

## 基于相对平均误差的高分辨距离像目标识别算法

周 诺 陈 炜

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

**摘 要:** 相似度计算是基于模板匹配的高分辨距离像自动目标识别研究中的核心问题之一。该文从误差计算方法和相似度测量准则两方面对相似度计算方法的选取进行了深入的讨论, 提出一种基于相对平均误差的相似度计算方法。实验结果证明, 与目前普遍使用的基于绝对均方误差的模板匹配方法相比, 基于相对平均误差的模板匹配方法具有更强的目标识别能力、更好的识别鲁棒性, 以及在模板角域增大、模板数量明显降低的情况下, 仍具备较高的识别能力, 为工程上处理高识别率与低模板数量之间的矛盾问题提供了一种有效的解决方法。

**关键词:** 目标识别; 高分辨距离像; 相似度计算; 误差计算; 相似度测量准则

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1105-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00599

## A Relative-Average-Error Based HRRP Target Recognition Algorithm

Zhou Nuo Chen Wei

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Similarity computation is one of the significant issue in Template-Matching-Method (TMM) based high range resolution automatic target recognition. This paper demonstrates error computation and similarity measurement metrics in similarity computation, and proposes a Relative-Average-Error (RAE) based similarity algorithm employed in TMM. The experiment result shows that, comparing with the widely used Absolute-Mean-Square-Error (AMSE) based TMM, RAE based TMM obtains higher probability of correct classification (Pcc) and more robust recognition ability. Meanwhile, in application, RAE could be an effective solution to take the tradeoff of higher Pcc and less saving memory space for templates.

**Key words:** Target recognition; High Rang Resolution Profiles (HRRP); Similarity computation; Error computation; Similarity measurement metric

### 1 引言

地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像是目前广泛用于地面运动目标跟踪和静止目标识别的两种技术。其中, GMTI 利用多普勒频移检测、定位、跟踪地面运动目标; SAR 成像通过相干叠加一定时间内静止目标的回波, 获得记录静止目标形状结构的高分辨 2 维图像。但是, 受 GMTI 分辨率和 SAR 成像相干回波积累时间等因素限制, GMTI 和 SAR 成像获得的数据均无法用于识别地面运动目标。高分辨距离像(High Range Resolution Profile, HRRP)是利用宽带信号技术获得的目标在雷达径向上的 1 维投影, 它的幅值分布反映了目标沿雷达径向的精细结构。并且, 与 2 维 SAR 图像数据相比, HRRP 具有获取速度快、数据存储量小和处理复杂度低等优点。因此, 高分辨距离(High Range Resolution, HRR)雷

达模式被视为 GMTI 和 SAR 成像的补充技术, 广泛用于地面运动目标识别研究<sup>[1-3]</sup>。

HRRP 具有很强的方位敏感性, 具体表现为 HRRP 幅值分布随目标相对雷达方位角的变化而改变。HRRP 的方位敏感性大大增加了在 360° 全方位角上提取统一的 HRRP 识别特征的难度。研究发现<sup>[4-9]</sup>, 尽管 HRRP 幅值分布在不同方位角上的差异很大, 但它们在方位角变化较小的范围内却是稳定的, 且它们的非相关平均可在有效提高信噪比的同时, 很好地反映此方位角范围内 HRRP 的幅值分布情况。文中将此方位角范围称作角域。

根据 HRRP 方位敏感性和角域内 HRRP 相对稳定的特点, 现有文献大多采用基于模板匹配(Template Matching Method, TMM)的方法进行 HRRP 目标识别。它的思路是, (1)在全方位角上构建记录各个角域 HRRP 特征的模板; (2)计算待识别 HRRP 与模板间的相似程度; (3)根据(2)中得到的待识别 HRRP 与模板间的相似程度判断待识别 HRRP 的类别<sup>[2-4, 10-14]</sup>。由此可见, 相似度计算不仅是待识别 HRRP 与模板间差异的度量方法, 也是

判断待识别 HRRP 类型的重要评判依据,而“一种新的 HRRP 相似度测度方法往往可以导出一种新的识别算法”<sup>[4]</sup>。因此,值得认真研究。

本文对模板角域的确定以及 HRRP 相似度计算方法的选取进行了详细且深入的分析。通过对误差计算方法和相似度测量准则两方面的讨论,提出一种基于相对平均误差(Relative Average Error, RAE)的相似度计算方法。实验证明,与目前普遍使用的绝对均方误差(Absolute Mean Square Error, AMSE)<sup>[2-4,13,14]</sup>相比,基于 RAE 的 TMM 具有更强的目标识别能力、更好的识别鲁棒性,以及在识别率相同的情况下具有模板存储空间小和计算量低的优点。

## 2 模板角域的划分

HRRP 方位敏感性使从全方位角 HRRP 中提取统一的识别特征的难度大大增加,而角域内 HRRP 幅值分布稳定性却为 HRR 自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)的实现提供了很好的解决思路。本节将从散射点模型理论的角度讨论模板角域的划分方法。

### 2.1 散射点模型理论

散射点模型理论认为<sup>[4,8]</sup>,目标在光学区内总的散射特征可由目标表面一系列不连续点的散射特征构成,这些不连续的点称为目标等效多散射中心,又称目标散射点。当雷达采用宽频带信号后,距离向分辨距离单元长度减小至亚米级,目标相对于雷达的回波不再是点信号,而是目标散射点沿雷达径向距离的 1 维分布,如式(1)~式(5)。设一目标共有  $N$  个散射点  $p_1, p_2, \dots, p_N$ , 如式(1)。根据它们距雷达径向距离的大小,  $p_1, p_2, \dots, p_N$  分别落入相应的  $n$  个距离单元中,每个距离单元有  $N_i$  个散射点  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN_i}$ , 如式(2)~式(4)。各距离单元内的散射点互不相同,如式(5)。HRRP 在第  $i$  个距离单元的幅值由落入此距离单元的全部散射点相对雷达的回波经相干叠加取模值后得到,如式(6)。其中,  $h(i)$  是 HRRP 在第  $i$  个距离单元上的幅值,  $N_i$  是沿径向与雷达距离在第  $i$  个距离单元的散射点个数,  $r_m$  和  $\sigma_m$  分别是第  $m$  个散射点距雷达的径向距离和相对雷达的散射强度,  $c$  是光速,  $\Delta f$  是频率采样宽度。各距离单元上的幅值  $h(i)$  构成 HRRP 幅值向量  $\mathbf{H}_{\text{HRRP}}$ , 如式(7)。

$$\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN_i}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (3)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 \cup \mathbf{P}_2 \cdots \cup \mathbf{P}_n \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_i \cap \mathbf{P}_j = \emptyset, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j \quad (5)$$

$$h(i) = \left| \sum_{m=1}^{N_i} \sigma_m e^{j2\pi \frac{r_m}{c} i \Delta f} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{\text{HRRP}} = [h(1), h(2), \dots, h(n)] \quad (7)$$

### 2.2 角域划分

由散射点模型理论可知,目标散射点模型的改变、散射点沿雷达径向距离分布的改变,以及散射点相对雷达径向距离或散射强度等的改变均可引起 HRRP 幅值分布的变化。通常, HRRP 敏感性问题可从散射点模型改变、散射点越距离徙动、距离单元内散射点径向距离改变 3 方面解释<sup>[8,9]</sup>。

散射点模型变化指,同一角域内目标相对雷达的散射模型相同,即目标相对雷达的散射点个数、散射点间的分布情况、散射点散射强度等基本不变;当方位角变化超过角域范围后,目标相对雷达的散射点数量、散射点间距离等均发生不同程度的变化,原有散射点模型不再适用,需要使用新的散射点模型表示目标此时状态。对于微波雷达,散射点模型不发生改变的角域在  $10^\circ$  左右。

散射点越距离徙动指,在散射点模型不改变的前提下,目标散射点沿雷达径向的分布随目标相对雷达方位角变化而改变,如图 1 所示。图 1(a)是目标散射点在某方位角时沿雷达径向的分布情况,散射点  $\{x_2, x_3, x_4, x_5\}$  和散射点  $\{x_1, x_6, x_7\}$  分别落入距离单元  $[n_3, n_4]$  和  $[n_4, n_5]$  中。图 1(c)是目标经图 1(b)沿顺时针旋转  $\Delta\theta$  后散射点沿雷达径向的分布情况,散射点  $\{x_2, x_3\}$ , 散射点  $\{x_1, x_4, x_5, x_6\}$ , 散射点  $x_7$  分别落入距离单元  $[n_3, n_4]$ ,  $[n_4, n_5]$ ,  $[n_5, n_6]$ 。比较图 1(a)和图 1(c)可以看出,目标散射点经过  $\Delta\theta$  方位角改变后,  $x_1, x_2, \dots, x_7$  相对雷达径向距离发生了不同程度的改变。 $x_4, x_5$  从距离单元  $[n_3, n_4]$  中移出,移入距离单元  $[n_4, n_5]$  中,  $x_7$  从距离单元  $[n_4, n_5]$  中移出,移入距离单元  $[n_5, n_6]$  中。根据式(2),式(6),当目标散射点沿雷达径向分布发生改变时,  $N_i, \sigma_m, r_m$  相应改变,  $h(i)$  随之变化。式(8)是散射点不发生越距离单元徙动的条件,其中  $\Delta R$  代表距离单元的长度,  $L$  表示目标沿雷达径向的长度。例如,对于长度通常在 6~8 m, 宽度通常在 2~4 m 的地面运动目标,当使用距离分辨率  $\Delta R = 0.3048$  m 的雷达获取目标 HRRP 时, HRRP 相对雷达不发生越距离徙动的方位角范围在  $2^\circ$  至  $5^\circ$  之间。

$$\Delta\varphi < \frac{\Delta R}{L} \quad (8)$$

距离单元内散射点径向距离改变指,在目标各

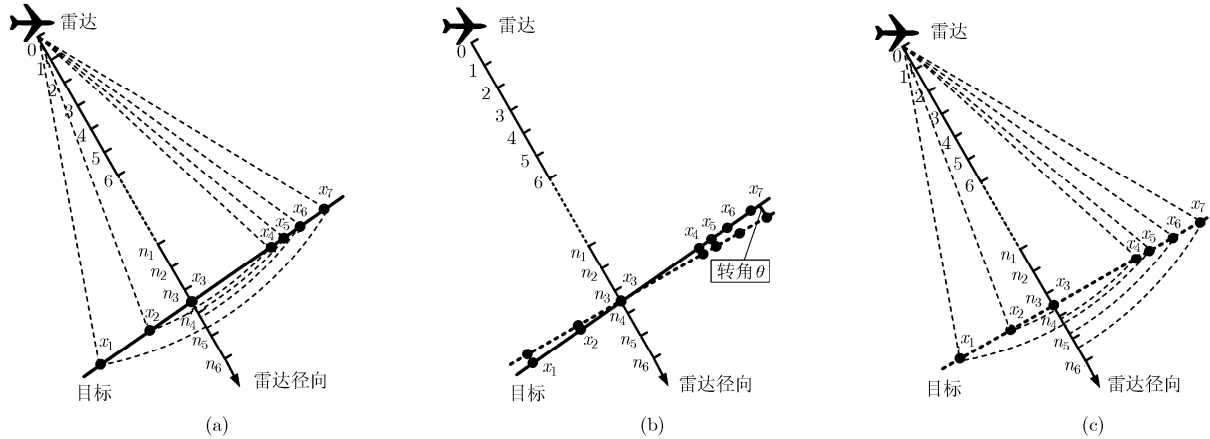


图 1 散射点越距离徙动示意图

散射点不发生越距离单元徙动的情况下, 方位角微小的变化仍有可能引起部分散射点沿雷达径向距离  $r_m$  的改变, 如图 1(a), 图 1(c)中  $x_1, x_6$ , 从而导致  $h(i)$  的改变。对微波雷达,  $0.01^\circ$  方位角的改变即可引起距离单元中个别散射点相对雷达径向距离的变化。

通过上述讨论可知, 由散射点模型不发生改变、散射点不发生越距离徙动、各距离单元内散射点没有距离变化 3 种情况得到的角域内的 HRRP 均有很好的稳定性, 且随着 3 者角域范围依次减小, 角域内 HRRP 细节特征逐渐增加, HRRP 间稳定性逐步增强。从 TMM 识别算法运行效率和识别准确精度方面考虑, 3 者中由距离单元内散射点径向距离不发生改变条件划分角域得到的 HRRP 特征最为完整, 但是每  $0.01^\circ$  划分一个角域迫使 HRRP 在全方位角上的特征需要用 36000 个模板表示。这样的划分导致模板库存储空间和识别算法计算量均明显增加。若按照不发生散射点模型改变或不发生越距离徙动条件划分角域, 不仅可以获得相对完整的 HRRP 特征, 同时模板数量缩减在 90% 以上。因此, 使用不发生散射点模型改变或不发生越距离徙动条件划分角域的方法更为合适。

### 3 相似度计算

在 TMM 识别中, 相似度计算既是待识别 HRRP 与模板差异的度量方法, 又是判断待识别 HRRP 类别的重要依据, 它的选取很大程度上决定了 TMM 识别算法的准确程度。误差计算方法和相似度测量准则是相似度计算中的两个重要组成部分。现有文献普遍使用绝对误差描述 HRRP 间差异, 采用 MSE 作为相似度的测量准则<sup>[2-4,13,14]</sup>, 用于 TMM 识别的相似度计算。但是, 它们是否能够准确地反映 HRRP 间的相似程度, 鲜有文章讨论。

为方便下文描述, 设目标类型数目为  $S$ 。  $\mathbf{H} = \{h(i), i = 1, 2, \dots, n\}$  是待识别 HRRP。HRRP 在全方位角上的模板数量为  $T$ 。模板库表示为  $\mathbf{g} = \{g_{p,q}(i) | p = 1, 2, \dots, S, q = 1, 2, \dots, T, i = 1, 2, \dots, n\}$ , 其中,  $g_{p,q}(i)$  表示第  $p$  类目标在第  $q$  个角域模板上第  $i$  个距离单元内的幅值。

#### 3.1 误差计算

绝对误差和相对误差是描述测量值  $\mathbf{x}'$  与参照值  $\mathbf{x}$  间差异的有效方法, 它们的表达式如式(9), 式(10)<sup>[15]</sup>。为方便本节和后文的表述, 本文将绝对误差定义为  $e_A$ , 相对误差定义为  $e_R$ , 绝对误差和相对误差统称为误差  $e$ 。在 TMM 识别中, 记录 HRRP 幅值分布特征的  $g_{p,q}$  和待识别  $\mathbf{H}$  分别为误差计算中的参照值和测量值, 根据式(9), 式(10)的定义,  $g_{p,q}$  与  $\mathbf{H}$  在各个距离单元上的绝对误差和相对误差计算如式(11), 式(12)。

$$e_A = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \tag{9}$$

$$e_R = \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}{\mathbf{x}} \tag{10}$$

$$e_A(i) = |g_{p,q}(i) - h(i)|, i = 1, 2, \dots, n \tag{11}$$

$$e_R(i) = \frac{|g_{p,q}(i) - h(i)|}{g_{p,q}(i)}, i = 1, 2, \dots, n \tag{12}$$

由式(11), 式(12)可知, 绝对误差表现的仅是  $h(i)$  和  $g_{p,q}(i)$  之间的数值差异, 而相对误差在说明  $h(i)$ ,  $g_{p,q}(i)$  之间数值差异的同时进一步反映了  $h(i)$  相对于  $g_{p,q}(i)$  的差异程度。这一点在  $|g_{p,q}(u) - h(u)| = |g_{p,q}(v) - h(v)|$ ,  $h(u) \neq h(v)$ ,  $g_{p,q}(u) \neq g_{p,q}(v)$ ,  $u \neq v$ ,  $u \in [1, 2, \dots, n]$ ,  $v \in [1, 2, \dots, n]$ , 的情况下尤为重要。假设  $|g_{p,q}(u) - h(u)| = |g_{p,q}(v) - h(v)| = 1$ ,  $g_{p,q}(u) = 100$ ,  $g_{p,q}(v) = 2$ 。在使用绝对误差计算差异时, 因为  $|g_{p,q}(u) - h(u)| = |g_{p,q}(v) - h(v)|$ ,  $h(u)$ ,  $g_{p,q}(u)$  间差异与  $h(v)$ ,  $g_{p,q}(v)$  间差异相同。但实际上,  $h(u)$  相

对于  $g_{p,q}(u) = 100$  的差异仅是  $g_{p,q}(u)$  的 1%，而  $h(v)$  相对于  $g_{p,q}(v) = 2$  的差异竟占  $g_{p,q}(v)$  的 50%。显然， $g_{p,q}(u)$  与  $h(u)$  之间的差异程度远远小于  $g_{p,q}(v)$  与  $h(v)$  之间的差异。从这个角度分析可知，与绝对误差相比，相对误差提供了更加全面、准确的误差信息，更适合描述  $g_{p,q}$  与  $\mathbf{H}$  之间的差异情况。

### 3.2 相似度测量准则

在获得  $g_{p,q}$ ， $\mathbf{H}$  间差异后，相似度计算可通过相似度测量准则得到评价  $g_{p,q}$ ， $\mathbf{H}$  间相似程度的数值。目前文献中常用的相似度测量准则是 MSE 方法<sup>[2-4,13,14]</sup>，如式(13)，

$$\text{MSE}(e) = \frac{\sum_{i=1}^n e(i)^2}{n} \quad (13)$$

可进一步写为

$$\text{MSE}(e) = \frac{\sum_{i=1}^n e(i)e(i)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha(i)e(i)}{n} \quad (14)$$

从数学角度分析，式(14)相当于对权向量  $\alpha = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(n))$  作用后的数值  $\alpha(i)e(i)$  进行平均计算，得到的是  $\alpha(i)e(i)$  的均值。由于  $(\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(n)) = (e(1), e(2), \dots, e(n))$ ， $e(i)$  由  $h(i)$ ， $g_{p,q}(i)$  之间差异决定，且受噪声、目标相对雷达距离、方位角等因素影响， $e(i)$  具有很大的随机性，因此，权向量  $\alpha$  是一个随机向量。式(14)中  $\text{MSE}(e)$  相当于先对各误差作用一个随机系数后，再对其进行计算。这样的随机系数破坏了误差的真实性，而随后的各种运算均是建立在这些被随机系数破坏的误差值上的，导致计算结果严重失真。若直接使用误差  $e(i)$  均值进行相似度评价，计算中  $e(i)$  数值保留完好，计算结果可信度增加，相应的均值误差(Average Error, AE)相似度测量准则如式(15)。此外，文献[15]指出，当  $e$  中某些  $e(i)$  略大于  $e(j)$  时， $i = 1, 2, \dots, k$ ， $1 \leq k \ll n$ ， $j = 1, 2, \dots, n$ ， $j \neq i$ ， $\text{MSE}(e)$  和  $\text{AE}(e)$  计算结果均受  $e(i)$  数值的变化而改变，但  $\text{MSE}(e)$  受  $e(i)$  的影响程度是剧烈的，而  $\text{AE}(e)$  受  $e(i)$  影响的程度很小；当  $e$  中  $e(i) \gg e(j)$  时，即使  $e$  中  $e(i)$  的数量很少， $\text{MSE}(e)$  计算结果也几乎由  $e(i)$  决定，忽视了真正反映  $e$  分布且对  $e$  评估有重要作用的  $e(j)$  的存在。因此，与  $\text{MSE}(e)$  相比，使用  $\text{AE}(e)$  得到的  $g_{p,q}$ ， $\mathbf{H}$  间相似度更加准确，也更为稳健。

$$\text{AE}(e) = \frac{\sum_{i=1}^n e(i)}{n} \quad (15)$$

## 4 实验结果与分析

本文使用距离分辨率为 0.3048 m 的 X 波段 HH

极化雷达 SAR 图像集得到 4 类地面目标在  $360^\circ$  全方位角上的 HRRP。训练 HRRP 和测试 HRRP 分别由俯仰角为  $17^\circ$ ， $15^\circ$  的 SAR 图像集生成，目标模板库由训练 HRRP 经全方位角上的角域划分、角域内 HRRP 非相关平均等处理得到<sup>[16]</sup>。为了验证相对误差计算和平均误差相似度测量准则对 TMM 辨别能力提高的作用，本文根据第 2 节中讨论的角域确定方法，使用基于 AMSE，基于绝对平均误差(Absolute Average Error, AAE)，基于相对均方误差(Relative Mean Square Error, RMSE)和基于 RAE 相似度计算的 TMM，对  $2^\circ$ ， $5^\circ$ ， $10^\circ$  角域模板库中 2 至 4 类目标进行识别实验，识别结果如表 1 所示。

表 1 AMSE, AAE, RMSE, RAE 平均识别率(%)

		AMSE	AAE	RMSE	RAE
$2^\circ$	2 分类	84.763	86.39	87.259	88.591
	3 分类	75.391	78.66	79.358	81.313
	4 分类	69.285	73.535	73.711	75.724
$5^\circ$	2 分类	83.42	84.751	86.381	86.699
	3 分类	74.247	76.927	78.67	79.147
	4 分类	67.388	71.701	73.461	74.451
$10^\circ$	2 分类	81.031	81.42	84.931	85.25
	3 分类	71.488	72.608	76.619	77.192
	4 分类	65.401	66.992	71.123	71.975

由表 1 可知，在模板角域相同、目标分类数目相同的情况下，AAE, RMSE, RAE 平均识别率均高于 AMSE 平均识别率。其中，相对于 AMSE, RAE 平均识别率增幅最大，增幅均值在 5% 以上；RMSE 次之，增幅均值为 4.3%；AAE 平均识别率增幅最小，但增幅均值仍在 2.2% 以上。由此可见，相对误差计算和平均误差相似度测量准则对识别率的提高均有很大的帮助，而两者的结合可使 TMM 的识别能力进一步增强。

在模板角域相同、目标分类数目不同的情况下，AMSE, AAE, RMSE, RAE 平均识别率均随目标分类数目增加而降低，其降低程度用式(16)度量。

$$C_{i,j} = \frac{r_i - r_j}{r_i} \quad (16)$$

式(16)中， $C_{i,j}$  是在模板角域不变的情况下，目标分类数由  $i$  增至  $j$  后， $j$  类目标分类平均识别率相对  $i$  类目标分类平均识别率的降低程度， $r_i$ ， $r_j$  分别表示目标分类数目为  $i$  和  $j$  时的平均识别率， $i = 2, 3$ ， $j = 3, 4$ ，且  $i < j$ 。显然， $C_{i,j}$  越小，平均识别率随

目标分类数目增加而降低的程度越小, 即识别能力的稳定性越强; 反之,  $C_{i,j}$  越大, 平均识别率随目标分类数目增加而降低的程度越大, 识别稳定性越弱。将表 1 中数据代入式(16)得到表 2, 表 3 所示结果。根据表 2, 表 3 可知, AAE, RMSE, RAE 平均识别率随目标分类数目增加而降低的程度均值都低于 AMSE 平均识别率随目标分类数目增加而降低的程度均值。进一步分析又知, RAE 的  $C_{2,3}$  均值分别低于 AMSE, AAE, RMSE 的  $C_{2,3}$  均值 2.5%、0.9%、0.5%, RAE 的  $C_{3,4}$  均值分别低于 AMSE, AAE, RMSE 的  $C_{3,4}$  均值 2.1%、0.5%、0.4%, 由此可见, 基于 AAE, RMSE, RAE 的 TMM 识别鲁棒性均高于基于 AMSE 的 TMM 的识别鲁棒性, 而基于 RAE 的 TMM 的识别能力的鲁棒性最强。

表 2 目标数由 2 类增至 3 类后, AMSE, AAE, RMSE, RAE 的  $C_{2,3}$  均值比较(%)

	AMSE	AAE	RMSE	RAE
2° 模板	11.0567	8.9478	9.0547	8.2153
5° 模板	10.9961	9.2317	8.9267	8.7106
10° 模板	11.777	10.8229	9.7868	9.4522

表 3 目标数由 3 类增至 4 类后, AMSE, AAE, RMSE, RAE 的  $C_{3,4}$  均值比较(%)

	AMSE	AAE	RMSE	RAE
2° 模板	8.099	6.5154	7.1159	6.8734
5° 模板	9.2381	6.7935	6.6213	5.9333
10° 模板	8.5147	7.7347	7.1732	6.7585

当目标分类数目相同、模板角域不同时, 由第 2 节理论分析知, 受角域增大影响, 角域内各 HRRP 稳定性减弱, 非相关平均后模板包含 HRRP 细节特征减少, 表 1 数据显示, AMSE, AAE, RMSE, RAE 平均识别率均随模板角域增加而降低。值得注意的是, 尽管 AMSE 和 RAE 的平均识别率都随模板角域增加而降低, 但 RAE 的平均识别率始终高于 AMSE 的平均识别率; 而且, RAE 在 10° 角域模板条件下得到 2 至 4 类的平均识别率 85.25%, 77.192%, 71.975%, 比 AMSE 在 2° 角域模板条件下得到 2 至 4 类的平均识别率 84.763%, 75.391%, 69.285%, 平均高出 1.66%, 如图 2。也就是说, RAE 在模板数量比 AMSE 模板数量少 80% 的情况下, 平均识别率均值仍然高出 AMSE 平均识别率均值 1.66%。通常, 识别率的提高与模板数量的减少是互为矛盾的。高的识别率往往通过减小角域范围、增

加模板数量实现; 而模板数量的减少往往以识别率的降低为代价。但是, 图 2 的实验结果说明, RAE 可以在模板数量大大降低的条件下, 依旧获得较高的识别率, 为工程上解决高识别率与低模板数量间的矛盾问题提供了有效的解决方案。

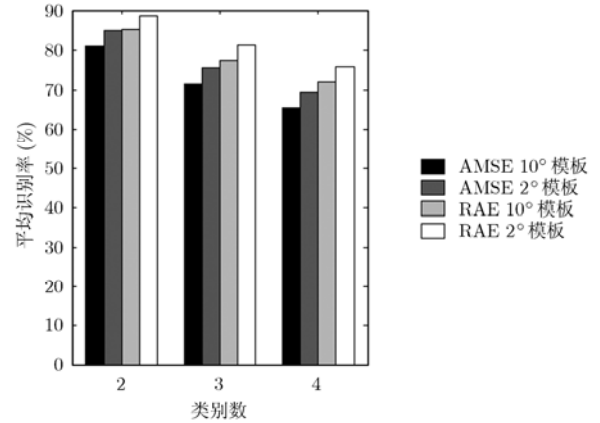


图 2 AMSE 2° 模板与 RAE 10° 模板 2 至 4 类平均识别率比较图

## 5 结束语

本文针对基于 TMM 的 HRR ATR 中的相似度计算问题, 提出一种基于 RAE 的相似度计算方法。文中阐述了相对误差计算和平均误差相似度测量准则相对于绝对误差计算和均方误差相似度测量准则的优越性。采用 2°, 5°, 10° 角域模板库对 2 至 4 类目标进行识别实验。结果表明, 从识别能力分析, 相对误差计算和基于平均误差的相似度测量准则对识别率的提高均有很大帮助, 而两者的结合使 TMM 具有更强的目标识别能力和更好的识别稳健性。从工程应用方面看, 与目前普遍使用的 AMSE 相比, RAE 在模板角域增大、模板数量明显降低的情况下, 依旧能够获得较高的识别率, 为识别算法在保证高识别率的同时缩减模板库存储空间、提高运行效率提供了一个有效的解决方法。

## 参考文献

- [1] Westerkamp J J, Williams R L, and Palomino A P, *et al.*. Synthetic moving target HRR profile generation using measured and modeled target data. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VII. Proceedings of SPIE. Orlando, FL, USA, 24 April, 2000, Vol. 4053: 631-641.
- [2] Blasch E. Modeling intent for a target tracking and identification scenario. Signal and Data Processing of Small Targets 2004, Proceedings of SPIE. Orlando, FL, USA, 13 April 2004, Vol. 5428: 260-269.
- [3] Nguyen D H, Kay J H, and Orchard B J, *et al.*. Classification and tracking of moving ground vehicles. *Lincoln Laboratory*

- Journal*, 2002, 13(2): 275-308.
- [4] 刘宏伟, 杜兰, 袁莉等. 雷达高分辨距离像目标识别研究进展. *电子与信息学报*, 2005, 27(8): 1328-1334.  
Liu Hong-wei, Du Lan, and Yuan Li, *et al.*. Progress in radar automatic target recognition based on high range resolution profile. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1328-1334.
- [5] 陈凤, 杜兰, 保铮等. 雷达高分辨距离像自动目标识别方法的改进. *电子与信息学报*, 2007, 29(6): 1450-1454.  
Chen Feng, Du Lan, and Bao Zheng, *et al.*. Improvement on radar automatic target recognition using HRRPs. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6): 1450-1454.
- [6] 刘敬, 张军英, 赵峰. 一种新的雷达高分辨距离像平移不变特征. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1949-1953.  
Liu Jing, Zhang Jun-ying, and Zhao Feng. A new time-shift invariant feature of radar HRRPs. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1949-1953.
- [7] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-274.
- [8] 袁莉. 基于高分辨距离像的雷达目标识别方法研究. [博士论文], 西安电子科技大学, 2007.  
Yuan Li. Study of radar target recognition method based on high range resolution profile. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2007.
- [9] 杜兰. 雷达高分辨距离像目标识别方法研究. [博士论文], 西安电子科技大学, 2007.  
Du Lan. Study on radar HRRP target recognition. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2007.
- [10] Nguyen D, Benitz G, and Kay J, *et al.*. Superresolution HRR ATR with high definition vector imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1267-1286.
- [11] 付耀文, 贾宇平, 庄钊文. 基于一维散射中心匹配的雷达目标识别. *电子学报*, 2006, 34(3): 404-408.  
Fu Yao-wen, Jia Yu-ping, and Zhuang Zhao-wen. Radar target classification based on one dimensional scattering centers matching. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(3): 404-408.
- [12] 刘敬, 张军英, 杜兰. 基于相关系数的雷达高分辨距离像分帧方法. *电子与信息学报*, 2008, 30(9): 2060-2064.  
Liu Jing, Zhang Jun-ying, and Du Lan. A frame segmentation method for radar HRRPs based on correlation coefficient. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(9): 2060-2064.
- [13] Li Hsueh Jyh and Yang Sheng Hui. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace targets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(3): 261-268.
- [14] Li Hsueh Jyh, Wang Yung Deh, and Wang Long-Huai. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(4): 444-452.
- [15] Li X R and Zhao Zhan-lue. Evaluation of estimation algorithms part I: incomprehensive measures of performance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1340-1358.
- [16] Williams R, Westerkamp J, and Gross D, *et al.*. Automatic target recognition of time critical moving targets using 1D high range resolution (HRR) radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, 15(4): 37-43.
- 周 诺: 女, 1981 年生, 博士生, 研究方向为雷达高分辨距离像自动目标识别.
- 陈 炜: 男, 1963 年生, 副教授, 研究方向为信号与信息处理、自动目标识别等.