

低分辨机载雷达空地运动目标的分类识别算法

王福友^{*①②} 罗钉^① 刘宏伟^②

^①(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 214063)

^②(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 分类识别技术是雷达当今和未来发展的重要需求,也是雷达的关键技术之一。目前研究较多的是基于宽带信号的目标识别,对雷达系统和目标信噪比具有较高的要求,且对角度非常敏感。针对低分辨机载雷达工作在下视模式下,慢速飞行目标和地面运动目标由于具有相似的多普勒速度和雷达散射截面(RCS),使得其对机载雷达慢速飞行目标检测、跟踪和识别形成干扰,该文提出了一种基于窄带分形和相位调制特征的机载雷达空地运动目标分类识别算法。文中以实测试飞数据进行分析验证,以支持向量机(SVM)为分类器,试验结果表明,该方法能对机载雷达直升机、汽车运动目标进行有效分类识别,当SNR ≥ 15 dB时,平均分类识别率在89%以上。

关键词: 低分辨机载雷达;空地运动目标分类识别;分形特征;相位调制特征;支持向量机(SVM)

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)05-0497-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14092

Low-resolution Airborne Radar Air/ground Moving Target Classification and Recognition

Wang Fu-you^{①②} Luo Ding^① Liu Hong-wei^②

^①(AVIC LEIHUA Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

^②(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Radar Target Recognition (RTR) is one of the most important needs of modern and future airborne surveillance radars, and it is still one of the key technologies of radar. The majority of present algorithms are based on wide-band radar signal, which not only needs high performance radar system and high target Signal-to-Noise Ratio (SNR), but also is sensitive to angle between radar and target. Low-Resolution Airborne Surveillance Radar (LRASR) in downward-looking mode, slow flying aircraft and ground moving truck have similar Doppler velocity and Radar Cross Section (RCS), leading to the problem that LRASR air/ground moving targets can not be distinguished, which also disturbs detection, tracking, and classification of low altitude slow flying aircraft to solve these issues, an algorithm based on narrowband fractal feature and phase modulation feature is presented for LRASR air/ground moving targets classification. Real measured data is applied to verify the algorithm, the classification results validate the proposed method, helicopters and truck can be well classified, the average discrimination rate is more than 89% when SNR ≥ 15 dB.

Key words: Low-resolution airborne radar; Air/ground moving target classification; Fractal feature; Phase modulation feature; Support Vector Machine (SVM)

1 引言

机载监视雷达大多具有良好的低空探测性能^[1,2],特别进入21世纪后,低空飞行的巡航导弹、直升机、无人机的普遍使用使得机载监视雷达在防低空突防等领域有广泛的应用前景^[3]。

但当机载监视雷达工作在下视模式来监视低空飞行器时,会检测出大量的地面运动目标信息,同时检测到的低空目标如直升机、无人机和地面汽车具有相似的多普勒速度和雷达散射截面(RCS),容易误判,因此作为机载监视雷达应该具有对空中和地面运动目标分类识别的能力,才能更好地发挥监视作用。

近几年来,关于机载雷达空地运动目标分类识别技术的研究,国内外公开的文献仅有为数不多的几篇,从文献可以看出,国内外学者已开展了一些

2014-06-11 收到, 2014-07-08 改回; 2014-07-14 网络优先出版
国家部委基金, 中航工业雷华电子技术研究所和西电雷达信号处理国家重点实验室联合培养博士后基金(20120928001)资助课题
*通信作者: 王福友 hellofew@163.com

研究^[4-9]。文献[4]提出基于利用道路信息的机载雷达空地目标分类方法,利用航迹信息和地面道路信息,往往对系统要求较高,这往往要对道路具有精确的先验信息,要存储海量的矢量地图,达到精确地形匹配,此外,无人机和直升机也可能在道路上空飞行,因此存在一定的局限性。文献[5,6]提出基于距离-多普勒域的幅度调制特征(非主杂波)的差异进行空地目标分类识别,但这往往对信噪比要求较高。文献[7]提出利用多路径信号进行空地目标分类,但由于低空飞行目标和地面运动目标具有相似的速度,在频域往往很难辨别出是否为多径信号,需要高精度谱估计,且需要系统工作在宽带模式,同时由于强地杂波的影响,该方法的效果不是很理想。对于应用方面,文献[8]披露美国E-8C监视雷达、E-2C预警机监视雷达、E-3预警机监视雷达、英国的机载防区外雷达ASTOR都具有战场空地运动目标分类识别能力,具体采用何分类识别技术没有报道。

从公开的文献可知,现有算法具有一定的局限性。而文献[10]研究表明,机载雷达的运动目标回波信号含有非线性非平稳调制成分,而分形是近些年来非线性科学的一个重要分支,对于分析雷达目标回波信号特征具有潜力,分形的物理含义是描述物体表面的粗糙程度和不规则程度^[11],多位学者研究表明基于分形可很好地对雷达电磁散射场进行数学建模^[12-15]、雷达目标回波信号重构^[16]、强地海杂波背景下的目标检测^[17,18]以及自然界目标几何外形描述和目标分类^[19-21]。

由于分形特征能在强地、海杂波背景下进行雷达目标信号建模、重构和目标检测,且分形特征较稳定,不同目标的分形特征存在差异性,因此使得其在分类识别方面具有潜力,此外文献[16, 22]研究表明,分形不受噪声的影响,这对于实际目标在噪声环境下目标分类识别具有现实意义。

同时由于空地动目标相对机载雷达都含有相对运动,而相对运动对雷达的回波的相位具有调制作用,因此本文也将提取空地动目标的相位调制特征。

针对上述问题,考虑到识别效果的稳健性,以及现有机载雷达普遍具有窄带跟踪模式条件下,本文提出了一种基于窄带分形特征和相位调制特征的机载雷达空地运动目标分类识别算法,给出了分形的基本原理,在分析目标旋转部件的电磁散射机理基础上得出了相位调制特征提取算法,在实测试验数据基础上给出了空地运动目标的分形特征,相位调制特征和分类识别结果,实测试飞数据验证表明本文在小样本条件下具有较好的分类识别效果。

2 识别基本原理

2.1 分形特征识别原理

分形是描述物体表面的粗糙程度和不规则程度,分形的一个重要特征为计算的分维数是一种非整数的形式,称为分形维数,描述分形特征的参数叫分形维数。而常规的人造物体如飞机通常具有相对规则的几何形体,且目标的分形维数相对稳定,而不同目标的外形和规则程度存在差异,导致不同目标的分形特征也存在差异,这就为基于分形特征来进行目标分类识别奠定基础。

由于时间资源对目标分类识别至关重要,本文拟定采用盒维数(Box dimension)法来提取分形特征,盒维数法被认为是计算分形维数最快和实用的方法^[23]。

设 D 是 R^n 上任意非空的有界子集, $N_\delta(D)$ 是直径最大为 δ 并能覆盖 D 的集的最小个数,则 D 的下、上限的盒维数分别定义为:

$$\underline{\dim}_B D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(D)}{-\lg \delta} \quad (1)$$

$$\overline{\dim}_B D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(D)}{-\lg \delta} \quad (2)$$

如果式(1)和式(2)两个值相等,则称为盒维数,记为:

$$\dim_B D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(D)}{-\lg \delta} \quad (3)$$

基于盒维数对于实际雷达目标的分形特征提取步骤如下:

(1) 取一个长度为 N 的目标信号 F (目标所在某一距离单元多脉冲数据),将它的幅度和时间轴归一化后放入一正方形,如图1所示。

(2) 选取一些边长为 δ_m ($m = 1, 2, \dots, M$) 的方格网,每个小正方形为盒子,用盒子去覆盖单位正方形。然后计算每一种尺寸的 δ_m 盒子与 F 相交的个数 $N_\delta(F)$ 。

(3) 盒维数为:

$$f_d = \lim_{\delta_m \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta_m} \quad (4)$$

式中: δ_m 为盒子尺寸, $N_\delta(F)$ 为每一种尺寸的 δ_m 盒子与 F 相交的个数。

由式(4)即可计算出盒维数。图1给出的是基于盒维数法计算分形维数的算例,用 $\delta = 1/10$ 的小盒子把序列所在单位正方形分成100个小方格,覆盖分形曲线带阴影的小盒数 $N(\epsilon) = 58$, 则盒维数为:

$$f_{d0} = \frac{\lg 58}{-\lg(1/10)} = 1.763 \quad (5)$$

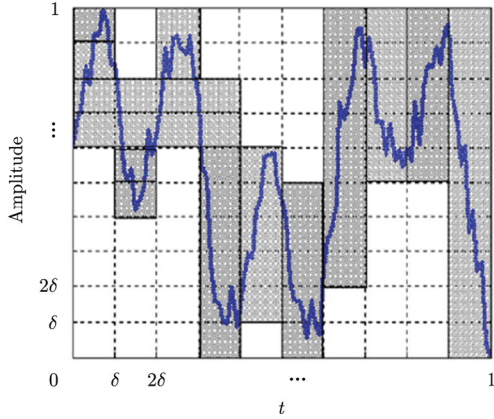


图 1 盒维数计算示例

Fig. 1 An example of box dimension

2.2 相位调制特征识别原理

由于空地运动目标的机械振动或者目标上一些旋转部件(如直升机的桨叶和地面汽车的轮胎)的转动会对回波信号产生频率调制,表现之一即为雷达目标回波的相位调制,该调制也是微多普勒现象的一种特殊形式^[24],而不同目标的相位调制特征存在差异,这就为目标识别奠定基础。

对于低分辨雷达,目标的旋转部件回波通常由多个散射中心构成,则目标旋转部件的雷达散射回波复矢量为:

$$w(t) = \sum_{n=1}^N s_n \exp\left(j2\pi f_0 t - j \frac{4\pi R_n(t)}{\lambda}\right) \quad (6)$$

式中, f_0 , λ 为雷达发射频率和波长, $R_n(t)$ 为第 n 个散射中心和雷达之间的径向距离, N 为目标旋转部件的散射中心的总数。

由于雷达发射窄带相参信号,适用于用“点”目标模型,其回波为:

$$\begin{aligned} x(t) &= A(t) \exp(j2\pi f_0 t + j\varphi(t)) \\ &= A(t) \exp(j\varphi(t)) \exp(j2\pi f_0 t) \\ &= s(t) \exp(j2\pi f_0 t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $A(t)$ 是幅度调制函数, $\varphi(t)$ 是相位调制函数, $s(t) \exp(j2\pi f_0 t)$ 是回波的复包络, f_0 为雷达发射频率。

由式(6),式(7)可得目标回波复包络与各旋转部件回波复包络的关系:

$$w(t) = A(t) \exp(j\varphi(t)) = \sum_{n=1}^N s_n \exp(j\theta_n(t)) \quad (8)$$

式中:

$$\theta_n(t) = 4\pi R_n(t) / \lambda \quad (9)$$

为第 n 个散射中心的相位函数,由式(9)可知目标旋转部件的任一散射中心的微小相对运动,都能造成

相位函数 $\theta_n(t)$ 的波动。例如,若 $\lambda = 3 \text{ cm}$, $r_n(t)$ 变化 1.5 cm , 则 $\theta_n(t)$ 就会相对变化 2π 。

由式(8),式(9)可得目标的幅度调制和相位调制函数如式(10)和式(11)所示:

$$\begin{aligned} A(t) &= \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s_n \cos(\theta_n(t))\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N s_n \sin(\theta_n(t))\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s_n \cos\left(\frac{4\pi R_n(t)}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N s_n \sin\left(\frac{4\pi R_n(t)}{\lambda}\right)\right)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \arctan \left(\frac{\sum_{n=1}^N s_n \sin(\theta_n(t))}{\sum_{n=1}^N s_n \cos(\theta_n(t))} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{\sum_{n=1}^N s_n \sin\left(\frac{4\pi R_n(t)}{\lambda}\right)}{\sum_{n=1}^N s_n \cos\left(\frac{4\pi R_n(t)}{\lambda}\right)} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10),式(11)可知,散射中心的相位变化会引起多个散射中心合成回波复包络幅、相分量的变化。这就是目标旋转部件相对运动使回波复包络产生幅、相波动的物理机理。

通过这一机理可以得出,通过脉间相位变化量来估计相位调制特征是一个很好的思路,定义相位调制特征:

$$k_p = \arctan \left(\sqrt{\frac{M}{M-1} \cdot \frac{1-q^2}{q^2}} \right) \quad (12)$$

中间变量:

$$q = \sqrt{\frac{1}{M^2} \left[\left(\sum_{i=1}^M \cos(\Delta\varphi_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M \sin(\Delta\varphi_i) \right)^2 \right]} \quad (13)$$

式中, M 为单帧积累的脉冲数, $\Delta\varphi_i$ 为第 $i+1$ 个与第 i 个脉冲间相位差, k_p 表征的是目标旋转部件多个散射中心的相位变化统计量。由于是低分辨雷达,目标通常占据一个距离门,因此计算某一距离门多个点数,即可统计出目标的相位调制特征。

3 实验结果和分析

3.1 实验数据说明

为了验证本文算法的有效性,本文基于某机载雷达实测同一场景下的不同时间段多个试飞架次数据进行验证,试飞目标为直升机、汽车两类目标,直升机目标高度为 800 m 。目标均为雷达迎头方向的目标,因为机载雷达更加关注迎头威胁目标。提取的是目标跟踪过门限检测到的目标点,目标跟踪

外推的点(非检测点)将不予考虑,当跟踪门中没有目标点将不提取任何信息,当跟踪门中过门限的检测点是几个目标点(存在虚警)时,将这几个点都提取特征,由于本文方法是在多帧跟踪过门限检测到的目标点特征基础上进行统计的,偶尔存在的虚警对目标分类识别结果的影响较小。本文共提取 200 帧数据,200 帧数据对应于 200 个特征点,其中 100 点用于训练,另 100 点用于测试,提取的目标点的 SNR 在 15 dB 以上,对应的距离为 100~140 km。

3.2 两类目标的归一化 RCS

RCS 是描述目标物理特性之一,RCS 在一定程度上能够描述目标雷达回波的大小,但 RCS 对目标姿态角非常敏感性,存在一定范围波动,因此也不是很准确。

图 2 给出的是直升机和汽车的归一化 RCS (Normalized Radar Cross Section, NRCS),是基于两类目标统计的 RCS 最大值点进行归一化,这样便于比较,如式(14)所示:

$$NRCS = \frac{RCS}{\max(RCS_{he}, RCS_{tr})} \quad (14)$$

由图 2(a)和图 2(b)可知,两类目标的 NRCS 起伏相似,大多数点 $NRCS \in (0.75, 1)$,多点 NRCS 的统计均值和标准标准偏差如式(15),式(16)所示:

$$\left. \begin{aligned} \text{Mean}(NRCS_{he}) &= 0.890 \\ \text{Mean}(NRCS_{tr}) &= 0.879 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Std}(NRCS_{he}) &= 0.050 \\ \text{Std}(NRCS_{tr}) &= 0.060 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式(14),式(15)可知,直升机的 NRCS 的均值和标准偏差相当,因此基于 RCS 很难将汽车和直升机进行分类识别。

3.3 分形和相位调制特征提取

图 3 给出的是基于分形和相位调制特征提取和分类识别流程图,由流程图可知,基于窄带“和通道”数据,进行脉冲压缩和相参积累,提取目标的过门限检测点,然后进行分形特征和相位调制特征提取。

图 4 分别给出了基于实测数据分析的直升机和汽车的分形特征。由图 4 可知直升机和汽车分形特征具有差异性,直升机的分形特征起伏范围 $f_{d(he)} \in (1.38, 1.71)$,而汽车的分形特征起伏范围 $f_{d(tr)} \in (1.21, 1.56)$,两类目标分形特征的均值和标准偏差统计特性如式(17),式(18)所示,直升机的分形特征的均值大于汽车的分形特征的均值,两者特征的标准偏差相似,直升机略大于汽车。

$$\left. \begin{aligned} \text{Mean}(f_{d(he)}) &= 1.580 \\ \text{Mean}(f_{d(tr)}) &= 1.410 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Std}(f_{d(he)}) &= 0.081 \\ \text{Std}(f_{d(tr)}) &= 0.072 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

虽然直升机和汽车的分形特征存在差异性,但也存在混叠区,因此为了提高分类识别置信度,本文加入了相位调制特征。图 5 给出的是基于实测数据分析的直升机和汽车的相位调制特征,可以看出两类目标的相位调制特征差异性比较明显,如直升机相位调制特征起伏范围较大, $k_{p(he)} \in (0.51, 1.10)$,貌似周期性存在峰值,而汽车的相位调制特征相对起伏比较小 $k_{p(tr)} \in (0.16, 0.45)$,因此特征差异性较明显,两类目标相位调制特征的统计均值和标准偏差均存在较明显的差异性,直升机的相位调制特征的均值和标准偏差均明显大于汽车的,如式(19),式(20)所示。

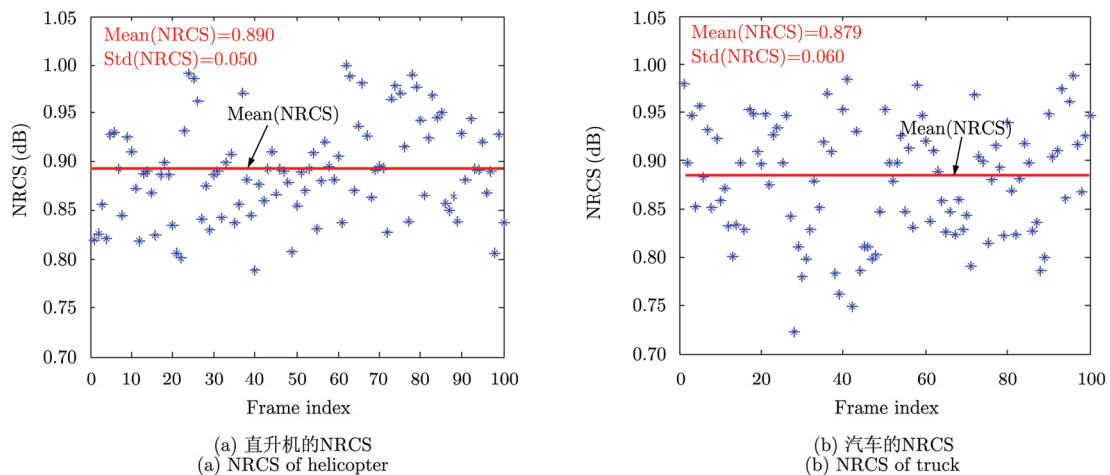


图 2 两类目标的 NRCS

Fig. 2 NRCS of two kinds of targets

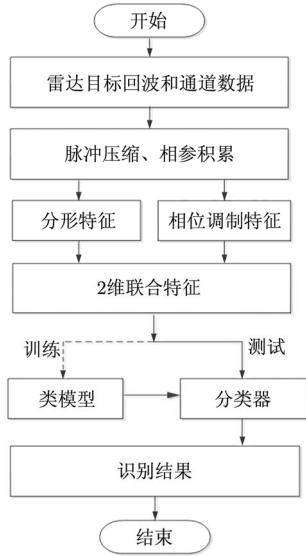


图 3 基于分形和相位调制特征的机载雷达飞机目标分类识别流程图

Fig. 3 Airborne radar aircraft target classification based on fractal and phase modulation features

$$\left. \begin{aligned} \text{Mean}(k_{p(\text{he})}) &= 0.430 \\ \text{Mean}(k_{p(\text{tr})}) &= 0.210 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

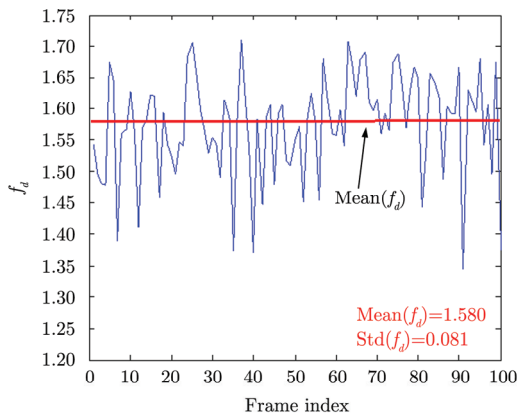
$$\left. \begin{aligned} \text{Std}(k_{p(\text{he})}) &= 0.260 \\ \text{Std}(k_{p(\text{tr})}) &= 0.070 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

图 6 给出两类目标的分形和相位调制特征联合特征分布，由图 6 可知，直升机和汽车的 2 维特征分布差异性比较明显，这就为目标分类识别奠定基础。

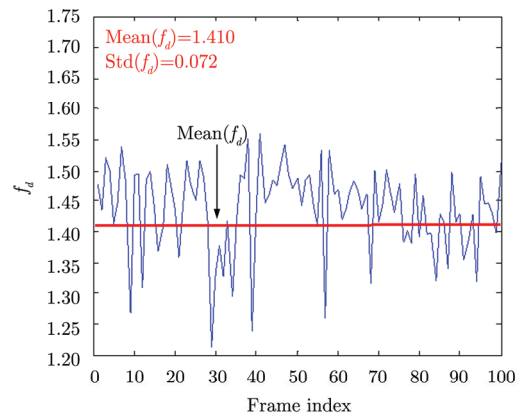
3.4 分类识别

在以上试验数据的目标特征提取基础上进行分类识别，采用 100 个联合 2 维分形和相位调制特征点为训练样本，得出分类识别阈值线 (classification threshold)，另 100 个 2 维特征点为测试样本点。

图 7 给出基于 SVM 的直升机和汽车两类目标的分类识别结果，得到直升机的分类识别率为 85%，



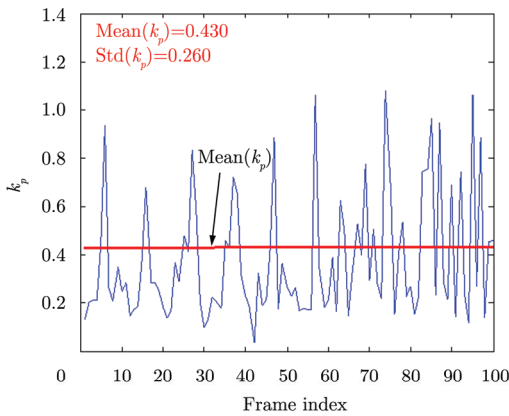
(a) 直升机的分形特征
(a) Fractal feature of helicopter



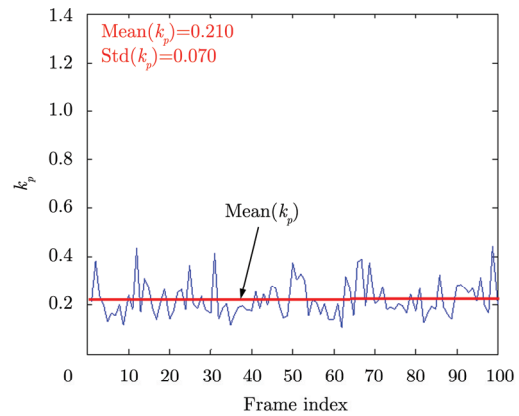
(b) 汽车的分形特征
(b) Fractal feature of truck

图 4 两类目标的分形特征

Fig. 4 Fractal features of two kinds of targets



(a) 直升机的相位调制特征
(a) Phase modulation features of helicopter



(b) 汽车的相位调制特征
(b) Phase modulation features of truck

图 5 两类目标的相位调制特征

Fig. 5 Phase modulation features of two kinds of targets

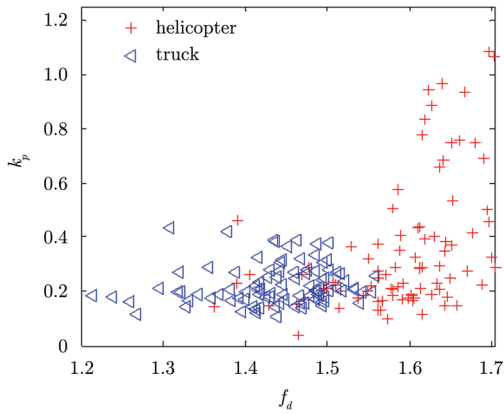


图6 两类目标的特征分布

Fig. 6 Feature distribution of two kinds of targets

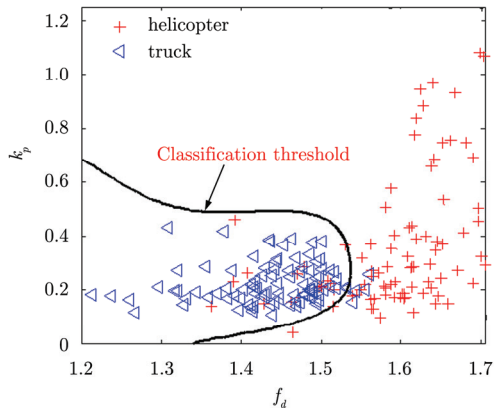


图7 两类目标分类识别结果

Fig. 7 Classification of two kinds of targets

和汽车是无效的,究其原因,是因为RCS随着目标和雷达之间的角度较敏感且存在闪烁。

图4给出了直升机和汽车的分形特征,由图4和式(17),式(18)可知,两类目标的分形特征的统计分布、均值都存在差异性,直升机的分形特征的均值大于汽车分形特征统计均值,均值分别为1.580和1.410,两类目标分形特征的统计标准偏差相当,追源于其物理机制:分形特征是描述物体表面粗糙程度和不规则程度,这说明直升机的不规则程度大于汽车,这与实际相符。

由图5和式(19),式(20)可知,直升机和汽车两类目标的相位调制特征分布、均值和标准偏差存在较明显的差异性,相位调制特征的统计均值分别为 $\text{Mean}(k_{p(\text{he})}) = 0.430$, $\text{Mean}(k_{p(\text{tr})}) = 0.210$,前者约是后者的2倍;而相位调制特征的标准偏差分别为 $\text{Std}(k_{p(\text{he})}) = 0.260$, $\text{Std}(k_{p(\text{tr})}) = 0.070$,直升机是汽车的3倍。这是由于相位调制特征描述的是目标等效散射中心的相邻重复周期回波的相位变化,而实

汽车的分类识别率为94%,平均分类识别率为89.5%,图8给出的是两类目标的平均分类识别率和SNR的关系曲线,由于实测数据都是CFAR过门限检测目标点($\text{SNR} > 12 \text{ dB}$),对SNR在0 dB, 5 dB, 10 dB的情况是在原始数据基础上添加的白噪声。

3.5 分析和讨论

以上基于实测数据对直升机和汽车两类空地运动目标进行了归一化RCS分析,分形和相位调制特征提取,基于支持向量机(SVM)分类识别。

由图2和式(15),式(16)可知,两类目标的NRCS分布、均值和标准偏差均相当, $\text{Mean}(\text{NRCS}_{\text{he}}) = 0.890$, $\text{Mean}(\text{NRCS}_{\text{tr}}) = 0.879$, $\text{Std}(\text{NRCS}_{\text{he}}) = 0.05$, $\text{Std}(\text{NRCS}_{\text{tr}}) = 0.060$,因此基于NRCS对于直升机

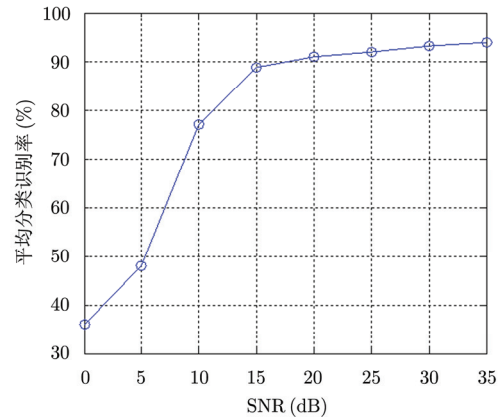


图8 两类目标平均分类识别率与SNR的关系

Fig. 8 Average classification rate with SNR of targets

际上直升机和汽车相比有较大的桨叶等旋转部件(等效散射中心),汽车的旋转部件主要是轮胎的车盘,有较大的相位变化导致直升机的相位调制特征明显大于汽车的相位调制特征,这与实际相符。

由图4和图5可知,单一分形特征或相位调制特征的分布都存在混叠区,因此为了提高分类识别置信度,基于联合2维特征进行分类识别,能够使得特征优势互补,由图6可知直升机和汽车的两类目标的分形和相位调制特征分布差异性较明显,图7给出了两类目标较好的分类识别结果。图8给出了两类目标的分类识别率和SNR的关系曲线,由图8可知,当SNR在0~10 dB时平均识别率在36%~77%,这在工程上一般不可用;当目标SNR在15 dB时,平均识别率为89.5%;而当SNR为20~35 dB时,识别率分别在91%~94%,即在此条件下本文的方法识别率变化不大,综上所述,本文的方法在 $\text{SNR} \geq 15 \text{ dB}$ 条件下,具有较好的分类识别结果。

4 结论

本文在机载雷达空地运动目标分类识别需求牵引下,同时考虑到当前机载雷达普遍具有窄带跟踪模式,提出了基于窄带分形和相位调制特征的机载雷达空地运动目标分类识别技术。在试飞数据基础上进行分析验证,试验结果验证了本文算法的有效性和稳健性,当 $\text{SNR} \geq 15 \text{ dB}$ 时直升机和汽车的平均分类识别率在 89.5% 以上,同时论文还得出以下结论:

(1) 直升机和汽车的归一化 RCS 的起伏范围、均值和标准偏差相当,因此基于 RCS 对这两类目标进行分类识别是无效的;

(2) 直升机和汽车的分形特征和相位调制存在较明显的差异性,特征有效,且具有较明确的物理含义。直升机分形维数均值比汽车的分形维数均值大 12%, 两类目标的分形特征的统计标准偏差相当。直升机和汽车的相位调制特征分布具有差异,直升机相位调制特征分布存在类似于周期性峰值,而汽车的相位调制特征起伏相对平缓,直升机的统计均值和标准偏差都比汽车大,均值前者是后者的 2 倍,标准偏差前者是后者 3 倍;

(3) 计算量较小,耗费雷达资源少,便于实现,计算 200 帧窄带数据即可统计出特征,分类识别结果在 0.5 s 内即可给出。

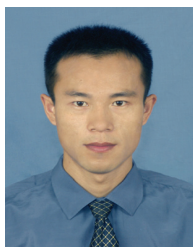
致谢 非常感谢王德奇副总师、吴良斌总工程师在本论文研究过程中给出的宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] 贲德, 韦传安, 林有权. 机载雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 6-9.
Ben D. Wei C A, and Lin Y Q. Airborne Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 6-9.
- [2] Wintenby J and Krisnamuthy V. Hierarchical resource management in adaptive airborne surveillance radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 401-420.
- [3] 林幼权. 球载雷达目标分类与识别技术研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(7): 1-4.
Lin Y Q. Analysis of target classification and recognition technology for aerostar radars[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(7): 1-4.
- [4] 韩伟, 汤子跃, 朱振波. 利用道路信息的机载预警雷达空地目标分类[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 45-50.
Han H, Tang Z Y, and Zhu Z B. Road information based air/ground target classification for airborne early warning radar[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(6): 45-50.
- [5] Nagel I D and Smith S. Creating a likelihood vector for ground moving targets in the exo-clutter region of airborne radar signals[C]. 2012 Workshop on Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Application, Bonn, 2012: 49-54.
- [6] Nagel I D, Neumann P C, and Smith S. Classification of ground moving targets in the exo-clutter region of airborne radar signals[C]. International Radar Symposium, Wroclaw, 2008: 1-5.
- [7] Zhang X B and Li M. Discrimination of low-flying vehicle from ground moving targets using multi-path[C]. The 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2009: 721-725.
- [8] Tait P. Introduction to Radar Target Recognition[M]. UK: the Institution of Electrical Engineers, 2005: 8-10.
- [9] 王福友, 罗钉, 刘宏伟. 低分辨机载雷达飞机目标分类识别技术研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(4): 444-449.
Wang Fu-you, Luo Ding, and Liu Hong-wei. Low-resolution airborne radar aircraft target classification[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 444-449.
- [10] Astola J T, Egiazarian K O, Khlopov G I, et al. Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance doppler radar echo signals[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(9): 1949-1957.
- [11] 汪慰军, 陈历喜, 曹麟祥. 表面形貌的分形描述及其评定[J]. 航空学报, 1997, 18(3): 336-340.
Wang W J, Chen L X, and Cao L X. A fractal characterization of surface topography and its evaluation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(3): 336-340.
- [12] Iodice A, Natale A, and Riccio D. Kirchhoff scattering from fractal and classical rough surfaces: physical interpretation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 2156-2163.
- [13] Perna S and Iodice A. An algorithm for efficient and effective evaluation of scattering from fractal surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3554-3566.
- [14] Evans R, Bennett J G, and Jones J. The evaluation of fractal surfaces for modeling radar backgrounds[R]. AD, 2007, 7(ADA457965/XAB): 1-27.
- [15] Li Q S and Xie W X. Multifractal modeling of aircraft echoes from low-resolution radars[C]. IET International Radar Conference, Xi'an, 2013, 2: 941-946.
- [16] Potapov A A, German V A, and Grachev V I. "Nano-" and radar signal processing: fractal reconstruction complicated images, signals and radar backgrounds based on fractal labyrinths[C]. International Radar Symposium, German,

- 2013, 2: 941-946.
- [17] 王福友, 郭汝江, 郝明, 等. 基于分形特征的地杂波背景下的球载雷达目标检测方法[P]. 国防发明专利, 受理号: 201110015890. X.
Wang F Y, Guo R J, Hao M, *et al.* Balloon borne radar target detection within ground clutter based on fractal character[P]. National Defense Invention Patent, Accepted no. 201110015890. X.
- [18] 王福友, 罗钉, 季亚新, 等. 海杂波多分形特性分析及小目标检测技术研究[J]. 信号处理, 2013, 29(2): 239-248.
Wang F Y, Luo D, Ji Y X, *et al.* Multifractal analysis of sea clutter and small target detection[J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(2): 239-248.
- [19] Potlapalli H and Luo R C. Fractal-based classification of natural textures[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(1): 142-150.
- [20] Popescu A L, Popescu D, and Ionescu R T. Efficient fractal method for texture classification[C]. International Conference on Systems and Computer Science, Kansas City, USA, 2013, 2: 44-49.
- [21] Mishra A K, Feng H, and Mulgrew B. Fractal feature based radar signal classification[C]. IET International Conference on Radar Systems, Edinburgh, UK, 2007, 2: 1-4.
- [22] Salmasi M and Hashemi M M. Design and analysis of fractal detector for high resolution radars[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, 40(5): 2133-2145.
- [23] Zlatintsi A and Maragos P. Multiscale fractal analysis of musical instrument signals with application to recognition[J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2013, 21(4): 737-748.
- [24] Chen V C, Li F, Ho S S, *et al.* Micro Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.

作者简介



王福友(1983-), 男, 山东诸城人, 2009年获得哈尔滨工程大学导航、制导与控制专业博士学位, 2009~2012年期间在中国电子科技集团公司第十四研究所从事雷达目标分类识别技术研究, 现为中国航空工业集团雷华电子技术研究所和西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室联合培养博士后, 研究方向为机载雷达目标识别、

机载雷达总体技术、极化目标检测和极化抗干扰技术。

E-mail: hellofew@163.com



刘宏伟(1971-), 男, 河南省孟津县人, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室主任。研究方向为自适应信号处理、雷达信号处理、雷达目标识别等。

E-mail: hwliu@xidian.edu.cn



罗钉(1969-), 男, 四川威远人, 研究员, 副总师, 中国航空工业集团首席专家。研究方向为机载雷达总体技术。

E-mail: lding380@126.com