

航空鸟击雷达鸟情探测研究

宁焕生¹, 刘文明¹, 李 敬², 赵欣如³

(1. 北京航空航天大学电子与信息工程学院, 北京 100083;

2. 民航总局航空安全技术中心, 北京 100028; 3. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘 要: 鸟击问题是全世界航空业共同的难题, 受到国际学术界的普遍关注. 基于雷达的鸟情探测的研究取得了很大进展, 在一些发达国家已经建立起实用的雷达鸟击预警系统. 本文首先总结了雷达鸟情探测研究的概况, 介绍国外雷达鸟情探测系统的发展现状, 鸟类雷达目标回波信息的特点、识别和检测方法. 然后介绍了雷达鸟类目标探测的新进展: 地理信息系统(GIS)、人工神经网络、计算机网络等新技术应用于雷达鸟情探测系统, 构成了高效、实时的三维雷达鸟情探测网. 最后提出了雷达鸟类识别研究的未来发展方向.

关键词: 鸟击防范; 雷达; 地理信息系统; 人工神经网络

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)12-2232-06

Research on Radar Avian Detection for Aviation

NING Huansheng¹, LIU Wengming¹, LI Jing², ZHAO Xiru³

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Center of Aviation Safety Technology, CAAC, Beijing 100028, China; 3. College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The bird strike hazard is a worldwide problem to aviation, which has received prevalent attention from international academe. The studying of avian detection based on radar has made much progress and some practical radar avian surveillance systems have been set up. A survey of research on radar avian detection, including progress actuality of foreign radar avian detection system, the characteristics of bird echo and the method of identification and detection, are presented. The new research are proposed in three aspects, Geographic Information Systems(GIS), Artificial Neural Network (ANN) and computer network, which are combined with radar avian detection system to set up a high efficient, real time, 3D radar avian detection network. Finally, several research topics in future are suggested.

Key words: avian surveillance; radar; geographic information systems(GIS); artificial neural network(ANN)

1 引言

鸟击是指航空器起降或飞行过程中和鸟类、蝙蝠等飞行物相撞的事件. 自从有了航空器就有了鸟击事件, 鸟击问题给航空业造成巨大的经济损失, 同时也危及乘客的生命安全^[1, 2]. 目前, 关于鸟击问题的研究已成为国际学术界、民航界的研究热点, 鸟击防范研究已发展成为跨学科的具有重大应用价值的科研课题.

探测鸟类的活动规律是减少鸟击的关键要素之一. 利用雷达识别生物目标, 建立鸟击预警模型, 有针对性地驱散和避开鸟群, 是降低鸟击风险行之有效的途径. 先进的数字化宽带雷达的出现和高性能计算机的应用使得许多图像处理和模式识别的技术应用到雷达生物目标识别中. 国外已经建立起实用的雷达鸟击防范系统, 积累了许多有效的方法, 取得很好的效果. 国内学者和相关部门已开始重视和着手这一研究工作,

但还鲜有实质性进展.

2 雷达鸟情探测研究概况

2.1 鸟类活动的雷达研究^[3]

雷达被用于观测鸟类的活动已经有将近 60 年的历史了, 初期, 雷达操作员发现, 在雷达屏幕上可以看到并非航空器的未知目标的回波, 这种未知目标的回波在当时被称作“天使(Angels)”. 后来的研究发现, 这种“天使”实际上是由鸟类造成的. 由此, 雷达被广泛应用到鸟类的定期迁徙和在当地活动的研究中.

雷达是观察鸟类活动的重要工具, 它可以在广大空域里识别各种鸟类, 而不局限于观察人员用望远镜目视观察; 通过雷达可以计算出大群鸟类的飞行方向和速度; 可长时间跟踪记录鸟类活动规律; 更重要的是雷达可以在夜间如同白天一样地观测鸟类. 雷达系统在鸟情信息收集上具有自动化程

度高、数据便于分析存储、受天气和光线条件影响小等多项优点。

随着航空器的广泛应用, 因鸟类造成的飞行事故逐渐增多。20 世纪 60 年代, 一些重大的飞机坠毁事故被发现是由鸟击事件引起以后, 美国和欧洲一些国家开始重视雷达鸟击预警系统的研究。雷达观测鸟类飞行的数据被应用到航空安全领域。

2.2 雷达鸟情探测系统的发展

雷达鸟情探测系统随着雷达技术、计算机技术、信息处理技术的进步获得了快速的发展。高性能雷达系统和计算机处理系统使得快速获取鸟情信息成为可能; 与此同时, 从混杂着气象信息的回波图像中提取鸟情信息的算法也取得突破。此外, 现代雷达鸟情探测系统还具有后台数据处理的能力, 通过数据挖掘的算法, 研究鸟类活动的规律, 用于预测鸟情, 防范鸟击。下面将概述雷达鸟情探测系统的发展现状。

2.2.1 BIRDTAM 系统

20 世纪 60 年代到 70 年代, 欧洲利用鸟类雷达探测技术开发了 BIRDTAM 系统, 提供近似实时的鸟情观测, 发布鸟击预警。然而, 当时用于鸟类探测的雷达技术是有限的, 在量化方面留下了大量的手工作业。20 世纪 90 年代, 德国军用地球物理实验室开发的雷达鸟情探测系统中延续了 BIRDTAM 的名字, 该系统被广泛用来观察鸟类迁徙, 给出实时鸟击警告。获取的鸟情资料已经提供给德国航空业和周边国家应用^[4]。

2.2.2 鸟类危险咨询系统(AHAS)^[5]

1998 年秋, Ger Marine 公司鸟类研究实验室在美国空军指挥总部的资助下, 开发了鸟类危险咨询系统(AHAS), 用于监控和预报美国 48 个州的鸟类活动。目前该系统基于美国新安装的 NEXRAD WSR-88D^[6,7] 气象雷达网, 如图 1 所示。该雷达网几乎覆盖所有美国地区和加拿大南部地区, 具有很强的探测弱目标的功能。该雷达网提供的数据被用于防范鸟击, 保障飞行安全, 保护迁徙鸟群等许多方面。AHAS 系统利用气象雷达提供的数据, 采用图像处理 and 神经网络等模式识别的算法, 从雷达数据中准确地将生物学目标同其他目标区别开来, 实时地将雷达数据转变为鸟情信息, 减少鸟击的可能性。

2.2.3 机场区域鸟情探测系统^[8,9]

鸟类危险咨询系统(AHAS)从 NEXRAD 气象雷达网上获取数据。由于大多数气象雷达距离机场太远, 以及受角度的限制而无法探测到机场上方低空飞行的鸟类。机场区域鸟情探测成为人们研究的热点。其中具有代表性的是美国联邦航空局(FAA)开发的终端区域鸟类危险咨询系统(TAHAS)和 Clemson 大学雷达鸟类实验室开发的移动式雷达鸟类探测系统—BIRDRAD 系统。

终端区域鸟类危险咨询系统包括两套雷达系统—终端多普勒气象雷达(TDWR)和机场监视雷达(ASR-9)。该系统具有探测生物目标的能力, 可以监控机场附近的鸟类活动。具有较快的信息更新速度, 持续更新的信息可以确定在机场附近栖息和觅食的鸟群位置并估算其数目。通过空中交通管理控制系统或者直接的数据链向正在着陆和起飞的飞机驾驶员发出实时的鸟类活动状态警告。

BIRDRAD 系统是采用高性能商业雷达和 PC 机开发的

移动式雷达鸟类探测系统, 被用于在较小的范围内探测鸟类的活动。该系统具有很快的扫描周期(2.5s)和很窄的波束宽度, 非常有利于实时探测鸟情信息, 该系统由一台观测车搭载, 包括雷达、处理器、GPS 定位仪、传输设备等。BIRDRAD 系统可移动的的优点可以补充 AHAS 系统的不足, 实时监控具体地点的鸟类活动, 开发有针对性的避险模型。

2.3 雷达鸟类目标回波信息的特点及识别方法

目前的雷达鸟类探测系统多是由气象雷达^[10-12]或海事雷达系统^[13]改造而成, 鸟类信息的识别大多基于雷达的回波图像和多普勒信息。要从雷达回波信息中正确地提取鸟类的信息, 必须从鸟类目标本身的特点、雷达系统的工作原理和雷达图像处理算法等多方面去研究。

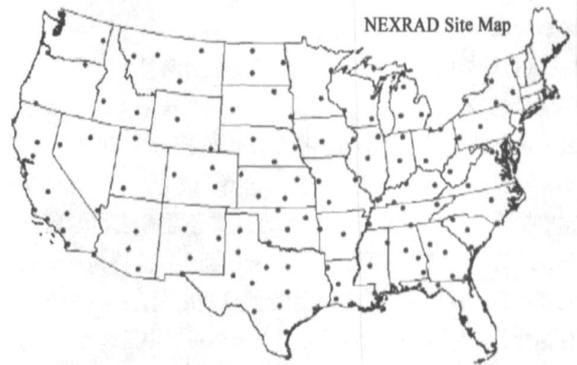


图 1 AHAS 系统 NEXRAD 雷达网分布图

2.3.1 鸟类目标的雷达散射截面(RCS)和飞行特点^[14,15]

鸟类的回波反射率取决于鸟类的 RCS, 多普勒信息则取决于鸟类的飞行速度。许多文献对鸟类的 RCS 和飞行特点作了研究。鸟类的 RCS 主要取决于它的体积, 除了某些大型鸟类, 一般要小于飞机、舰船和导弹。表 1 列出了几种鸟类在三个不同频段(X, S, L)的 RCS。

鸟类的飞行速度受多种因素影响, 主要有体积、形态、迁徙和风。一般情况下, 体积越大速度越快, 但也有例外。翅膀较大, 体重相对较小的鸟类飞行速度较快。迁徙中的鸟群飞行速度较平时要快。风速对鸟类飞行速度的影响较为复杂, 不能将风速简单地加到无风时的飞行速度上。多数鸟类的飞行高度在 2000m 以下, 个别跨洋迁徙的鸟类飞行高度超过 6000m。

2.3.2 鸟类目标探测对雷达系统的要求^[16,17]

鸟类目标探测不同于一般航空器探测, 总结目前研究和现有雷达特点, 具体要求如下:

表 1 几种鸟类 RCS 的理论值和实验值

种类	重量 (g)	RCS 理论值(m ² ·m)			RCS 理论值(dBsm)			RCS 实验值(dBsm)		
		X	S	L	X	S	L	X	S	L
鸣鸟	10	0.0005	0.0005	0.00002	-33	-33	-47			
麻雀	25	0.0006	0.0016	0.00013	-32	-28	-39	-37	-28	
八哥	75	0.0013	0.0017	0.0010	-29	-28	-30	-31		
玃科鸟	200	0.0014	0.0014	0.0051	-29	-29	-23			
鸽子	500	0.0027	0.0038	0.0109	-26	-24	-20	-28	-21	
野鸭	800	0.0044	0.0031	0.0088	-24	-25	-21	-21	-30	
天鹅	10000	0.024	0.027	0.021	-16	-16	-17			

(1) 雷达波束宽度. 波束越窄, 分辨力越高, 越有利于分辨单个飞鸟; (2) 雷达相对于机场终端区域的相对位置. 机场外的雷达易受到干扰源的影响, 不利于分辨小群或单个鸟; (3) 雷达扫描的更新率. 每分钟更新率最好达到 20 次以上; (4) 雷达可探测的目标反射率较低. 一般要能够探测到低空飞行的 RCS 为万分之一平方米的鸟类目标, 而鸟群的反射率相对就高一些; (5) 雷达极化方式. 最好能够从线极化到圆极化转换, 以便于探测因天气变化而变得模糊的目标; (6) 雷达数据质量. 雷达应能提供可编辑的雷达图像数据, 这样配合杂波滤波器、多普勒分析和一些图像处理手段才能有利于识别.

2.3.3 鸟类目标回波信息与气象信息的区分方法^[18-20]

利用雷达探测跟踪鸟类的难点在于: 在雷达回波图像中将气象、环境等非生物回波信息同鸟类的回波信息区分开. 许多研究表明鸟类的回波图像具有如下特点:

(1) 鸟类的回波区域总体上来说在分布情况上要小于气象信号; (2) 生物目标的点刻度(在一段回波最大值和最小值之间区分预测斜率和实际斜率的度量值)要大一些, 迁徙的鸟类比栖息的鸟类更明显一些; (3) 鸟类回波的速度变化或频谱宽度要小于气象信号; (4) 鸟类的回波经常有不均匀的反射率; (5) 鸟类回波以中间有环形信号的圆弧模式传播; (6) 鸟类回波以最大反射率结合最大速度的模式出现; (7) 相对于气象目标而言, 鸟类限制在大气层中很窄的一层中活动.

从屏幕上接收到的雷达图像来看, 对探测最重要的是回波反射率和多普勒速度. 回波反射率可以从图像中直接得到, 通过对不同时刻的图像进行处理得到多普勒速度图像. 由于气象雷达中能够产生高仰角和低仰角的反射率图像, 我们可以利用不同仰角的扇形波来区分在低海拔高度活动的鸟类和气象信号之类垂直分布的目标. 同时运动是很好的判断标志, 研究发现鸟的回波信号前沿扩展速度为 10~13.5 米/秒, 单只鸟的速度可能比这更高, 一般可以达到 15~20 米/秒.

雷达目标识别具有多种方法^[21], 近年来基于高分辨的雷达成像的识别技术获得了很大进步. 许多图像处理的技术^[22]被应用到雷达目标识别中, AHAS 使用标准图像处理技术从雷达图像上去掉天气目标. 虽然这种方法取得了巨大成功, 但在应用上还是受到一定限制, 因为在气象锋面边缘处会丢失少量气象信息, 当迁徙正好出现在气象锋面边缘时, 雪与鸟类目标发生混淆, 使得整块的生物学目标被去除.

2000 年春, 鸟类研究实验室创立了一种能够更精确地将生物学目标从气象信息中区分出来的算法^[7]. 所采用的方法是使用神经网络系统来确定每一公里像素是否是生物学类或

非生物学类目标(雨、雪、谷壳、烟、尘埃等). 神经网络系统通过每个像素在三维空间的反射率数值的形式和分布来确定每一公里像素的组成成分. 这种新方法得出的结果比以前的图像处理法有了很大的进步: 与气象锋面邻近和接触处的生物学目标可以被分离出来, 气象信息大都去除了, 并且能够更好地将雪与生物学目标分离开来. 图 2 所示为 Sicom Systems 公司提出的一种图像处理算法的示意图^[23].

3 雷达鸟类目标探测新进展

3.1 地理信息系统(GIS)与鸟击雷达防范系统相结合^[24]

地理信息系统(Geographic Information Systems, 简称 GIS)是一种采集、存储、管理、分析、显示与应用地理信息的软件系统, 是分析和处理海量地理数据的通用技术^[25]. 地理信息系统萌芽于 20 世纪 60 年代的加拿大和美国, 1972 年世界上第一个可运行的地理信息系统—加拿大地理信息系统(CGIS)全面投入运行与使用.

地理信息系统是一种决策支持系统, 它与其他信息系统的主要区别是其存储和处理的信息是经过地理编码的, 地理位置及与位置有关的地物属性信息成为信息检索的重要部分^[26]. 通过鸟击雷达获取的雷达回波图像, 利用前面的方法提取鸟群飞行的轨迹, 动态获取鸟群的信息(如位置、高度、飞行速度等), 同时将机场附近的环境、气象及飞机飞行路线等要素综合到一个统一的地理信息系统中. 基于这个系统可以动态跟踪和监控鸟群的活动, 预测鸟击的概率, 及时地将鸟情信息通报给空管人员和飞行员, 避免鸟击事故的发生. 图 3 是一个将鸟群跟踪信息和 GIS 系统综合的一个示意图.

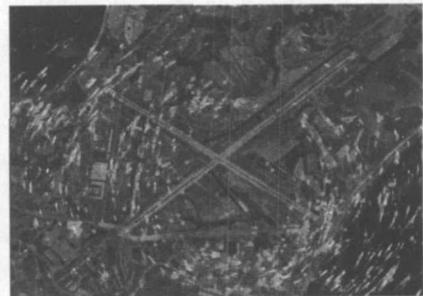


图3 GIS系统与雷达鸟类探测系统综合的示意图

3.2 神经网络应用于雷达鸟类目标识别^[27, 28]

20 世纪 50 年代, 研究人员就开始模拟动物神经系统的某些功能, 他们采用软件或硬件的办法, 建立了许多以大量处理单元为结点、处理单元间实现(加权值的)互联的拓扑网络进行模拟, 称之为神经网络. 神经网络的主要特点在于其具有信息处理的并行性、自组织和自适应性, 具有很强的学习能力和联想功能以及容错性能等, 在解决一些复杂的模式识别问题中显示出其独特的优势, 近年来在图像处理中应用很多. 神经网络是一种复杂的非线性映射方法, 其物理意义比较难解释, 在理论上还存在一系列亟待解决的问题. 许多改进的神经网络系统应用于雷达目标识别. 利用神经网络可以有效地将鸟类信息从气象信息中识别出来. 上文提到的鸟类研究实验室在 2000 年创立的一种能够更精确地将生物学

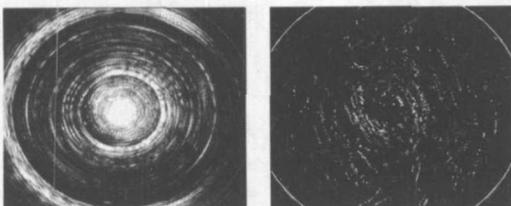


图2 (a)未经处理的雷达回波图像
(b)经过图像处理的跟踪图像

目标从气象信息中区分出来的算法就是应用神经网络系统。2001年6月,该算法在AHAS中投入运行。2002年前,AHAS系统已经在美国48个州的2/3地区推广,在2002年度该系统已在剩余的1/3地区投入运行。

3.3 网络化的机场鸟类雷达探测系统^[29,30]

近年来,计算机网络发展迅速,网络带宽和速度不断提高,大数据量的实时传输成为现实,目前使用的机场鸟类雷达

探测系统,是由分布在不同地区的传感器(雷达)、处理器、终端设备通过网络连接而成的系统。雷达动态实时地采集不同地区的鸟情信息,通过网络传输给中央处理器集中分析预测,通知地勤和空中管制人员采取避险措施;另一方面通过上行链(up link)或空中交通服务系统(ATS)传递给飞行员,适当改变航线或提高爬升率以提高安全系数。图4所示为Sensis公司机场监控网络系统的示意图^[31]。

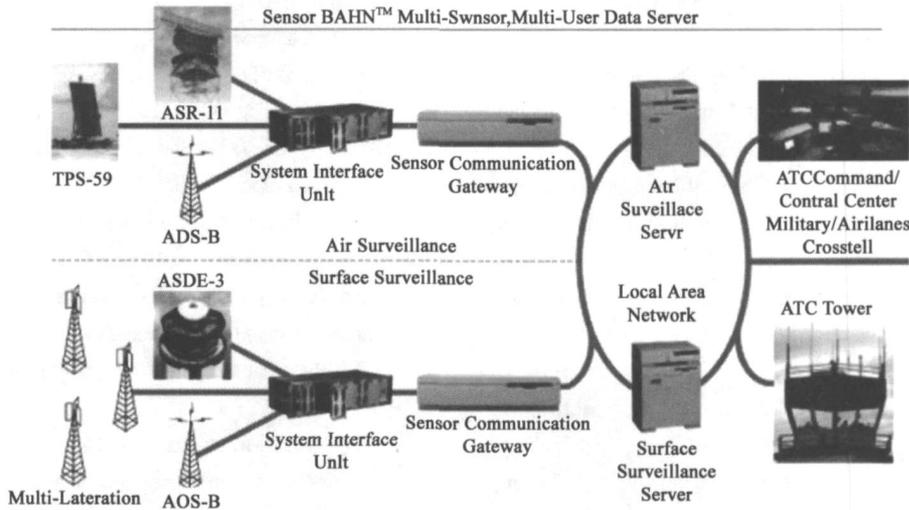


图4 Sensis公司机场监控网络系统的示意图

上文提到的美国机场终端区域鸟类危险咨询系统(TAHAS),拥有高扫描速率的ASR-9系统非常适合于机场终端区域的鸟类活动探测,与鸟类危险咨询系统(AHAS)互为补充,构成一个遍布全美的网络,可以有效地探测、记录美国全国范围内的鸟类活动规律和机场终端区域的鸟类活动状况,进而通过数据的积累、分析和预测,为降低鸟击事件提供科学的指导。

4 总结和展望

鸟击事件给航空业带来了巨大的损失,严重威胁乘客的生命安全,并且随着环境的改善,鸟类数量和航空器数量的增加,鸟击事件的概率也在增加。鸟击防范工作的必要性和艰巨性得到了航空界的一致认同和重视。目前,关于鸟击问题的研究已成为国际学术界、民航界的研究热点,世界上很多国家对减少鸟击问题的研究都加大了投入,鸟击防范研究已发展成为跨学科的具有重大应用价值的科研课题,吸引了各个方面的很多专家从事这项工作^[32-41]。

雷达技术和相应的计算机技术的发展使得能够开发出鸟情信息探测和警告的实时系统,为机场鸟击防范提供了一种行之有效的办法。在国外,一些实用的系统也建立起来,起到了显著的效果。我国在这方面的研究才刚刚起步,还有很多工作要做^[42-45]。

鸟类等生物目标具有较低的雷达回波反射率,雷达回波图像也不同于普通光学图像。因此,生物目标探测一直是一个难点问题,随着计算机技术的发展和数字图像处理研究的进展,许多成熟的算法相继提出,基于数字图像处理的鸟类雷达跟踪算法也取得了突破。同时,人工神经网络的研究再次成为

热点,提出了许多改进的神经网络模型,一些模型应用到气象雷达信号处理中,进而应用到雷达鸟类目标探测中。

雷达生物目标识别未来的研究仍然从硬件和软件两个方向展开,硬件上进一步改进雷达系统,例如更窄的雷达波束、更高的分辨率、更低的可探测RCS值、更快的扫描速度等,改进雷达信号处理算法,获取更清晰的雷达回波图像;软件算法上则进一步提高图像处理水平,更好地将生物信息与非生物信息区分开,开发更友好的交互系统,将全国乃至全世界的飞机空中管理系统、鸟类雷达探测系统、气象系统等综合起来,共同建立一个飞行安全的决策系统,实时观测和预测鸟情信息,规划飞行路线,降低鸟击发生的概率。

参考文献:

- [1] 刘勇. 机场鸟害防治重在综合治理[J]. 中国民用航空, 2003, (9): 55-56.
Liu Yong. Comprehensive control needed in airport bird disaster prevention[J]. China Civil Aviation, 2003, (9): 55-56. (in Chinese)
- [2] 熊杰. 飞行中防止鸟击的方法[J]. 中国民用航空, 2003, (6): 52-54.
Xiong Jie. Methods of Preventing Bird Strike During Flight[J]. China Civil Aviation, 2003, (6): 52-54. (in Chinese)
- [3] S Gauthreaux Jr, C Belser. Overview: Radar ornithology and biological conservation[J]. Auk, 2003, 120(2): 266-267.
- [4] Ruhe W. New developments for improving the German BIRD-TAM/ BIRDSTRIKE warning system[A]. Proceedings of the 22. BSCE Meeting[C]. Vienna, Austria, WP 36, 1994, 263-

- 274.
- [5] S Gauthreaux Jr, C Belser, D Van Blaricom. Using a network of WSR-88D weather surveillance radars to define patterns of bird migration at large spatial scales[A]. Berthold, P, E. Gwinner, E. Sonnenschein (eds.) Avian Migration[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2003. 335- 346.
- [6] S Gauthreaux Jr, C Belser. Display of bird movement on the WSR-88D: Patterns and quantification[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 453- 464.
- [7] S Gauthreaux Jr, C Belser. " Reply " to displays of bird movements on the WSR-88D: Patterns and quantification[J]. Weather and Forecasting, 1999, 14(6): 1041- 1042.
- [8] J A Bruder, V N Cavo, M C Wicks. Bird hazard detection with airport surveillance radar[A]. Radar 97[C]. Edinburgh, UK, 1997. 160- 163.
- [9] Key, Gery, Brand, Marissa, Nohara, Tim J. BirdRad: A mobile avian radar for near range sampling of bird populations[A]. Defense Conservation Conference[C]. Savannah, GA, 2004.
- [10] 张培昌, 等, 编著. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
ZHANG Pei chang, et al. Radar Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001. (in Chinese)
- [11] 蔡成仁编. 彩色气象雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
Cai Cheng ren. Colorful Meteorological Radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [12] S Gauthreaux Jr, C Belser. Bird movement on Doppler weather surveillance radar[J]. Birding, 2003, 35(6): 616- 628.
- [13] A Harmata, K Podruzny, J Zelenak, M Morrison. Using marine navigation radar to study bird movements and impact assessment[J]. Wildlife Society Bulletin, 1999, 27(1): 44- 52.
- [14] J R Moon. A survey of bird flight data relevant to radar tracking systems[A]. RADAR 2002[C]. Edinburgh, UK, 2002. 80- 84.
- [15] J R Moon. Effects of birds on radar tracking systems[A]. RADAR 2002[C]. Edinburgh, UK, 2002. 300- 304.
- [16] Flock W L, Green J L. The detection and identification of birds in flight using coherent and noncoherent radars[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 745- 753.
- [17] 毛士艺, 等, 编著. 脉冲多普勒雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
Mao Shi yi. Pulse Doppler Radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [18] 郭华东主编. 中国雷达遥感图像分析[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Guo Hua dong. Image Analysis of Chinese Radar Remote Sensing [M]. Beijing: China Science Press, 1999. (in Chinese)
- [19] Vaughn C R. Birds and insects as radar targets: A review[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(2): 205- 227.
- [20] Fernandez Duran J J, Upton G J G. Recognizing anomalies in weather radar images[A]. Applied Statistical Pattern Recognition, IEE Colloquium[C]. Birmingham, United Kingdom: The Midlands Engineering Centre, 1999. 3/ 1- 3/ 5.
- [21] 王晓丹, 王积勤. 雷达目标识别技术综述[J]. 现代雷达, 2003, 25(5): 23- 26.
Wang Xiao dan, WANG Ji qin. An survey on radar target recognition technology[J]. Modern Radar, 2003, 25(5): 23- 26. (in Chinese)
- [22] 王耀南, 李树涛, 毛建旭, 编著. 计算机图像处理与识别技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 4.
Wang Yao nan, Li Shu tao, Mao Jian xu. Computer Image Process and Identification Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 4. (in Chinese)
- [23] T Nohara, P Weber, A Premji, C Krasnor, S. Gauthreaux, M Brand, G Key. Affordable avian radar surveillance systems for natural resource management and BASH applications[A]. IEEE Radar Conference[C]. Arlington, Virginia, USA, 2005. 9- 12.
- [24] Brent A Brown, Dr Edw in E Herricks. Develop a geographic information system to manage airport operations and reduce conflicts between wildlife and aircraft[A]. The 2002 Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference[C]. Atlantic City, New Jersey, USA, 2002.
- [25] 陈述彭. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 1.
Chen Shu peng. Geographic Information System Theory [M]. Beijing: China Science Press, 1999, 1. (in Chinese)
- [26] 邬伦, 等. 地理信息系统—原理、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1.
Wu Lun, et al. Geographic Information Systems—Principle, Method and Application [M]. Beijing: China Science Press, 2001, 1. (in Chinese)
- [27] 张立明. 人工神经网络的模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
Zhang Li ming. Model of Artificial Neural Network and Its Applications [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993. (in Chinese)
- [28] Deng C, Haykin S. A multi layer neural network classifier for radar clutter[A]. 1990 IJCNN International Joint Conference on Neural Networks[C]. San Diego, CA, USA, 1990. 241- 246.
- [29] James W Rogers, Cam J Tidwel. Terminal area surveillance system[A]. Radar Conference, Record of the IEEE 1995 International[C]. Alexandria, Virginia, USA, 1995. 501- 504.
- [30] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003, 6.
Xie Xi ren. Computer Network [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [31] Sensis Corporation. Surveillance Data Systems [Z]. <http://www.knki.net>

www.sensis.com/docs/10.

- [32] Cleary E C, Wright S E, Dolbeer R A. Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States 1990-1998[R]. Washington, DC: US Federal Aviation Administration, Wildlife Aircraft Strike Database Serial Report, No. 5, November, 1998.
- [33] Cleary E C, Dolbeer R A. Wildlife Hazard Management at Airports[R]. Washington, DC: US Federal Aviation Administration/US Department of Agriculture, 2005.
- [34] E C Cleary, R A Dolbeer, S E Wright. Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States. 1990-2002[R]. Washington, DC: Federal Aviation Administration, National Wildlife Strike Database, Serial Report, No. 9, 2003.
- [35] Covello V T, Merkhoffer M W. Risk Assessment Methods [M]. New York: Plenum Press, 1993.
- [36] Pinos A. The need to strengthen the provisions of ICAO Annex 14, Vol. 1, Relating to bird control on and in the vicinity of airports[J]. Proc Bird Strike, 1999, 1: 23-25.
- [37] Royal Society. Risk: Analysis, Perception and Management [M]. London: Royal Society Publishing, 1992.
- [38] Thorpe J. Fatalities and destroyed civil aircraft due to bird strikes 1912-2002[A]. International Bird Strike Committee, 26th Meeting[C]. Warsaw, Poland, 2003.
- [39] Blacksmith P Jr, Mack R B. On measuring the radar cross sections of ducks and chickens[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 1125-1125.
- [40] Milan Snoka, Vaclav Halavac, Roger Boyle, 著, 艾海舟, 武勃, 译. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003, 9.
Milan Snoka, Vaclav Halavac, Roger Boyle, Translated by Ai Haizhou, Wu Bo. Image Process, Analysis and Computer Vision[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003, 9. (in Chinese)
- [41] Dusan S Zrnica, Alexaner V Ryzhkov. Observations of insects and birds with a polarimetric radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 661-668.
- [42] 李敬. 对鸟击防治研究工作的一点看法[A]. 第六届全国飞行技术与飞行安全研讨会[C]. 海口: 中国民用航空协会, 2001. 11.
Li Jing. Some views on bird strike prevention research work [A]. The 6th National Flight Technology & Safety Conference [C]. Haikou: China Association for Civil Aviation, 2001. (in Chinese)
- [43] 李敬, 栗牧怀. 各方协同做好鸟击航空器防治工作[J]. 航空安全, 2003, (5): 38-44.
Li Jing, Li Mu huai. Coordinating work in bird strike air craft prevention[J]. Aviation Safety, 2003, (5): 38-44. (in Chinese)
- [44] 栗牧怀, 李敬. 中外民用航空鸟击分析[J]. 航空安全, 2002(2): 36-39.
Li Mu huai, Li Jing. Analysis of civil aviation bird strike in the world[J]. Aviation Safety, 2002, (2): 36-39.
- [45] 王家礼. 鸟击对航空安全的影响[J]. 民航经济与技, 2000, (9): 28-29.
Wang Jiar li. Bird strike's impact on flight safety [J]. Civil Aviation Economics & Technology, 2000, (9): 28-29. (in Chinese)
- [46] 栗牧怀, 李海. 减少鸟害事件, 保证民用航空安全[J]. 民航经济与技, 2000, (5): 35-38.
Li Mu huai, Li Hai. Decreasing the bird strike to guarantee the civil aviation safety[J]. Civil Aviation Economics & Technology, 2000, (5): 35-38. (in Chinese)
- [47] 黄德双. 高分辨雷达智能信号处理技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
Huang De shuang. Intelligent Signal Process Technology in High Resolution Radar [M]. Beijing: China Machine Press, 2001. (in Chinese)
- [48] 张新峰. 模式识别及其在图像处理中的应用[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 28-32.
Zhang Xin feng. Pattern identification and its applications in image process[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(5): 28-32. (in Chinese)
- [49] Rhonda L Millikin, Joseph R Buckley. Use of an adapted marine radar for short range detection and tracking of small birds in flight[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International[C]. Sydney, Australian, 2001, 5. 2010-2012.
- [50] Weber, Peter, Premji, Al, Nohara, Tim J, Krasnor, Carl. Low cost radar surveillance of inland waterways for homeland security applications[A]. IEEE Radar Conference[C]. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2004. 26-29.

作者简介:



宁焕生 男, 1975 年生于安徽怀宁, 北京航空航天大学电子与信息工程学院副教授. 1996 年毕业于安徽大学, 获电子工程专业学士学位; 1996-2001 年于北京航空航天大学硕博连读, 获通信信息系统博士学位; 2002-2003 年任航天科工集团航天金卡公司副总师, 负责智能卡、智能交通、国家重大信息安全工程研究. 主要研究领域为: RFID、电磁散射、智能交通、PMP 等.

E-mail: ninghuansheng@vip.sina.com

刘文明 男, 1981 年 6 月出生于山东潍坊, 2004 年毕业于山东大学电子信息科学与工程学院, 获工学学士学位, 现为北京航空航天大学电子信息与工程学院硕士研究生, 主要研究方向为: 雷达目标识别、天线、RFID、计算机网络.

李敬 男, 1970 年 12 月出生, 1999 年毕业于北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 获工学博士学位, 现任民航总局航空安全技术中心航空安全研究室主任, 高级工程师.

赵欣如 男, 1954 年出生, 1982 年毕业于北京师范大学生物学系, 获学士学位, 现任北京师范大学高级实验师.