

雷达高分辨距离像模板自动生成算法

彭 勃 魏玺章 黎 湘

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 模板的完备性直接决定了基于高分辨距离像的雷达目标识别系统的分类性能; 在外场试验中限于目标姿态、环境等因素难以获得准确标定的目标立体角范围内全姿态模板数据。针对一维距离像识别的工程实用化需求, 本文基于数据驱动思想, 提出了新的一维距离像聚类模板自动生成算法。与传统方法相比, 本文方法在提高工程可行性的同时提高了识别性能。为满足实验需要, 本文提出了新的基于 MSTAR 图像的高分辨距离像反演算法, 得到更精确的反演数据。基于该数据的实验结果表明算法解决了模板生成姿态角依赖性问题, 提高了识别性能。

关键词: 高分辨距离像; 模板; 聚类; 反演

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)06-0819-05

Automatic Generation of High Range Resolution Profiles Models for Radar Recognition

PENG Bo WEI Xi-zhang LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073)

Abstract: The completeness of template directly determines the classification performance of automatic radar target recognition system based on high resolution range profiles (HRRP). It's difficult to get HRRP training data labeled accurately covering the entire target-aspect angle because of a lot of practical factors in the field experiments, such as target attitude, environment and so on. According to the demand of engineering practical development, the dissertation proposes an algorithm of automatic generation of HRRP template based on data driving means. The proposed approach can be realized much easier with better recognition performance, comparing with the traditional approach. The dissertation puts forward a new HRRP inversion method based on MSTAR image to get more precise HRRP using in cyber-emulation. At last, the result of the experiments proves the algorithm.

Key words: High Range Resolution Profiles; template; clustering; HRRP inversion

1 引言

自从雷达自动目标识别研究兴起以来, 基于高分辨距离像的雷达目标识别系统因具有识别速率高、适应性广的优点受到广泛的关注。其中, 高分辨距离像模板自动生成是该类自动目标识别系统的基础, 直接关系到匹配识别的质量和效率。

高分辨距离像(HRRP)有着平移敏感性、幅度敏感性和目标姿态敏感性。识别系统通常采用预处理的方法克服 HRRP 的平移敏感性和幅度敏感性, 包括利用最小二乘准则实现距离对准、能量归一化以及去直流漂移^[1,2]。三种敏感性中尤为不容易克服的是目标特征信号姿态敏感性问题。高分辨雷达工作在光学区, 可以利用散射点模型较好描述^[3]。根据该模型, 高分辨距离像随姿态角的变化主要来源于越距离单元游动

导致的散射点模型改变, 即同一距离单元的散射点位置随着雷达视角及目标姿态所发生的变化。

针对该问题, 通常的解决办法可分为两类, 一是基于 HRRP 模板来进行匹配识别, 二是提取目标姿态不变性质的特征。1993 年, 文献[4]阐述了直接将一维距离像作为特征矢量的可行性, 提出了基于匹配度的距离像匹配识别方法。文献[5]利用多幅飞机目标的一维距离像构造相关滤波器, 减少了识别过程中所需的运算量。文献[6]在每一个姿态角域内构造识别所需的合成模板, 文献[1]提出了基于姿态角的平均模板生成算法, 文献[7]根据数据间的相近程度和样本数量动态调节各帧模板训练数据的角度边界, 优化了基于姿态角的平均模板生成算法。文献[8,9]中采用混合 Gamma 模型来描述目标 HRRP 的统计特性, 将多分量的后验概率应用于距离像识别, 充分利用目标 HRRP

回波间的相似性,降低统计模型的复杂度。文献[10]利用MSTAR数据对10类目标的一维距离像数据进行分类,通过奇异值分解的方法从一定角度范围内的多幅HRRP中获得距离空间上的特征模板。

关于高分辨距离像模板生成新技术层出不穷,尤以邻近姿态角平均模板生成算法最为典型,但存在模板库大、识别率偏低、依赖姿态角信息等问题。在工程实用化过程中,目标姿态角信息获取代价大且使用受限。标定姿态角的高分辨距离像模板数据录取需要良好的转台与合作目标的支持。对于大部分非合作目标应用场合,特别是地面静止目标,目标姿态角难以获知,使得模板姿态角信息无法在识别中应用。

由于雷达目标识别广阔的应用前景和迫切的需求,基于高分辨距离像识别研究领域亟待寻求一种能够适应工程实用化需要的模板自动生成算法,推进基于高分辨距离像的雷达目标识别系统工程应用。基于此,本文研究了基于聚类思想的模板自动生成算法,通过构造更加符合高分辨距离像数据内部结构的模板,提高高分辨距离像模板生成算法的工程实用化程度。通过比较传统的邻近姿态角平均模板生成算法,并采用较精细的MSTAR图像反演算法得到全方位角高分辨距离像数据实验,结果说明了聚类模板算法在提高工程实用化的同时提高了识别性能。

2 邻近姿态角平均模板生成算法

高分辨距离像模板生成问题,目前文献中一般采用基于姿态角划分训练数据的方法^[1,11,12]进行统计建模,以散射点不发生越距离单元游动(MTRC)^[15]为限制条件来确定方位间隔,利用各帧距离像求取平均模板。平均模板一方面可以去掉高分辨距离像的交叉乘积项,把对方位角变化很敏感的矢量和变为对方位角变化不敏感的标量和,从而提高距离像的稳定性^[1],另一方面信噪比可以提高 \sqrt{N} 倍^[13,14]。

邻近姿态角平均模板首先根据目标相对雷达的横向尺寸 W 和雷达距离分辨力,确定不发生MTRC的姿态角间隔,然后根据该间隔划分数据,将各帧内距离像进行预处理,完成帧内对准、去直流漂移、幅度归一化及幂变换,最后将得到的帧内数据作非相干功率平均,得到平均模板。图1说明了邻近姿态角平均模板生成算法的基本流程。在目标识别中,需要将高分辨距离像进行相同预处理后,按照最近邻准则匹配识别。

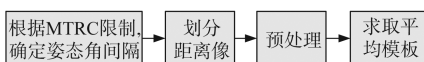


图1 邻近姿态角平均模板生成算法

文献[1]在俯仰角、方位角 1° 范围内建立一个模板,识别实验中,假设已知目标姿态角,对于俯仰角相

差 2° 以内方位角相差 6° 以内的测试样本,识别率达到74%至76%。

文献[7]提出采用自适应高斯分类器,根据数据间的相近程度和样本数量动态调节各帧模板训练数据的角度边界。通过动态调节,使模板更有针对性地反映目标特征,与等间隔数据划分相比,降低了模板个数,提高了识别性能。然而,模板生成算法依然依赖于目标姿态角信息。

在高分辨雷达应用中,如引言所述,模板生成不能依赖于姿态角信息。对于通常情况下没有标定的海量数据^[9],无法应用前两种方法。如何选择合适的方法来建立高分辨雷达目标的匹配识别模板,已经成为当前基于高分辨距离像的雷达目标识别系统所关心的关键问题之一。

3 基于聚类思想的模板自动生成算法

3.1 模板自动生成基本思想

从工程实用化角度,高分辨距离像模板自动生成是缺乏先验知识的非监督学习过程。这要求自动模板生成系统通过一种有效的方法“发现”样本数据的内在相似性,进而设计出有效的分类系统,根据合适的规则划分训练数据,构造平均模板。

基于样本距离的“数据驱动”思想将距离像作为度量空间中的点,通过构建两距离像 x_1, x_2 间的距离尺度模型,计算它们之间的距离 $d(x_1, x_2)$,并据此作为判断相邻关系划分类型的依据,从而巧妙地避开了距离像的姿态角信息,能够有效地利用距离像数据。在距离像预处理中,通常需要采用最小二乘法估计距离像的幅度归一化、距离对齐、直流项等参数,而得到的最小代价函数可以作为一种距离尺度模型。

针对高分辨距离像模板生成,数据驱动因不要求目标姿态角信息而具有明显应用价值。算法可以通过调整距离尺度模型和相似系数,使其包含各种有用的已知信息,避开未知信息。

3.2 聚类模板自动生成算法

基于上述距离尺度模型,可以结合聚类算法构造距离像平均模板。谱系聚类法属于一种基于最小距离的融合聚类算法。设 $x_i, i=1, \dots, N$ 代表距离像训练数据, G_j^i 代表第 j 次迭代处理后的第 i 个聚类中心,各类间的距离 $L_{ij}=d(x_i, x_j)$,并由此生成的一个对称的距离矩阵 $L^k=(L_{ij})_{m \times m}$, m 为类的个数。首先视 N 个训练样本自成一类,计算类间距离矩阵 L ,然后选择距离最小的一对合并成一个新类,继而更新距离矩阵 L ,再将距离最近的两类合并,直至聚类结果满足约束条件为止。聚类的约束条件一般包含类间距离上限阈值是 L_{th} ,类总数上限阈值为 N_{max} ,当最小类间距离大于类间距离上限阈值或者类总数超过类总数上限阈值时聚类完成。

由于目标后向散射多数有极强的方向性,带来的镜面效应会使得高分辨距离像骤然变化,此时原有的散射点模型不再适用。事实上,当采用判别准则涉及到距离像平均含义的相关法时,误判的测试样本中相当一部分是来自正侧视及其附近的样本。若能根据方位信息去除正侧视时的训练样本,可以降低由此引起的误判率^[16]。对于一般的聚类算法,可以采取根据类内样本数目的特点找出畸变点,然后将其排除。该门限设置为类内最小样本数 N_{\min} 。

聚类算法需要计算每个样本与类心之间的最小二乘代价函数,单次计算量较大。 N 个样本直接聚类需要计算约 $\frac{N^2}{2}$ 次最小二乘代价函数,算法复杂度为 $O(N^2)$ 。海量的训练数据进行聚类模板生成,需要一定的方法来减少运算量。本文采取分级运算的方法,先将训练数据分成若干部分聚类,再将前面的聚类结果总和起来,进行聚类模板生成。排除畸变点的准则只在最后一级使用。算法的流程如图2所示,虚线部分只在最后一级聚类中执行。

该聚类方法需要选择合适的距离尺度和联接规则。距离尺度采用欧几

里得平方范数,与预处理中的最小二乘估计相衔接^[17]。联接规则选择类间平均联接规则^[18],运算量居而且聚类形状适应性较好。在合并规则方面,根据前面分析,高分辨距离像相位随机性太大,因此只从幅度上考虑,各类心为类内各样本幅度的平均,即 $E[|S_k|]$ 。

从上面的流程可以看出,算法利用了距离像间的欧式距离,根据各距离像间的相似程度将距离像分类,

使划分后的各类间距加大,数据特征更突出。

聚类算法方面的研究不断取得新进展,将聚类思想应用于高分辨距离像的模板自动生成中可以借鉴利用更新的算法,以实现 HRRP 最优模板的构造。该方法,还能较方便地扩展自学习功能,适应分类模式特征的变化。

4 MSTAR 反演数据介绍

本文研究完备模板的生成算法,模板必须克服一维距离像的姿态角敏感性,因此得到姿态角分布较完备的数据对于研究是至关重要的。然而,现在并没有姿态角分布较完备的一维距离像数据,仅有的方位角分布较完备的雷达数据是美国 MSTAR 的 SAR 图像数据,因此需要完成基于 MSTAR 图像的一维距离像反演。本文采用了较精细的逆成像解脉压方案。

MSTAR 计划(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition)是美国国防部高级研究规划局发起,旨在研究开发新一代基于模板匹配的合成孔径雷达(SAR)自动目标识别系统。MSTAR 计划先后在 1995 年秋于 Redstone Arsenal Huntsville 和 1996 年在佛罗里达的 Eglin 空军基地分两次录取了十多类目标的目标 SAR 数据。由于 SAR 图像对方位十分敏感,因此 MSTAR 计划为了检验对完整的 360 度范围的目标识别能力,对每类目标都测量得出了包含大量不同方位的图像,其范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间,方位间隔大致为 1° ,方位角分布广是 MSTAR 图像的一大特点。MSTAR 计划还选择两组四种俯仰角对目标进行观测,包括 15° 、 17° 、 29° 、 31° ,分别用来做训练样本和测试样本,每种俯仰角上观测数据都涵盖完整的 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围。

图3是其中三个目标在不同方位的目标图像及一些简单参数。

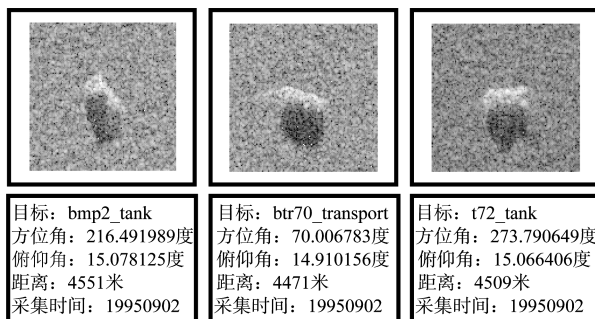


图3 MSTAR 数据

文献[1,19,20]分别研究了 MSTAR 数据的反演问题,归纳起来有波束域反演和简化的逆成像反演方法。本文提出了逆成像解脉压方案,充分利用数据信息,取得了较好的效果。算法基本思想是完成 SAR 成像的逆运算,去除方位向的脉压压缩、加窗等处理。反演方法如下:

这一方案与简化的逆成像反演方案的不同在于方位向上利用匹配滤波函数进行了解压,关键也是方位

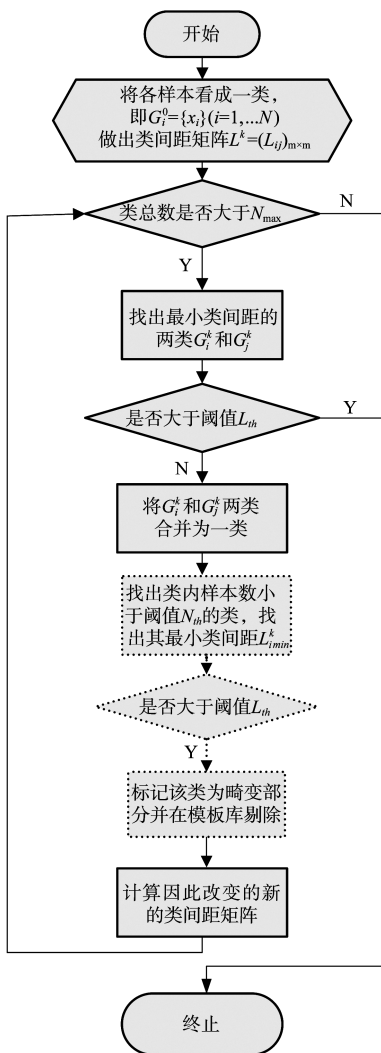


图2 聚类模板自动生成算法流程图

向上的匹配函数 $H_1(f_t, \tau, r_{ref})$ 的求解。

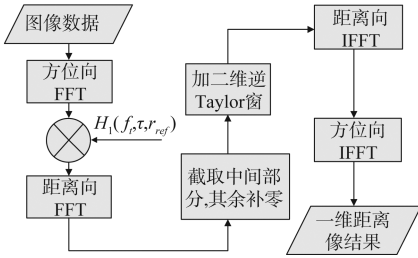


图4 基于MSTAR图像的高分辨距离像反演算法

方位匹配滤波函数的定义式为

$$s_a(t_m; R_0) = a_a(t_m) \exp[2\pi f_{dc} t_m + j\pi\gamma_m(R_0)t_m^2] \quad (1)$$

f_{dc} 为点目标的多普勒中心频率, MSTAR 的数据采集时, 实验期望 f_{dc} 是零, 值较小。 $\gamma_m(R_0)$ 为多普勒调频率, t_m 为载机的慢时间, $t_m = x/V$, 目标到飞行航线的垂直距离线和航线的交点的慢时间为 t_m 的零时刻。 R_0 为目标到飞行航线的垂直距离。 $a_a(t_m)$ 为雷达的方位窗函数, 它与滤波加权和天线波束形状都有关系。

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{dR}{dt_m} \Big|_{t_m=0} = \frac{2V \sin \theta_0}{R_0} \quad (2)$$

$$\gamma_m(R_0) = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{d^2 R}{dt_m^2} = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_0}{R_0} \quad (3)$$

θ_0 为斜视角, 实际值比较小。SAR 在采样时, 一幅图像每个距离像的像素间隔近似等于实际采样时的雷达移动距离 Δx , 也就是 $V \times \Delta t_m$ 。利用这一推理结果和 MSTAR 给出的每幅图的技术文档中提供的像素间隔 Δx 、中心频率 f_0 以及垂直距离 R_0 , 得到了每幅图的方位匹配滤波函数。

由以上推导, 得到方位向的匹配滤波函数为:

$$\begin{aligned} s_a(t_m; R_0) &= \exp \left[2\pi \frac{2V \sin \theta_0 t_m}{R_0} - j2\pi \frac{V^2 \cos^2 \theta_0 t_m^2}{R_0} \right] \\ &= \exp \left[\frac{4\pi x \sin \theta_0}{R_0} - j2\pi \frac{x^2 \cos^2 \theta_0}{R_0} \right] \\ &= \exp \left[\frac{4\pi x \sin \theta_0}{R_0} - j2\pi \frac{f_0 x^2}{c R_0} \cos^2 \theta_0 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

图5是由BTR70-transport的一幅SAR得到的相近姿态角下20幅高分辨距离像:

5 模板生成与目标识别实验结果

实验采用3类目标的训练数据经反演后包含5000~6000幅高分辨距离像, 分别用3.2节给出的方法进行数据划分。通过设置类间距离上限阈值 L_{th} , 类的总数上限阈值 N_{max} 实现前级聚类, 再通过附加类内样本数下限阈值 N_{min} 实现最终模板生成。根据实验数据确定三个合适的参数是实验的难点, 但三参数的灵活设置可以

根据需要调整模板库。

一个有效的数据库不仅存储量适当, 更重要的是能够很好地描述目标的特性, 与同类的观测样本匹配度好, 评价的一个方法就是直接用识别性能来衡量。

本文首先将邻近姿态角平均模板生成算法与本

文算法进行比较。在识别实验中, 本文假设目标姿态角未知, 以保证条件相同, 识别结果如图6所示。从图中可以看出, 聚类模板较邻近姿态角平均模板具有显著优势。特别是在模板数量较少时, 聚类模板使识别率提高了近8%, 这是因为聚类模板更多的利用了数据内的相近特征减少了模板数量。随着模板数量增多, 模板描述目标特征更为精细, 识别率会明显提高。当模板总数达到一定数量时, 再提高模板的数量对识别率的提升基本没有帮助。邻近姿态角模板生成时, 因为实验数据目标姿态角有间断, 使得在某些模板数量限制下姿态角划分出现问题, 导致识别率波动。

图7分析了距离阈值 L_{th} 与模板识别性能的关系。阈值取800附近时, 在模板总数较少的条件下可以取到较好的识别率; 阈值取550附近时, 在模板总数较多的条件下可以取到较好的识别率。阈值较大时, 因为聚类算法增大了迭代次数, 使得识别率对模板数量敏感性降低。

图8分析了类内最小样本数 N_{min} 与模板识别性能的关系。一般, 聚类算法没有设定类内最小样本数阈值排除训练样本的做法。本文为了更有效利用有限的模板, 设立该阈值, 用来排除出现概率小的畸变点。由图中可知, 当 $N_{min} = 7$ 时可取到最好的识别性能, 说明该参数是有效的。 $N_{min} = 9$ 的曲线表明, 如果 N_{min} 过大, 则会将有用的训练数据排除, 导致识别性能明显下降。

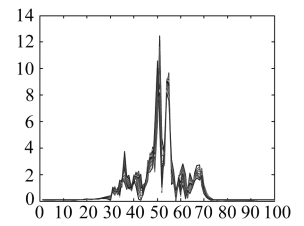


图5 基于MSTAR图像的高分辨距离像反演结果

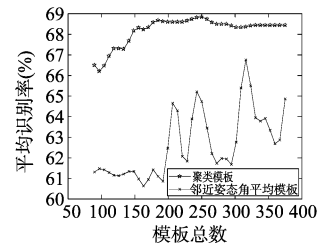


图6 聚类模板与邻近姿态角平均模板识别性能比较

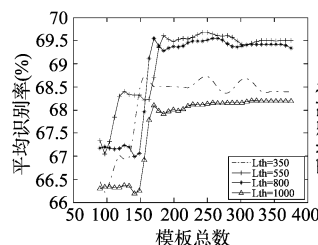


图7 距离阈值对识别性能的影响

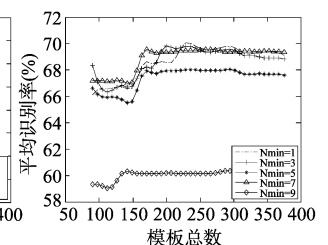


图8 类内最少样本数对识别性能的影响

6 结束语

基于高分辨距离像的识别对模板完备性的要求大大提高了工程难度,如何选择恰当的方法生成模板是需要解决的重要问题。邻近姿态角模板生成算法存在一些问题。本文给出基于数据驱动思想的模板自动生成算法,在雷达目标识别工程中具有实用意义。本文改进了MSTAR数据反演算法,基于反演数据的实验表明,本模板自动生成方法降低了工程难度,提高了识别性能。需要指出的是,实验考虑了训练数据的最恶劣情形,当已知其它先验标定信息时,识别性能将得到提高;实验限于缺乏全姿态角高分辨距离像实测数据,采用了MSTAR反演结果,实测数据的采用将提高本实验的可靠性。

参考文献

- [1] 高倩. 基于高分辨率雷达距离像的自动目标识别研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.
- [2] 李凯,秦江敏,杨军. 一维距离像的雷达目标特征提取方法研究[J]. 空军雷达学院学报,2008,22(3): 191-194.
- [3] Steinberg B D. Microwave Imaging with Large Antenna Arrays: Radio Camera Principle and Technique [M]. New York: John Wiley and Sons, 1983: 25-223.
- [4] Li H, Yang S. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace object [J]. IEEE Trans. on AP, 1993, 41(3): 261-280.
- [5] Hudon S, Psalltis. Correlation filters for aircraft identification from range profiles [J]. IEEE Trans. on AES, 1993, 29(3): 741-748.
- [6] Huether BM, Gustafson SC, Broussard RP. Wavelet pre-processing for high range resolution radar classification [J]. IEEE Trans. on AES, 2001, 37(4): 1321-1331.
- [7] 袁莉,刘宏伟,保铮. 雷达高分辨距离像分类器的参数自适应学习算法[J]. 电子与信息学报. 2008, 30(1): 198-202.
- [8] Webb A R. Gamma mixture models for target recognition. Pattern Recognition, 2000, 33(12): 2045-2054.
- [9] Copsey K and Webb A R. Bayesian gamma mixture model approach to radar target recognition[J], IEEE Trans. on AES,2003, 39(4): 1201-1217.
- [10] 刘家学,高倩,吴仁彪. 基于特征模板的高距离分辨率雷达像自动目标识别[J]. 信号处理,2003, 19(1): 28-32.
- [11] Rob Williams, John Westerkamp and Dave Gross, Adrian Palomino, Automatic Target Recognition of Time Critical Moving Targets using 1D High Range Resolution (HRR) Radar[J], IEEE International Radar Conference, 1999,

4: 54-59.

- [12] Xing Mengdao, Bao Zheng. The Properties of Range Profile of Aircraft[J]. CIE International Conference on Radar Proceedings Beijing, 2001, 10: 1050-1054.
- [13] Anthony Zyweck, Radar Target Classification of Commercial Aircraft, IEEE Trans. on AES 1996, 32(2): 598-606.
- [14] Anthony Zyweck and Robert E. Bogner, Coherent Averaging of Range Profiles, IEEE International Radar Conference, 1995, 5: 456-461.
- [15] Hudon S, Psalltis. Correlation filters for aircraft identification from range profiles [J]. IEEE Trans. on AES, 1993, 29(3): 741-748.
- [16] 陈凤,杜兰等. 雷达高分辨距离像自动目标识别方法的改进[J]. 电子与信息学报. 2007,29(6): 1450-1454.
- [17] 孙即祥等. 现代模式识别[M]. 国防科技大学出版社 2002: 15-19.
- [18] J. P. Marques de Sa. Pattern Recognition Concepts, Methods and Applications[M]. 吴逸飞. 清华大学出版社, 2002. 58-61.
- [19] Jingjing Cui, Jon Gudnason, Mike Brookes. Radar Shadow and Superresolution Features for Automatic Recognition of MSTAR targets [J]. IEEE International Radar Conference, 2005, 5: 534-539.
- [20] 高贵,计科峰等. SAR图像目标相关特性分析[J]. 计算机仿真. 2006, 23(9): 323-326.

作者简介



彭勃(1986-),男,山东曲阜人,现为国防科技大学电子科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向:一维距离像,目标识别。E-mail: bo-p@live.cn.



魏玺章(1976-),男,河北吴桥人,博士,国防科技大学电子科学与工程学院副教授,主要研究方向为目标识别、雷达信号处理。



黎湘(1967-),男,湖南长沙人,博士,国防科技大学电子科学与工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为目标识别、信息融合。