

文章编号: 2095-4980(2013)06-0922-05

一种基于调制特征向量的空目标识别方法

苗振奎, 徐 伟, 李 亮, 张同舟

(江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061)

摘 要: 空中目标旋转部件对雷达回波有调制作用。将回波时域幅度调制信息的幅度偏差系数作为调制特征, 首先利用仿真数据分析了固定翼飞机目标和直升机飞机目标的差异, 随后提出了一种最近邻分类器的设计方法, 最后利用实测数据对目标进行分类, 取得了较高的识别率。与支持向量机的算法相比, 该分类器算法复杂度低, 计算量小, 识别率高, 在工程上可以选用这种方法对两类目标进行分类识别。

关键词: 目标识别; 调制特征; 幅度偏差系数; 最近邻; 分类器

中图分类号: TN959.1⁺7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0922

One method of classifying the air-targets based on feature vector modulation

MIAO Zhen-kui, XU Wei, LI Liang, ZHANG Tong-zhou

(Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang Jiangsu 222061, China)

Abstract: The rotating components of aerial target can have modulation effect on radar echo. Taking the rate deviation coefficient as a modulation characteristic, the differences between fixed-wing aircrafts and helicopter aircrafts are analyzed with simulation data. A nearest neighbor classifier method is proposed. The targets are classified by using the measured data, and a higher recognition rate is obtained. In contrast with the support vector machine algorithm, the proposed method bears low complexity, less computation and high recognition rate. It can be used to classify two types of targets in engineering project.

Key words: target recognition; modulation characteristics; rate deviation coefficient; nearest neighbor; classification

自从 V C Chen 提出旋转目标对雷达回波具有调制^[1]作用后, 基于调制特征对雷达目标的识别的研究越来越深入。飞机的旋转部分, 如飞机的旋翼、发动机螺旋桨、喷气发动机压气机的叶片, 它们对雷达电磁波都能产生调制的效应^[2]。对于这种调制作用, 主要研究集中在以下两方面: a) 时域回波幅度变化和相位信息的变化。根据目标回波的幅度和相位信息的变化, 判断目标的形状、结构特征; b) 频域谱线载波两侧出现成对的边带, 谱线间间隔反映了自旋频率, 而谱线幅度则与极化状态和观测角等其他因素有关。本文主要利用具有旋转部件的直升机类飞机和固定翼类飞机对雷达回波时域调制的作用进行识别技术的研究。

基于飞机目标的电磁散射机理: 在高频区, 飞机旋转部件桨叶的相对运动, 产生的散射中心的幅度、相位的变化是造成回波复包络幅度、相位变化的主要原因。作为飞机整体其雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)比较大, 而且有一个相同的径向速度, 即多普勒频移, 在一个天线扫描周期内, 多普勒频移可以认为是不变的。这就表明了目标回波的调制特征主要是由目标旋转部件(如飞机的旋翼和螺旋桨等)的相对运动造成的, 且调制特征均出现在相邻的脉冲之间^[3]。依据这一机理, 本文利用回波脉间的幅度偏差系数 g_a 来提取目标回波的幅度调制特征^[4], 这一特征为分类器的设计提供了依据。

$$g_a = \sigma_a / \bar{a} \quad (1)$$

式中:

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N_a - 1} \left(\sum_{i=1}^{N_a} a_i^2 - N_a \bar{a}^2 \right), \quad \bar{a} = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} a_i \quad (2)$$

式中： N_a 为雷达天线扫描目标时有效回波数； a_i 表示第*i*次发射回波的幅度分量； σ_a 为幅度分量的标准差； \bar{a} 为均值。从式(1)和式(2)可以看出：幅度偏差系数 g_a 是一个相对的量， g_a 的值越大，说明幅度分量的标准差偏离均值就越大，时域的回波中幅度波动比较大，飞机目标旋转部件的调制分量在整个回波信息中占有的成分较大，即目标旋转部件在飞机结构中比较明显，例如螺旋桨类飞机和直升机类飞机；反之，如果 g_a 的值越小，说明回波中以平稳的机身分量为主，旋转部件占整个飞机结构的比例相对较小，例如民航机类飞机。因此，幅度偏差系数 g_a 反映了飞机旋转部件结构的复杂程度，对于识别飞机类型是一种很好的特征。

1 仿真分析

对于民航机类飞机，选取波音系列的飞机仿真模型为例，选定参数：雷达重复周期 $T_r=0.1$ ms，波长 $\lambda=0.1$ m，有效桨叶长度 $l=0.86$ m，桨叶数 $N=46$ ，桨叶转速 $f_r=80$ r/s，桨叶的旋转初角 $\theta_0=\pi/6$ ($\pi=3.1415926$)，飞机速度 $v=100$ m/s，雷达波束与旋转平面的夹角 $\beta=0^\circ$ 。选取目标 40 个相邻脉冲数据，提取其幅度偏差系数，见图 1。

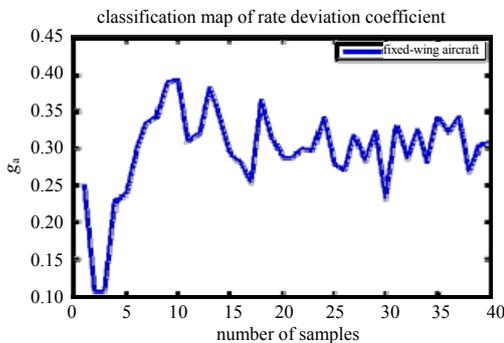


Fig.1 Fixed wing aircraft amplitude deviation coefficients
图 1 固定翼类飞机幅度偏差系数

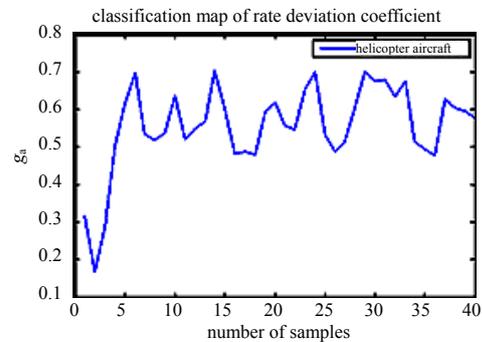


Fig.2 Helicopter aircraft amplitude deviation coefficients
图 2 直升机类飞机幅度偏差系数

对于直升机类飞机，以某型号直升机仿真模型为例，给定参数雷达重复周期 $T_r=0.1$ ms， $\lambda=0.1$ m，选择某型直升机的参数，有效桨长 $l=6.0$ m，桨叶数 $N=4$ ，桨叶转速 $f_r=5$ r/s，目标速度 $v=50$ m/s，桨叶的旋转初角 $\theta_0=\pi/6$ 。选取目标 40 个相邻脉冲数据，提取其幅度偏差系数，见图 2。统计两类飞机幅度偏差系数，见表 1。

从图 1、图 2 和表 1 可以看出：用仿真的数据提取目标幅度偏差系数，其固定翼类飞机的均值较小，说明飞机的旋转部件在整个机身上占的比例较小；直升机类飞机均值较大，说明直升机主翼在整个飞机结构中占的比例较大，以幅度偏差系数为特征量可以对目标进行分类。

表 1 直升机类和固定翼类飞机 g_a 的比较

Table1 Comparison between helicopters and fixed wing aircrafts		
parameters	helicopter category	fixed-wing aircraft category
mean of g_a	0.551 7	0.297 9
standard deviation of g_a	0.113 1	0.059 7

2 实测数据分析

基于以上论述，笔者对 2011 年 3 月在南京某试验场的雷达实测数据进行了分析，目标为民航机和直升机两类，选用的雷达带宽为 5 M；距离单元为 30 m；天线转速为 4 s/圈，天线方面波宽度(3 dB) 3° ；雷达重复频率为 300 μ s。

2.1 民航机类飞机

目标 1：目标 1 的航迹见图 3，幅度偏差系数见图 4。

计算目标在方位 206.35°，距离 35.196 km 处相邻的 40 个样本数，提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a ，计算 g_a 的均值为 0.406 6。

目标 2: 分析目标 2 的速度为 309.34 m/s, 起始航向角为 -5.816° , 结束航向角为 -9.746° , 目标 2 的幅度偏差系数见图 5。计算目标在方位 235.57° , 距离 23.749 km 处相邻的 40 个样本数, 提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a , 计算 g_a 的均值为 0.376 6。

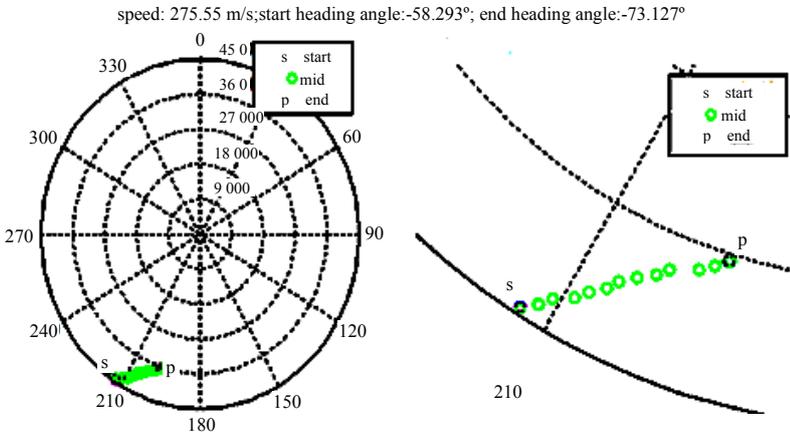


Fig.3 Track map for target 1
图 3 目标 1 的航迹图

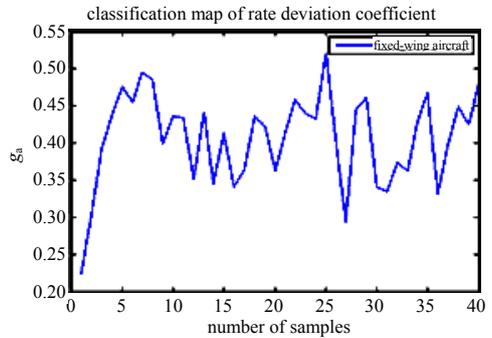


Fig.4 Fixed wing aircraft amplitude deviation coefficients
图 4 固定翼类飞机幅度偏差系数

目标 3: 分析目标 3 的速度为 190.18 m/s, 起始航向角为 -5.884° , 结束航向角为 -1.049° , 幅度偏差系数见图 6。计算目标在方位 229.207° , 距离 17.749 km 处相邻的 40 个样本数, 提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a , 计算 g_a 的均值为 0.306 5。

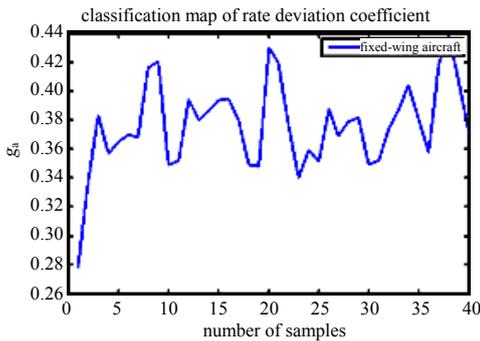


Fig.5 Fixed wing aircraft amplitude deviation coefficients
图 5 固定翼类飞机幅度偏差系数

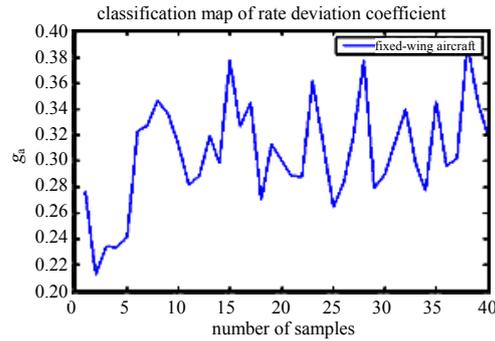


Fig.6 Fixed wing aircraft amplitude deviation coefficient
图 6 固定翼类飞机幅度偏差系数

2.2 某型号直升机类飞机

目标 4: 分析目标 4 的速度为 11.18 m/s, 起始航向角为 20.044° , 结束航向角为 23.471° , 幅度偏差系数见图 7。计算目标在方位 200.26° , 距离 32.553 km 处相邻的 40 个样本数, 提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a , 计算 g_a 的均值为 0.561 3。

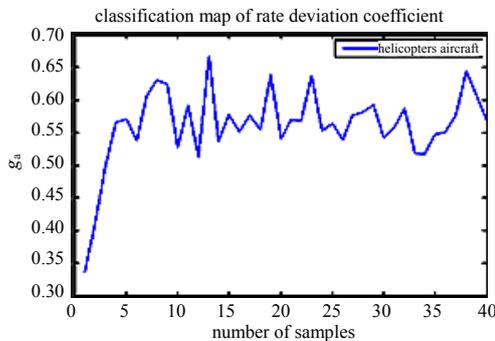


Fig.7 Helicopter aircraft amplitude deviation coefficients
图 7 直升机类飞机幅度偏差系数

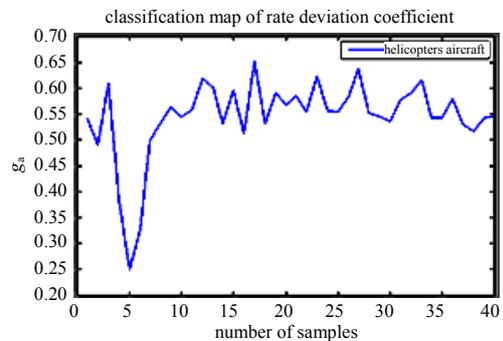


Fig.8 Helicopter aircraft amplitude deviation coefficients
图 8 直升机类飞机幅度偏差系数

目标 5: 分析目标 5 的速度为 7.689 m/s, 起始航向角为 -64.755° , 结束航向角为 -71.763° , 幅度偏差系数见图 8。计算目标在方位 199.704° , 距离 32.447 km 处相邻的 40 个样本数, 提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a , 计算 g_a 的均值为 0.545 2。

利用上述采集 5 批目标的数据，提取目标的调制特征幅度偏差系数 g_a ，比较两类飞机的特征，其结果见表 2。对上面表格反映出的不同目标之间幅度偏差系数的差别，用图 9 显示，便于分类。横轴表示样本的序号，纵轴表示样本的幅度偏差系数。

由以上分析可以看出：

- 1) 幅度偏差系数能反映飞机本身旋转部件的结构特征，这也验证了具有旋转部件飞机散射机理的正确性。
- 2) 固定翼和直升机在幅度偏差系数上有很大的差别。直升机的幅度偏差系数比较大，说明目标物理结构上有相对比较大的旋转部件，其平均值较大；固定翼的幅度偏差系数比较小，说明旋转部件在整个机身上占的比例较小，其平均值较小。利用这类特征可以对空目标进行分类。
- 3) 每类飞机幅度偏差系数的均值都比较稳定，在飞机飞行姿态变化的情况下，其变化较小，具有相对的不变性，其稳定性较好，可以作为特征量，用于对目标实现分类。

3 分类器的设计

由前文分析，直升机类飞机和固定翼类飞机在幅度调制特征中存在较大的类间距离^[5]，可以实现对空目标的粗分类。首先采用传统支持向量机(Support Vector Machine, SVM)算法，提取目标幅度偏差系数作为输入特征向量，选取核函数型的内积方法，得到支持向量机的一种径向基函数分类器^[6]，它的每一个基函数的中心对应于一个支持向量，它们及输出的权值都由 SVM 算法自动确定。选取径向的内积函数：

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{|x - x_i|^2}{256\delta^2}\right) \quad (3)$$

以仿真数据和实际采集目标 1,2,3,4 和 5 为特征数据库。其中仿真数据中固定翼飞机以波音系列飞机为代表，直升机类飞机以某型号直升机为代表；实际采集数据目标 1,2 和 3 为固定翼类飞机，目标 4 和 5 为直升机类飞机。以 3 批固定翼目标，50 次回波，2 批直升机类飞机，50 次回波作为测试样本，选择 $\gamma = 10$ ， $\delta = 0.9$ ，对目标进行分类结果识别率见表 3。

本文提出了以幅度偏差系数为特征向量的最近邻分类器的设计方法。其流程见图 10。

固定翼类飞机、直升机类飞机分类编号为 1 和 2。利用幅度偏差系数做特征向量，定义幅度调制特征间的欧式距离为：

$$d_{ig} = \left[(g_a - \bar{g}_a^{(i)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i=1,2 \quad (4)$$

式中： i 为待识别分类飞机的类别数； g_a 为从待识别回波幅度序列中提取的幅度调制特征值； $\bar{g}_a^{(i)}$ 为第 i 类目标的模板值均值。先从待识别回波数据中求得 $a(n)$ ，再计算 d_{ig} ，基于最小距离 $\min|d_{ig}|$ 将目标分为直升机类飞机和固定翼类飞机^[7]。

选取上述特征数据库和测试样本，分类结果见表 4。

由表 3 和表 4 看出：支持向量机算法识别率相对较低，而且其算法复杂，计算量较大；最近邻算法的设计，其算法复杂度小，计算量小，识别率较高，以幅度偏差系数为特征能较好地地区分固定翼类飞机和直升机类飞机，满足工程上实时性的要求^[7]，便于工程上的实现。

表 2 直升机类和固定翼类飞机 g_a 的比较

parameters	helicopter category	fixed-wing aircraft category
mean of g_a	0.481 7	0.321 4
standard deviation of g_a	0.028 6	0.043 3

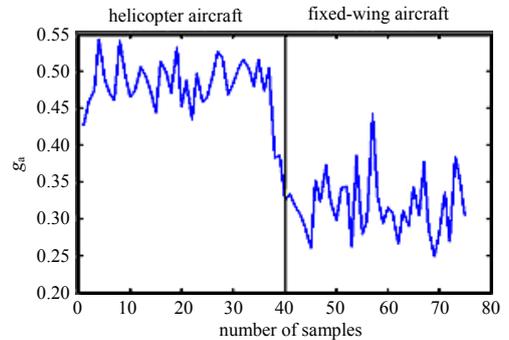


Fig.9 Comparison of the characteristics of amplitude modulation
图 9 幅度调制特征的比较

表 3 直升机类和固定翼类飞机 g_a 的识别率

fixed-wing aircraft/%	helicopter aircraft/%
90.05	90.36

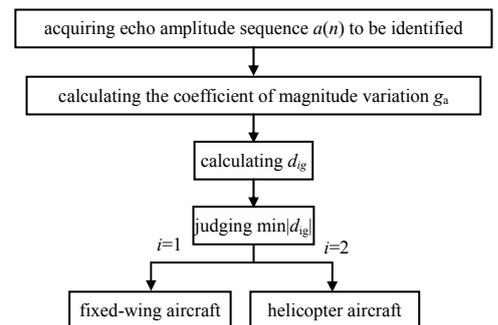


Fig.10 Flow chart of nearest neighbor classification
图 10 最近邻法分类流程图

表 4 直升机类和固定翼类飞机 g_a 的识别率

fixed-wing aircraft/%	helicopter aircraft/%
92.11	91.53

4 结论

根据旋转部件对雷达回波的调制作用,针对其时域幅度调制特征,以幅度偏差系数为特征向量,设计了一种最近邻的分类器。利用仿真和实测数据,实现了对空中目标直升机类飞机和固定翼类飞机的分类。在实际应用中,把分类正确的回波数据继续作为样本自动添加到特征数据库,不断提高数据库的完整性,可以提高识别率。此外,该分类方法只是一种预分类处理,预分类后还需要对这两类飞机的各种机型进行进一步分类^[8],如波音系列和巡逻机等固定翼飞机的具体型号的分类。如果延长波束扫过目标的时间,即获得更多相关脉冲数目,再综合利用目标 RCS、速度等信息,还可以进一步提高分类性能。

参考文献:

- [1] Chen V C, Fayin Li, 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
- [2] Chen V C. Spatial and Temporal Independent Component Analysis of Micro-Doppler Features[C]// 2005 IEEE International Radar Conference. Washington, DC: [s.n.], 2005: 348-353.
- [3] 马建华, 刘宏伟, 保铮. 固定翼飞机和直升机的分类方法研究[J]. 现代雷达, 2008, 26(12): 45-48. (MA Jianhua, LIU Hongwei, BAO Zheng. Helicopter and fixed-wing aircraft classification method research[J]. Modern Radar, 2008, 26(12): 45-48.)
- [4] 丁建江. 防空雷达目标识别技术[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2009. (DING Jianjiang. Air Defense Radar Target Recognition Technique[M]. Changsha: National Defense Industry Press, 2009.)
- [5] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1999. (BIAN Zhaoqi, ZHANG Xuegong. Pattern Recognition[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.)
- [6] 杨磊, 王晓丹, 张玉玺. 一种基于多特征提取的雷达目标识别方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(12): 35-39. (YANG Lei, WANG Xiaodan, ZHANG Yuxi. A Radar Target Recognition Approach Based on Multi-Feature Extraction[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(12): 35-39.)
- [7] 张玉军, 杨巨龙, 孙大飞, 等. 小波 MFCC 和 HMM 在低空声目标识别中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(6): 744-748. (ZHANG Yujun, YANG Julong, SUN Dafei, et al. Wavelet MFCC and HMM in low altitude acoustic target recognition[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(6): 744-748.)
- [8] 陈思, 杨健. 基于一维匹配滤波的 SAR 目标识别[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(2): 133-137. (CHEN Si, YANG Jian. Based on the one-dimensional matching filter for SAR target recognition[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(2): 133-137.)

作者简介:



苗振奎(1983-), 男, 山东省济宁市人, 工程师, 硕士, 主要从事雷达信号处理和雷达的目标识别领域的研究. email: tougesanfenqiu@163.com

李亮(1978-), 男, 甘肃省华池市人, 工程师, 硕士, 研究方向为雷达信号处理.

徐伟(1984-), 男, 江苏省盐城市人, 工程师, 硕士, 研究方向为雷达视频压缩处理.

张同舟(1985-), 男, 山东省潍坊市人, 工程师, 硕士, 主要从事雷达信号处理与显示领域的研究.