基于两种扫描方式的雷达探鸟系统

陈唯实 宁焕生 李 敬

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191) (中国民用航空总局航空安全技术中心，北京 100028)

毛 峡

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

摘 要：介绍了雷达探鸟系统的研究现状，包括以鸟击危害咨询系统为代表的大型雷达探鸟系统和以 Accipiter 为代表的机场雷达探鸟系统. 基于 X 波段海事雷达搭建了“雷达探鸟实验系统”，分别验证了其在水平和垂直两种扫描方式下探鸟的可行性. 本系统在两种扫描方式下采集的两组探鸟雷达图像序列，分别由飞鸟目标提取算法进行处理. 经过背景差分、噪声抑制、目标信息提取和数据融合，将鸟情信息从原始雷达图像中提取出来，并将其与卫星地图或高度坐标系相融合，融合图像直观地反映了探测区域内飞鸟目标的分布情况. 最后，对国内外雷达探鸟系统的性能作了比较分析.

关 键 词：鸟；雷达；背景；噪声抑制；融合

中图分类号：TN 95

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)03-0380-04

Avian radar system based on two scanning modes

Chen Weishi Ning Huansheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Li Jing

(Center of Aviation Safety Technology, CAAC, Beijing 100028, China)

Mao Xia

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: State of arts of researches on avian radar systems were introduced, including large avian radar system represented by avian hazard advisory system (AHAS) and airport-based avian radar system represented by Accipiter. An avian radar experimental system was built based on X-band marine radar, and its bird detection feasibility was confirmed separately by operation in alternating horizontal and vertical position for the survey. Two series of avian radar images, which were collected under two scanning modes, were processed respectively by bird target extraction algorithm. After processing of background subtraction, noise suppression, target information extraction and data fusion, avian information was extracted from raw radar images and combined with satellite map or height coordinate system, so flying bird targets distribution situation in survey region was shown visually by fusion images. Finally, performances of avian radar systems at home and abroad were compared and analyzed.

Key words: avian; radar; background; noise suppression; fusion

鸟击危害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，仅北美地区每年鸟击所造成的军用和民用航空经济损失就超过 5 亿美元. 据民航总局统计，中国民航在 2001－2007 年

收稿日期：2008-03-31

基金项目：国家自然科学基金委员会与中国民航总局联合资助项目(60879025)；民航数据通信及新航行系统科研基地开放研究基金

作者简介：陈唯实(1982－)，男，天津市人，博士生，wishchen@ee.buaa.edu.cn.

间,报告的鸟击事件共 1 055 次,造成中等程度以上损伤 217 起,在维修中统计的直接损失超过2.7亿人民币,间接损失更加难以计算.鸟击问题已成为国际民航界与学术界的研究热点和跨学科具有重大应用价值的科研课题[1].从中国民航 2001—2007 年的鸟击报告统计发现,黎明、黄昏和夜晚等能见度差的条件下发生的鸟击事件占已知发生时间鸟击事件的 55%,事故征候占 64%.可见,人工观测较为困难的黎明、黄昏和夜晚,是鸟击事件的高发期,迫切需要相关技术手段的支持.

1　雷达探鸟系统研究现状

雷达探鸟是鸟击防范的重要预警手段,根据探测范围的不同,主要分为大型雷达探鸟系统和机场雷达探鸟系统.大型雷达探鸟系统一般基于多普勒气象雷达,适于探测较大区域内(10～60 km)的候鸟迁徙情况;机场雷达探鸟系统一般基于小型雷达,适于探测机场周边地区(0～10 km)的鸟类活动.

1) 大型雷达探鸟系统.对于国土全境的广大区域,可以采用多普勒气象雷达组网对候鸟的迁徙情况进行监测.上世纪 90 年代初,美国国家气象局在全美范围内安置了 151 部新型多普勒气象监测雷达(WSR-88D),其最高输出功率 750 kW,工作频率 2.7～3.0 GHz,采用口径 9 m 的抛物面天线,波束宽度0.96°,脉冲宽度 1.57 μs 至 4.5～5.0 μs.由这 151 部 WSR-88D 组成的雷达网能够监控美国全境的候鸟迁徙情况[2].1998 年秋,Geo-Marine 公司鸟类研究实验室在美国空军的资助下,开发了鸟击危害咨询系统(AHAS,Avian Hazard Advisory System),用于监控和预报美国 48 个州的鸟类活动.该系统基于 WSR-88D 雷达网,每 10 min 更新一次全美鸟情信息,为保障飞行安全和保护迁徙鸟类发挥了重要作用.

2) 机场雷达探鸟系统.绝大多数鸟击事件发生在飞机的起飞和着陆阶段,因此机场范围内的鸟击防范成为当前研究的热点.多普勒气象雷达探测距离可达到 60 海里,但由于其造价高、信息更新速度慢、不易操作等原因,不适于机场范围的鸟击防范.要解决机场鸟击问题,要求相应的雷达系统具有以下特点:性价比高、覆盖范围较广、实时探测、实时跟踪和三维信息获取等[3].从 70 年代末开始,经过 30 多年的发展,许多发达国家已经研制出了相对成熟的机场雷达探鸟系统,Sicom Systems Ltd. (Ontario, Canada)开发的 Accipiter[4]是其典型代表(图 1).包括雷达控制系统、数据处理器、GPS 和电源在内的系统配置置于拖车内部;雷达天线置于拖车顶部,其俯仰角可调(0°～30°).该天线进行水平扫描,且由于其波束较窄(4°),系统可获得较为精确的三维信息.



图 1　典型 Accipiter 雷达探鸟系统

2　雷达探鸟实验系统

我国的雷达探鸟研究刚刚起步,北京航空航天大学与民航总局航空安全技术中心合作,结合国外经验搭建了“雷达探鸟实验系统”(图 2).本系统采用一部功率 6 kW 的 X 波段海事雷达,垂直波束宽度 20°,转速 24 r/m,其获得的 PPI (Plane Position Indicator)雷达图像通过图像采集卡实时输出到计算机,由自行开发的飞鸟目标提取软件进行实时处理.



图 2　雷达探鸟实验系统

为了加强对机场跑道的安全监控(50%的鸟击事件发生在该区域),往往需要配备 2 部雷达,在水平和垂直 2 种扫描方式下独立工作.因此,本系统基于单部 X 波段海事雷达,进行 10 余次外场实验,分别验证其在 2 种扫描方式下探鸟的可行性.在工程应用中,2 部雷达应错开频段,保证互不干扰地同时工作.一部 S 波段水平扫描雷达,主要负责机场周边的广大地区,对鸟群活动起到预警作用;另一部 X 波段垂直扫描雷达,主要负责机场跑道上空区域,加强此区域的监控,确保航班起降安全[5].其覆盖区域的三维示意图见图 3.

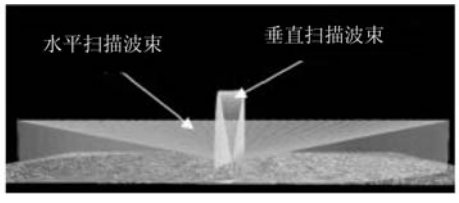


图 3　双部雷达覆盖区域三维示意图

3 飞鸟目标提取算法

飞鸟目标提取算法是“雷达探鸟实验系统”的核心，其流程图见图4. 由图像卡采集的探鸟雷达图像经过背景差分、噪声抑制(中值滤波、阈值分割和形态学)、目标信息提取和数据融合4个步骤，将鸟情信息从原始雷达图像中提取出来，生成便于观测的融合图像.

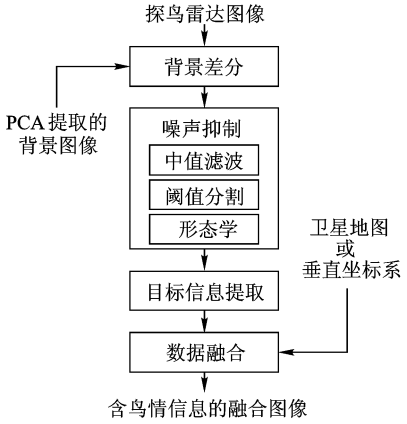


图4 飞鸟目标提取算法流程图

背景差分是飞鸟目标提取的第一步，即从探鸟雷达图像中减去背景信息，因此构造一个纯净的背景成为问题的关键. 本算法采用主成分分析(PCA，Principal Component Analysis)方法构造背景图像[6]. 每幅雷达图像都包含背景和运动目标(飞鸟)，因此背景可视为最大的主成分. 基于非线性算子的形态学，是一种相对独立的图像分析方法，对于PPI图像，它较之常规算法运算速度更快且去噪效果更好. 因此，经过阈值分割的图像采用形态学进行噪声抑制. 膨胀和腐蚀是形态学的基本操作. 膨胀是一种扩展的变换，增大原物体的面积，填充物体间小的孔洞和沟壑. 腐蚀是一种反扩展变换，压缩物体并将有细微联系的物体分离. 在实际的图像处理过程中，膨胀和腐蚀经常结合使用. 一幅图像往往经过一系列的膨胀与腐蚀处理，采用相同或不同的结构单元[7]. 经过背景差分和噪声抑制的探鸟雷达PPI图像中，相互联结的高亮区域的集合构成一个限于当前分辨能力的飞鸟目标. 通过区域标记和区域面积测量，提取出目标中心坐标和大小等信息[8]. 在区域标记过程中，由于所处理的PPI图像是二值的，所以处理后每个像素的值即为其所处理的区域标号(1，2，3，…)，采用8连通判别算法，标识所有不连通的目标区域. 在区域标记的基础上，通过对雷达图像中各种不同标号的像素区域进行操作，统计出所有目标区域的像素数 n 和中心坐标 (x_0, y_0). PPI图像中心定义为坐标原点，x 轴水平向右，y 轴垂直向上. 中心坐标由下式得到：

$$x_0 = C\sum_{(x,y)\in S} x/n \quad y_0 = C\sum_{(x,y)\in S} y/n \tag{1}$$

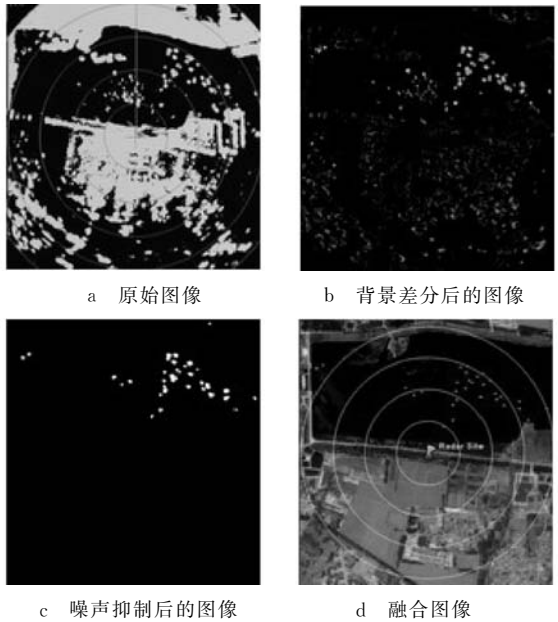
其中，S 为单一目标连通区域；C 为量程系数，反映了选择不同量程时每个像素代表的实际距离. 最后，将飞鸟目标标定在卫星地图或垂直坐标系中，输出的融合图像便于工作人员观测.

4 实验数据处理与分析

2007年秋季(候鸟迁徙高峰期)，基于“雷达探鸟实验系统”于北京市沙河水库在水平和垂直2种扫描方式下采集了大量探鸟雷达图像. 下面基于其中2组图像序列，采用第3部分的算法作处理分析.

1) 水平扫描雷达图像处理

图5描述了一帧水平扫描雷达图像处理的全过程. 图5a为某原始探鸟雷达图像序列中的一帧，鸟群自西向东掠过水面，本系统置于水库北岸，量程0.5海里，共采集24帧连续原始图像. 原始图像中除含有飞鸟目标外，含有树木、建筑物等背景信息. 基于24帧原始图像序列，用PCA方法提取出背景图像. 图5b为经过背景差分的探鸟雷达图像，绝大部分背景已被去除，但还存在大量边缘杂波和噪声. 图5c为经过噪声抑制的处理结果，图像中保留的高亮区域都认为是飞鸟目标. 噪声抑制中的形态学处理采用先腐蚀后膨胀的方法，这样既消除了大量孤立的像素点，降低了虚警率，又使每个飞鸟目标的像素数保持基本不变. 由于飞鸟目标的形状无特定规律，采用全方位结构



a 原始图像 b 背景差分后的图像

c 噪声抑制后的图像 d 融合图像

图5 水平扫描探鸟雷达图像处理

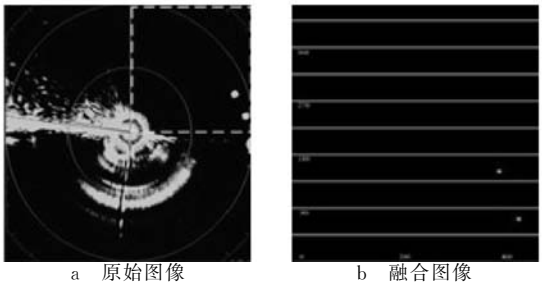
元素.针对图 5c 进行目标信息提取并记录,共标识飞鸟目标 31 个,具体信息见表 1.量程系数 C 取 3.86 m.图 5d 为含鸟情信息的融合图像,飞鸟目标以圆点标定在高清晰卫星地图上,直观地反映了某一时刻沙河水库上空的飞鸟分布情况.

表 1　飞鸟目标信息

目标序号	x_0/m	y_0/m	n	目标序号	x_0/m	y_0/m	n
1	547.9	895.1	17	17	−38.6	474.6	39
2	−767.8	671.4	31	18	490.0	463.0	45
3	246.9	655.9	97	19	532.5	439.9	91
4	297.1	663.6	61	20	−96.5	451.4	17
5	−810.3	648.2	32	21	219.9	416.7	93
6	285.5	617.3	59	22	389.7	436.0	47
7	401.3	605.8	77	23	501.6	420.6	38
8	366.5	586.5	22	24	667.5	405.1	70
9	308.7	559.5	25	25	555.6	374.3	77
10	455.3	559.5	13	26	189.1	378.1	25
11	219.9	544.0	27	27	667.5	351.1	64
12	328.0	544.0	19	28	868.1	351.1	30
13	405.1	528.6	55	29	189.1	266.2	45
14	−158.2	505.4	45	30	733.1	266.2	17
15	281.7	501.6	150	31	123.5	219.9	31
16	212.2	478.4	33				

2) 垂直扫描雷达图像处理

图 6a 是一帧垂直扫描方式下采集的原始探鸟雷达图像,量程 0.25 海里,量程系数 C 取 1.93 m.机场应用中,垂直扫描雷达往往置于跑道的一端,需要监控的跑道上空区域对应于雷达图像的第一象限.同样,本系统放置于水库北岸,关注区域为水面上空雷达波束覆盖的一段剖面,图 6a 中虚框部分值得关注,只有当飞鸟穿过该波束或沿波束径向活动时,才会在雷达显示器上产生回波信号.由于垂直扫描探测的是空域,因此杂波信号很少,较之水平扫描图像信息提取相对容易,其具体处理过程这里不再冗述.如图 6b 所示,在高度坐标系中以圆点标定飞鸟目标的坐标位置.共发现 2 个飞鸟目标,其中目标 1 距雷达 393.6 m,飞行高度 154.3 m,像素数 134 个;目标 2 距雷达 434.1 m,飞行高度 71.4 m,像素数 127 个.



a　原始图像　　b　融合图像

图 6　垂直扫描探鸟雷达图像处理

5　结　论

"雷达探鸟系统"的性能主要取决于两方面.一方面是雷达天线系统的信息获取能力,典型的 Accipiter 雷达探鸟系统采用抛物面天线,其波束很窄,足以获得目标的三维信息,但扫描范围有限,效率较低;本实验系统采用双部雷达分别进行水平和垂直扫描,均配备 T 型波导缝隙天线,其波束较宽,扫描效率高,由于二者相互独立,只能获得 2.5 维信息.为克服现有系统的缺点,拟研制一种双波束天线雷达,该雷达采用"单发双收"机制,发射圆极化波,水平和垂直同时接收,解决了同频干扰问题,能够获取飞鸟的三维信息,信息量更大且效率更高.另一方面是基于雷达图像的飞鸟目标提取算法,典型的 Accipiter 雷达探鸟系统采用了基于多假设跟踪和互相关多模型的多目标跟踪方法,使系统实现高"识别率"的同时保持低"虚警率";本实验系统的飞鸟目标提取算法尚不具备目标跟踪功能,因此基于数据关联的多目标跟踪算法成为本系统今后的又一研究重点.

参考文献(References)

[1] 宁焕生,刘文明,李敬,等.航空鸟击雷达鸟情探测研究[J].电子学报,2006,34(12):2233−2237
Ning Huansheng, Liu Wenming, Li Jing, et al. Research on radar avian detection for aviation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2232−2237(in Chinese)

[2] Sidney A, Gauthreaux Jr, Carroll G Belser. Radar ornithology and the conservation of migratory birds[R]. PSW-GTR-191, 2005

[3] Nohara T J, Weber P, Unkrainec A, et al. An overview of avian radar developments-past, Present and Future[C]// Bird Strike 2007 Conference. Kingston, Ontario, Canada: Bird Strike Committee Canda,2007: 10−13

[4] Nohara T J, Weber P, Premji A, et al. Affordable avian radar surveillance systerms for natural resource management and BASH applications[C]// IEEE Radar Conference. Arlington, Virginia:IEEE, 2005, 9−12

[5] DeTect, Inc. Avian radar systems[EB/OL]. Florida, USA, 2007. http://www.DeTect-Inc.com

[6] Lindsay I Smith. A tutorial on principal components analysis [EB/OL]. New Zealand: University of Otago, 2002. http://www.cs.otago.ac.nz

[7] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L eddins. Digital image processing using MATLAB[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2004

[8] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计[M].第 2 版.北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社, 2005: 163−167
Yang Shuying. Program design of image processing with VC++[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2005: 163−167(in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)