



扫描昆虫雷达 与昆虫迁飞 监测

程登发 封洪强 吴孔明 编著



科学出版社

www.sciencep.com

扫描昆虫雷达 与昆虫迁飞监测

程登发 封洪强 吴孔明 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了目前国际上的昆虫雷达,重点介绍了中国的扫描昆虫雷达和在国际上首次研制成功的计算机自动数据采集、分析系统,以及如何利用扫描昆虫雷达开展迁飞昆虫的监测。还对利用昆虫雷达对甜菜夜蛾、草地螟和棉铃虫的观测研究结果进行了详细的分析。

本书可供植物保护科技工作者、农业大专院校师生和各级推广部门的农业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测/程登发,封洪强,吴孔明编著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015648-X

I. 扫… II. ①程…②封…③吴… III. 雷达-应用-昆虫-迁飞-监测 IV. Q96-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 058641 号

责任编辑:王静 李悦 王日臣 沈晓晶/责任校对:陈丽珠
责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年12月第一版 开本: B5(720×1000)

2005年12月第一次印刷 印张: 14 1/4 插页: 2

印数: 1—1 500 字数: 272 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<新欣>)

序

昆虫是目前世界上除鸟和蝙蝠外也能在空中飞行的动物，它的起源远早于鸟、蝙蝠乃至已不复存在的能飞行的翼龙。强大的飞行能力使昆虫能远距离地开发利用暂时有利的生境来繁衍后代，这是昆虫能在地球上长期昌盛不衰的重要原因之一。在自然界中昆虫的迁飞现象十分普遍，这是昆虫的一种重要行为，迁飞性害虫往往在异地暴发，难于测报，常给农业生产带来重大损失。20世纪50年代以来，国内外对一些有重要经济意义的迁飞性害虫，如沙漠蝗、蚜虫、黏虫、秋黏虫、非洲黏虫、叶蝉类、褐飞虱和白背飞虱、稻纵卷叶螟等进行了研究，取得了很大进展，大大促进了农、林、医等方面迁飞昆虫的研究。在研究手段上，除采用传统的飞行磨、卵巢解剖、网捕及标记释放回收等方法外，从1968年起开始采用昆虫雷达。昆虫雷达的使用使我们对昆虫迁飞的规律及昆虫飞行行为有了较为详细的了解。发展到今天，昆虫雷达已成为昆虫学研究中一个不可或缺的重要研究工具，并形成了一门新的分支学科——应用昆虫雷达研究昆虫飞行行为的雷达昆虫学。

我国昆虫学家近年来在国家科技攻关、自然科学基金、“973”项目、国家公益性研究专项资金等的资助下，与国际合作开展了昆虫雷达在迁飞性昆虫监测方面的应用研究，取得了可观的研究成果。

《扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测》一书回顾了该学科的发展历史，汇集了我国最近几年来独立开展雷达昆虫学研究的最新成果和精华，并且提供了大量珍贵技术资料，是我国雷达昆虫学的奠基之作。相信该书的出版将激发更多年青科学家和青年学生对雷达昆虫学研究的兴趣和热情，使我国在这个领域的研究更加深入。该书的出版对科研、教学、生产及管理部门均具有重要的参考价值，同时对迁飞性昆虫的监测预警与治理也具有重要的理论和实际意义。

郭予元

中国工程院院士

中国农业科学院植物保护研究所研究员

2005年8月10日

前 言

雷达最初的设计目的是在战争中及时监测到入侵的敌机。战争结束后,大量雷达转成民用,在气象等行业中发挥着重要作用。第二次世界大战后,在雷达用于鸟类迁徙研究获得成功的鼓舞下,昆虫学家开始探索将雷达用于观测昆虫的迁飞行为。在英国皇家学会资深昆虫学家 R.C.Rainy 的建议下,由具有雷达观测经验的鸟类学家 G.W.Schaefer 帮助建造了用于昆虫迁飞研究的昆虫雷达系统。J.R.Riley 博士从剑桥大学毕业后,进入这一新建立的昆虫雷达研究课题组,此后他领导着由昆虫学家、物理学家、气象学家等组成的昆虫雷达观测组完成了大量的研究工作,开创了雷达昆虫学。20 世纪 80 年代,美国的 W.W.Wolf 和澳大利亚的 V.A.Drake 博士等也加入到这一研究领域。1984 年在英国专家的建议和 V.A.Drake 博士在技术上的大力支持下,由吉林省农业科学院植物保护研究所陈瑞鹿先生在公主岭组建了我国第一部扫描昆虫雷达,对草地螟和黏虫的迁飞行为进行了研究。1988 年南京农业大学张孝羲、程遵年等与英国自然资源研究所合作,利用英国的毫米波雷达对稻纵卷叶螟和稻飞虱等昆虫的迁飞行为进行了研究。

1997 年,在中国农业科学院植物保护研究所研究员、中国工程院院士郭予元先生的建议下,时任植物病虫害生物学国家重点实验室副主任吴孔明博士在该重点实验室资助下,建立了我国第二部扫描昆虫雷达。该扫描昆虫雷达系统承袭了公主岭昆虫雷达的设计,也由无锡海星雷达有限公司建造,但该雷达数据显示处理方面部分实现了数字化。

扫描昆虫雷达在迁飞昆虫监测研究中一直存在着雷达回波数据基本上采用人工分析,其数据处理费时费力这一国际难题。擅长计算机在植物保护领域的应用和掌握无线电技术的程登发博士,勇于开拓创新,将先进的计算机图像采集处理技术引入到昆虫雷达回波观测数据的处理和分析中来,设计了一套数据采集与分析系统,实现了扫描昆虫雷达观测数据采集与分析的数字化与自动化,大大提高了扫描雷达观测数据的分析处理能力,使扫描昆虫雷达能真正实现实时监测和及时预警。这一工作发表在 ELSEVIER 出版的 *Computers and Electronics in Agriculture* 杂志上,得到了国际雷达昆虫学权威 Drake 博士的高度评价和赞扬,并亲临当时安置该昆虫雷达的中国农业科学院廊坊实验基地观测场视察。

多年来,封洪强、徐广等组成的一支年轻的研究队伍在吴孔明博士带领下和程登发博士的支持下,分别在河北廊坊、山东北隍城岛开展了大量的迁飞昆虫雷达观测研究活动。其间得到了北京气象局观象台和北京大学物理系的技术支持,

派物理学家和气象学家对如何进行低空探测进行了培训。通过昆虫雷达观测、对雷达观测场上空的风温场探测、姊妹灯诱虫、卵巢解剖等研究,使我们对我国几种主要迁飞昆虫的迁飞行为及其与风温场的关系有了较为深入的了解。这些工作由封洪强博士整理发表了5篇论文,分别刊登在 *Bulletin of Entomological Research*, *Environmental Entomology*, *Journal of Economic Entomology* 和 *Journal of Insect Behavior* 上,得到了国际上雷达昆虫学家的认可。

在进行雷达观测的过程中,中国农业科学院植物保护研究所的昆虫学家们还发展了探照灯诱虫器和地面灯诱虫器联用的方法,来判断某种昆虫是否具有迁飞习性以及迁飞昆虫的种群是否处于迁飞时期。通过对昆虫雷达观测和诱虫结果相验证,明确了我国华北地区的主要迁飞昆虫种类,并对其迁飞时期有了初步了解。

以上研究工作先后得到了国家自然科学基金项目“昆虫雷达数据采集、分析系统”(39970417)、国家重点基础研究发展规划(973项目)的“害虫迁飞与滞育的生理生态机制”课题(G200016206)、国家科技攻关计划的“农作物重大病虫害监测预警技术研究”课题(2001BA509B01、2004BA509B01)、国家社会公益性研究专项资金项目“农作物重大生物灾害监测预警系统研究”(2001DIA10012、2002DIA50029)、“重大生物灾害的发生规律、监测、预报与防治”(2003DIA6N004)、“种植结构调整期病虫害灾变趋势及减灾对策研究”(2004DIB4J155)等多项国家级科研项目的大力支持,没有这些基金的资助,研究工作是无法开展的。

关于雷达昆虫学的发展历史、昆虫雷达的原理及世界上从事该领域研究的实验室和科学家在本书第1章进行了详细介绍。第2、3、4、5章详细重点介绍了该昆虫雷达数据采集与分析系统,以及使用该系统进行昆虫迁飞监测的实例分析,并提供了大量数据采集与分析处理源程序,以供对此感兴趣的读者参考。第6、7、8三章,分别详细介绍了甜菜夜蛾、草地螟和棉铃虫的迁飞行为,并根据在廊坊基地监测到的迁飞行为描绘了这几种害虫在我国北方的迁飞路线。第9章详细介绍了我国华北地区的昆虫群落。

该项研究和该书的出版得到了中国农业科学院植物保护研究所和植物病虫害生物学国家重点实验室的大力支持。

作者在研究和论文写作工作中得到了一直活跃在昆虫雷达学领域的 J. R. Riley 博士、V. A. Drake 博士和 D. R. Reynolds 博士等的热心支持和无私帮助。中国农业大学昆虫系的沈佐锐教授,南京农业大学植保系的翟保平博士,中国农业科学院植物保护研究所的徐广、张永军、梁革梅博士、倪汉祥、曹雅忠研究员、文丽萍副研究员、孙京瑞高级实验师、田喆助理研究员和博士研究生乔洪波、硕士研究生张云慧等同志也给予了大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

本书较系统地总结了最近几年来在雷达昆虫学研究中取得的一些进展,

由于收集的资料有限，加之作者的水平和经验有限，难免存在许多不足之处。希望通过抛砖引玉，得到相关专家和同行的批评指正！同时也希望更多的昆虫学家、青年学生、政府官员以及对此感兴趣的其他专业的研究人员和开发人员能够了解、支持和加入到这项研究中来，为提高我国农业有害生物监测预警能力、实现有效治理做出贡献！

编 者

2005年8月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 昆虫雷达与雷达昆虫学	1
1.1 昆虫雷达及其发展	1
1.1.1 雷达及其工作原理	1
1.1.2 昆虫雷达	2
1.1.3 昆虫雷达的类型	3
1.1.4 主要实验室及其所拥有的昆虫雷达	4
1.1.5 雷达昆虫学的发展	12
1.2 植物病虫害生物学国家重点实验室的扫描昆虫雷达	15
1.2.1 雷达天线及旋转单元	15
1.2.2 微波发射接收单元	16
1.2.3 信号处理显示单元	17
1.2.4 数据采集分析系统	18
1.3 昆虫雷达国内外应用情况简介	18
第 2 章 昆虫雷达回波信号及 KC2 昆虫雷达数据采集	21
2.1 昆虫雷达回波信号类型	21
2.2 KC2 昆虫雷达数据采集接口及数据采集卡	24
2.3 KC2 昆虫雷达回波图像及数据采集软件	26
2.3.1 KC2 昆虫雷达回波图像	26
2.3.2 图像的函数表示及数据采集原理	26
2.3.3 计算机的图像文件类型及颜色表示	27
2.3.4 调色板和位图数据结构及设置	28
2.3.5 KC2 昆虫雷达图像数据的采集	32
2.3.6 采集图像数据的存盘与读取	41
第 3 章 KC2 昆虫雷达回波图像数据的处理与分析	45
3.1 KC2 昆虫雷达回波图像数据的处理	45
3.1.1 文件的存取	46
3.1.2 图像叠加	51
3.1.3 图像整形	52
3.1.4 参数识别	56
3.2 KC2 昆虫雷达回波点的分析	56
3.2.1 昆虫飞行的高度、方位和昆虫密度的计算	57

3.2.2	昆虫目标的移动方向与速率的分析	62
3.2.3	数据文件的存盘	62
第4章	昆虫雷达观测仰角的确定和目标的识别	67
4.1	KC2 昆虫雷达观测仰角的确定	67
4.1.1	经典的昆虫雷达观测仰角的选取	67
4.1.2	KC2 昆虫雷达仰角的设计	68
4.2	昆虫雷达目标的识别	69
4.2.1	由云和雨产生的回波信号	69
4.2.2	雷达安放场地及树木和建筑物产生的干扰回波信号	71
4.2.3	昆虫与鸟	71
4.2.4	判断昆虫的种类	73
第5章	KC2 昆虫雷达回波数据的实例分析	75
5.1	昆虫在晚间的活动情况	75
5.2	昆虫在年度间的活动情况	85
5.3	昆虫移动速度	86
5.4	不同距离档观测效果比较	87
5.5	在 1.5 n mile 距离档下各距离环间的回波数和估计密度的分布	92
第6章	甜菜夜蛾的迁飞行为	95
6.1	昆虫迁飞行为参数的定义及分析方法	95
6.1.1	昆虫的空中密度与面积密度	95
6.1.2	昆虫的空中速度与对地速度	97
6.1.3	共同定向及分析方法	97
6.2	2001 年秋季迁飞	99
6.2.1	飞行活动与气温的关系	102
6.2.2	雷达目标的确认	102
6.2.3	昆虫密度的垂直分布	103
6.2.4	夜间不同时刻昆虫密度的变化	105
6.2.5	遇雨降落	106
6.2.6	定向与位移	107
6.3	2002 年秋季迁飞	108
6.3.1	不同时刻昆虫密度的变化	112
6.3.2	成层与风温场的关系	113
6.3.3	甜菜夜蛾的定向和位移	116
6.4	讨论	118
第7章	草地螟迁飞的雷达监测	120
7.1	迁飞时期	120
7.2	雷达目标的鉴定	123
7.3	草地螟的春季迁飞	124

7.4 夏季扩散	128
7.5 秋季回迁	132
7.6 讨论	133
7.6.1 姊妹灯诱虫法	133
7.6.2 共同定向与定向偏好	134
7.6.3 成层的影响因素	134
7.6.4 草地螟的迁飞系统	135
第8章 对棉铃虫迁飞行为的新认识	137
8.1 一代棉铃虫的迁飞行为	138
8.1.1 面积密度的变化及起飞	138
8.1.2 飞行高度与成层	139
8.1.3 共同定向	141
8.1.4 迁移方向	143
8.1.5 遇雨降落	146
8.2 二代棉铃虫的迁飞	146
8.2.1 昆虫密度的日变化及降雨的影响	147
8.2.2 迁飞高度和成层	148
8.2.3 J形风及其对棉铃虫迁飞的影响	151
8.2.4 昆虫的定向和位移	152
8.3 秋季迁飞	154
8.3.1 面积密度的变化	157
8.3.2 成层及其与风温场的关系	157
8.3.3 定向与位移	160
8.4 讨论	161
8.4.1 棉铃虫的迁飞行为	161
8.4.2 棉铃虫在空中的聚集与风温场的关系	162
8.4.3 一代棉铃虫迁飞轨迹	162
8.4.4 二代棉铃虫迁飞轨迹	164
8.4.5 秋季棉铃虫的回迁	165
8.4.6 风与我国北方棉铃虫的再分布	165
第9章 华北空中昆虫群落	168
9.1 廊坊空中昆虫群落及华北主要迁飞昆虫种类	169
9.2 渤海海上昆虫群落及动态	180
9.2.1 海上主要昆虫种群的数量变化	186
9.2.2 海上主要迁飞昆虫种类	190
9.2.3 5种主要迁飞昆虫的卵巢发育及性比变化	192
9.3 玉米螟的种群数量动态及迁飞性	196
9.4 秋季迁飞的能量和迁飞的有效性	198

主要参考文献	199
附录 1 昆虫雷达回波数据分析软件输出结果	206
附录 2 缩写	215
后记	216

第 1 章 昆虫雷达与雷达昆虫学

1.1 昆虫雷达及其发展

1.1.1 雷达及其工作原理

雷达 (radar) 是无线电检测和测距 (radio detection and ranging) 的缩写。雷达工作在电磁光谱的微波波段 (40 000~300 MHz), 后者刚好延伸至无线电广播高频段的末端。通常根据使用的频率和相应的波长分为几个波段: K- α 波段, 40 000~26 000 MHz (0.8~1.1 cm); K 波段, 26 500~18 500 MHz (1.1~1.7 cm); X 波段, 12 500~8000 MHz (2.4~3.8 cm); C 波段, 8000~4000 MHz (3.8~7.5 cm); L 波段, 2000~1000 MHz (15.0~30.0 cm) 和 P 波段, 1000~300 MHz (30.0~100.0 cm)。雷达不像其他探测器那样被动地检测由太阳或其他热源发射的辐射, 而是发射自己的光线——微波 (因而是主动探测, 如同照相机的闪光灯), 以能量暴发或脉冲的方式直接射向目标, 然后检测返回的部分能量。因此, 雷达系统是一个测距装置, 通过测量一束有方向的脉冲信号 (其强度以分贝表示) 散布在特定距离上的往返传送时间来测量距离。雷达以这种方式建立从 (固定或移动的) 雷达到分散的目标之间的方向定位和相隔的距离。由于雷达自己发射微波信号, 因此其使用不受白天或黑夜的影响。

一台典型的雷达工作过程如下: 脉冲发生器释放定时的微波和 (或) 无线电能量到发射机, 通过天线收发转换开关到定向天线, 以定形和聚焦每个脉冲成为发射到目标的波束; 然后返回的脉冲被同一天线所检测并送到转换 (放大) 该信号为视频信号的接收器, 传送到记录装置供以后处理或在阴极射线管 (CRT) 上产生一个实时的模拟显示或产生一个运动的光点在胶片上记录。每个脉冲仅持续几微秒 [典型的每秒大约有 1500 个脉冲 (能量暴发)]; 脉冲的长度 (与波段宽度一起决定系统分辨率) 为在脉冲发生持续时间内所传送的距离。天线收发转换开关用于隔离发射和接收的脉冲, 以消除它们之间的相互干扰, 它在发射时打开发射通道并关闭接收通道, 在接收时则相反。

单个脉冲的宽度 (持续时间) 决定了在一个给定的倾斜范围的两种类型的分辨率。对于一个特定的脉冲宽度的距离分辨率 (沿发射方向能够被检测为两个分离且清晰的反射点之间的最小距离) 越向外越低。同时, 分辨率随着仰角的增加而增加 (最高、更近)。计算距离分辨率的公式为:

$$R_r = tc/2\cos\beta$$

式中, R_r 为距离分辨率 (cm), t 为脉冲长度 (μs), c 为光速 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$), β 为仰角 ($^\circ$)。另一个为方位角分辨率, 决定在任意特定倾斜范围的点以表示一个物体在扫描路径方向上能被分辨的最小体积, 它同样随仰角变化 (向外的倾斜距离)。其计算公式为:

$$R_a = 0.7S\delta/D$$

式中, R_a 为方位角分辨率 (cm), S 为倾斜距离 (km), δ 为系统波长 (cm), D 为天线的有效长度 (cm)。

1.1.2 昆虫雷达

昆虫雷达是经过专门改进或设计的一种雷达, 对昆虫在空中的迁飞或扩散行为进行观测和研究。其工作原理是: 昆虫身体具有与雨滴相似的性质, 可以对雷达发射的电磁波进行重新定向 (反射雷达波)。当一束狭仄的雷达波射向空中迁飞的昆虫, 昆虫身体会引起雷达波向四周反射, 反射的能量就好像是从昆虫发射出来的一样, 部分雷达波会返回到雷达所在的方向, 如果返回的雷达波能量足够大, 就可以被雷达接收器所接收, 从而在显示器上产生一个雷达回波信号。利用雷达的定向和测距性质, 可以计算出昆虫迁飞的方位、高度、移动方向和昆虫在一定体积内的密度等。昆虫的大小、形状、身体组织的类型、体液等均可影响反射能量的大小。同时, 反射能量的大小也受昆虫在雷达波束中的定向、位置、与雷达的距离、雷达频率和雷达发射的能量大小等因素的影响。

当昆虫个体的大小增加, 反射回来的雷达能量也增加, 则昆虫能在较远范围内被检测到。对于中等个体的单个蛾类昆虫, 用一台简单的昆虫雷达, 可以在 2 km 内检测到。当昆虫聚集的密度增加, 会反射回更多的能量, 有时可以在几十公里范围内被检测到。

昆虫并不是唯一能被昆虫雷达所检测的目标。其他生物目标如蝙蝠和鸟类, 非生物目标如飞机、雨滴和其他被狂风以及上升气流带至空中的物体均可被昆虫雷达所检测。在利用昆虫雷达进行昆虫迁飞研究和监测时必须鉴别不同类型目标的特征, 以免受到其他目标的干扰。

人造建筑、农作物、树、周围的地面和岩石都可能影响其附近昆虫的检测, 从这些物体来的干扰波被称为地面杂波 (地波)。当昆虫靠近这些物体时, 由于从昆虫反射的回波和从这些物体反射的回波混淆在一起则产生相互干扰, 而使昆虫无法被鉴别。性能好的雷达可以减少地波的影响, 如根据多普勒效应研制成的新型多普勒雷达, 由于雷达波在从运动的物体 (昆虫) 反射回来时会造成频率 (波长) 的改变, 这种雷达在昆虫迁飞监测中具有极高的应用价值。一些特殊的雷达甚至可以检测到一个建筑物内只有 10 mg 大小的昆虫 (Wolf et al. 1993)。

昆虫雷达一般利用商用航海雷达的接收器和发射器。它们工作在 X 波段

(3.2 cm)。由于航海市场的竞争和大批量生产而导致其价格低廉并且产品的性能稳定可靠。对其进行用于昆虫学的改造涉及到替换成抛物线的天线、不同的波形极化和特定的数据采集系统。

目前廉价的雷达不可能提供所有需要的昆虫学的测试，而建造一台特定的雷达又会失去其通用性。昆虫雷达可以被设计成用于测量目标的坐标（与雷达位置的方向、距离、高度）、目标的位移、速度（方向和速率），目标的密度（每立方米昆虫的数量），目标的定向（随机或非随机），平均飞行高度，飞行的起始和结束时间，昆虫的航向和气流速度，振翅频率目标的类型等。

1.1.1.3 昆虫雷达的类型

随着昆虫雷达技术的发展，在 30 多年的时间中，经历了从利用军用、船用雷达进行观测研究，发展到制作和改制专用的昆虫雷达。

昆虫雷达根据其工作方式可分为扫描雷达、垂直监测雷达、跟踪雷达，根据装载方式可分为车载雷达、（飞）机载雷达、船载雷达和地面固定雷达，根据波长可分为毫米波和厘米波雷达，根据调制方式可分为脉冲波雷达和调频连续波雷达等类型。

1.1.1.3.1 扫描雷达

扫描雷达（scanning radar）的天线为抛物面天线，可以以不同仰角作 360° 旋转，监视空中昆虫的迁飞情况。其显示器为平面位置指示器（plan position indicator, PPI），与气象雷达的屏幕相似，可以显示昆虫目标的方向、距离和高度等。一些昆虫学家和雷达专家还对此类雷达的天线进行了控制方面的改进，使其能朝任一方向作上下摆动，对同一方向不同高度作扇形的扫描，从而获得昆虫的“迁飞层”。其相应的扫描图像为距离-高度扫描图像，显示方式为距-高显示（range height indicator, RHI）。当昆虫密度较低时，一个重约 200 mg 的蛾类昆虫可以在距扫描雷达 2 km 左右的地方被检测到，高密度的昆虫曾经在距雷达 10 km 的地方被检测到。

1.1.1.3.2 垂直雷达

垂直监测雷达（vertical looking radar）的一个固定的天线将雷达波束指向空中的垂直方向，当昆虫通过该波束时，迁飞昆虫之间的距离和高度与相应的时间被显示在雷达屏幕上。该类雷达无法估计昆虫在空中某一范围的密度分布。

1.1.1.3.3 跟踪雷达

示波器显示雷达到昆虫的距离和从昆虫反射回来的雷达信号的振幅，当一个

(群)昆虫进入雷达波束,昆虫与雷达的方向、距离和高度被显示和记录,这些数据经过计算后控制其天线跟踪目标来连续追踪该昆虫,以便记录和分析昆虫的运行轨迹和各种飞行参数。

1.1.3.4 机载雷达和船载雷达

为了方便在不同地点开展研究,一般昆虫雷达多采用车载式。但为了适应特殊地理位置上监测和研究的需要,将雷达安装在飞机和轮船上。机载雷达(airborne radar)的天线安装在飞机上,并使雷达波束朝向地面,以监测在飞机下方迁飞的昆虫。船载雷达(ship-borne radar)的天线直立向上,用于监测洋面上的迁飞昆虫。

1.1.3.5 调频连续波雷达

一般雷达均是发射脉冲波,而调频连续波雷达(frequency-modulated continuous wave radar, FMCWR)发射经调制的连续波。由于该雷达具有非常高的灵敏度,它可以在迁飞昆虫密度非常高的情况下分辨单个昆虫。

1.1.3.6 毫米波雷达

目前大多数昆虫雷达均利用航海雷达进行改制,它们工作于X波段(3.2 cm),适用于1 cm以上的蛾类昆虫的监测,而对于稻飞虱和蚜虫类则不适用。近年来发展起来的毫米波雷达(millimetric radar)(一般工作在8 mm波长左右),为微小型昆虫的迁飞观测提供了有力的观测手段。

1.1.4 主要实验室及其所拥有的昆虫雷达

世界上使用的昆虫雷达主要分布在美国、英国、澳大利亚等发达国家,我国近年来也逐步开始发展。

1.1.4.1 美国农业部农业研究局的区域性害虫治理研究实验室

美国农业部农业研究局的APMRU(Areawide Pest Management Research Unit)是目前世界上拥有昆虫雷达最多的实验室,也是目前开展雷达昆虫学研究的主要单位。它具备有扫描雷达、垂直监测雷达、船载雷达和机载雷达等系列,并可利用美国军方的调频连续波雷达开展昆虫迁飞研究。该单位位于美国得克萨斯州的大学城(college station, Texas)。主要从事雷达研究的专家包括Ken Beerwinkle、Paul Schleider、Wayne Wolf和John Westbrook。

(1)扫描雷达:该单位拥有两台扫描雷达,一台为模拟显示(见图1.1),于1986年由Ken Beerwinkle博士和Paul Schleider组装;另一台(见图1.2)可获

得2字节（无信号、信号弱、信号强）信号，由 Wayne Wolf 于 1978 年组装。主要参数见表 1.1。



图 1.1 美国农业部的扫描昆虫雷达

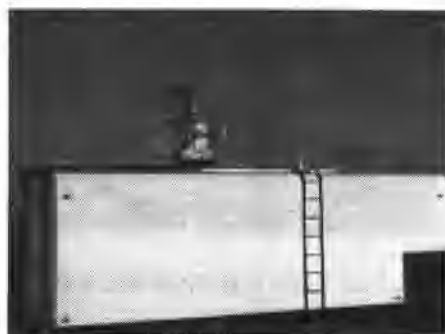


图 1.2 美国农业部的扫描昆虫雷达

表 1.1 美国农业部的扫描昆虫雷达参数

参数名称	数据
波长/cm	3.2
峰值输出功率/kw	25
脉冲长度/ μ s	0.05、0.25、1.0
天线直径/m	1.22
天线类型	抛物线天线
波束极化	水平极化
水平扫描速率/ (r/min)	20~60
仰角扫描范围	0~90°
接收器	对数接收器
灵敏度	2.0 km 处截面 1.0 cm

(2) 追踪雷达（见图 1.3）：Wayne Wolf 利用军用的剩余雷达组装，用于跟踪气象用的探空气球，1994 年由 Paul Schleider 改进用于跟踪昆虫（表 1.2）。

(3) 机载雷达（见图 1.4 和表 1.3）：雷达处理器由 Cranfield 技术学院的 Stephan Hobbs 博士组装。

(4) 船载雷达（见图 1.5）：将雷达固定在远洋轮船上，监测海洋上空的迁飞昆虫活动情况。

(5) 垂直监测雷达（见图 1.6）：由 Ken Beerwinkle 博士于 1989 年组装。具体参数见表 1.4。

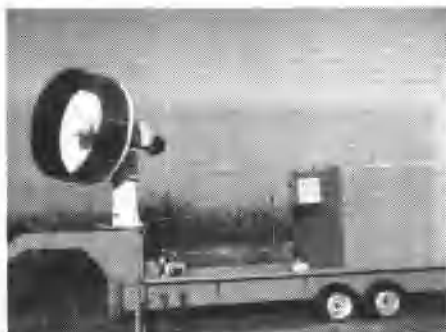


图 1.3 美国农业部的追踪昆虫雷达

表 1.2 美国农业部的追踪昆虫雷达参数

参数名称	数据
波长/cm	3.2
峰值输出功率/kW	60
脉冲长度/ μ s	0.25、1.0
天线直径/m	1.83
天线类型	抛物线天线
波束极化	垂直极化
接收器	线性接收器
灵敏度	2.0 km 处截面 1.0 cm



图 1.4 美国农业部的机载昆虫雷达

表 1.3 美国农业部的机载昆虫雷达参数

参数名称	数据
波长/cm	3.2
峰值输出功率/kW	25
脉冲长度/ μ s	0.05
天线直径/m	0.61
天线类型	抛物线天线
波束极化	以 10 Hz 旋转
接收器	对数接收器
灵敏度	1.0 km 处截面 1.0 cm



图 1.5 美国农业部的船载昆虫雷达