圈所示为本文关注的客船 1 目标,且 随时间推移距离雷达越来越远,方位角也不断发生 变化,因此获得的距离像存在距离平移。

通过多次测量和处理同型客船进出港后选取 3 种船型俯仰角0°、方位角180°~360°的 HRRP 样本 作为测试数据,客船方位角间隔0.5°,货船方位角 间隔0.1°,距离单元数均为 61。仍按3°间隔建立 SHMM 模型,其中对客船目标和货船目标每帧范围 分别抽取 4 个和 20 个样本作为训练数据,建立 THMM 模型时方位角分别取 6°,9°,12° 和15° 间隔。

为测试方位角范围及建立 THMM 模型方位角 间隔对识别率的影响,选取的样本为 3 种船型单次 进港时俯仰角 0°、方位角分别为180°~240°,240° ~300°和 300°~360°,方位角采样间隔客船为 0.5°, 货船为 0.1°。分别以 6°,9°,12°和15°间隔数据作为 3 种船型获得的大角域方位角数据间隔,3 类目标测 试样本处理后总数为 630 个,同时选取的测试数据 基本包含了目标训练时各种方位角的情况。

4.5 实测数据分析

识别实验的平均结果如表 4 所示。ζ 代表测试 样本方位角度范围, ε 代表方位角数据间隔, P 代 表固定方位角及固定方位角间隔下 3 类船型的平均 识别率, Pa 代表固定方位角及不同方位角间隔下 3 类船型的平均识别率。由表 3 可知,随目标方位角 间隔增加,识别率呈增加趋势。位于舰船头与尾的 平均识别率要高于位于舰船侧翼的识别率,这是因 为在位于舰船头部与尾部的方位角度下,舰船距离 像长度较长,反映了目标更为精细的结构信息,此 时目标之间的可分性较优。

5 结束语

本文针对末制导雷达在搜索目标阶段对编队目标可获得的大角域信息,提出了一种基于时域和频 域特征的分层识别 S-STF-HMM 方法。该方法有效 利用目标在小角域范围内空间维上隐含信息及目标 在大角域范围内时间维上隐含信息。与对一类目标 全方位角训练数据只建立一个 THMM 的方法相比, 本文提出的方法可提高识别性能,通过对 5 类舰船 目标的仿真和 3 类民用船只的外场实测数据分析表 明该方法是有效的。

表 4	基于 S-STF-HMM	模型不同方位角数据间隔下	3 类船型的平均识别率
-----	--------------	--------------	-------------

ζ (°)	180~240				240~300				300~360			
ε (°)	6	9	12	15	6	9	12	15	6	9	12	15
P(%)	89.0	90.9	92.4	93.8	84.3	86.2	88.1	89.5	90.5	92.4	93.3	94.8
$\mathrm{Pa}(\%)$	91.5			87.0			92.8					

参考文献

 Bai Xue-ru, Feng Zhou, and Bao Zheng. High-resolution radar imaging of space targets based on HRRP series[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 7(3): 1-13.

Guo Zun-hua, Li Da, and Zhang Bo-yan. Survey of radar target recognition using one-dimensional high range

^[2] 郭尊华,李达,张伯彦.雷达高距离分辨率一维像目标识别[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(1):53-60.

- [3] Tugac S and Efe M. Radar target detection using hidden markov models[J]. Progress in Electromagnetic Research B, 2012, 43(3): 241–259.
- [4] Tugac S and Efe M. Hidden Markov model based target detection[C]. Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion, Edinburgh, England, 2010: 1–7.
- [5] 郭武,朱明明,杨红兵.基于隐马尔科夫模型的 RCS 识别方 法研究[J].现代雷达, 2013, 35(3): 37-40.
 Guo Wu, Zhu Ming-ming, and Yang Hong-bing. A study on RCS recognition method of radar targets based on hidden markov model[J]. *Modem Radar*, 2013, 35(3): 37-40.
- [6] 潘勉, 王鹏辉, 杜兰, 等. 基于 TSB-HMM 模型的雷达高分辨
 距离像目标识别方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7):
 1547-1554.

Pan Mian, Wang Peng-hui, Du Lan, *et al.*. Radar HRRP target recognition based on truncated stick-breaking hidden Markov model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1547–1554.

 [7] 潘勉. 雷达高分辨距离像目标识别技术研究[D]. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2013.
 Pan Mian. Study on target recognition technology based on

high range resolution profile[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'an: Xidian University, 2013.

- [8] 裴炳南,保铮.基于目标散射中心和HMM分类的多视角雷达目标识别方法[J].电子学报,2003,31(5):786-789.
 Pei Bing-nan and Bao Zheng. Multi-aspect radar target recognition method based on scattering centers and HMMs classifiers[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(5): 786-789.
- [9] Liao Xue-jun, Paul R, and Lawrence C. Identification of ground targets from sequential high-range-resolution radar

signatures[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1230–1242.

- [10] 张新征,黄培康.基于联合时频特征和 HMM 的多方位 SAR 目标识别[J].系统工程与电子技术,2010,32(4):712-717. Zhang Xin-zheng and Huang Pei-kang. Multi-aspect SAR target recognition based on combined time-frequency feature and HMM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(4):712-717.
- [11] 任艳, 杜琳琳, 陈曾平. 基于末制导雷达的海面舰船 ISAR 成 像转角分析[J]. 宇航学报, 2011, 32(2): 401-406.
 Ren Yan, Du Lin-lin, and Chen Zeng-ping. Analysis of rotation angle condition in ship target ISAR imaging based on terminally guided missile-borne radar[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2): 401-406.
- [12] Du Lan, Wang Peng-hui, and Liu Hong-wei. Bayesian spatiotemporal multitask learning for radar HRRP target recognition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3182–3196.
- [13] 刘伶俐,王朝立,于震. CHMM语音识别初值选择方法的研究
 [J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(4): 323-326.
 Liu Ling-li, Wang Chao-li, and Yu Zhen. Study of initial value selection method for speech recognition based on continuous hidden markov models[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2012, 34(4): 323-326.
- 但 波: 男,1985年生,博士生,研究方向为反舰导弹目标识别 与选择技术.
- 姜永华: 男, 1957年生, 硕士, 教授, 研究方向为精确制导技术.
- 李敬军: 男,1982年生,博士生,研究方向为雷达信号设计与处理.
- 卢 毅: 男,1981年生,博士生,工程师,研究方向为目标识别 与选择技术.