第 5 卷 第 3 期
2001 年 5 月
遥 感 学 报
JOURNAL OF REMOTE SENSING
Vol. 5, No. 3
May, 2001

文章编号：1007-4619 (2001) 03-0231-10

昆虫雷达：从研究型到实用型

翟保平
(南京农业大学 昆虫学系，农业部病虫监测与治理重点实验室，南京 210095)

摘 要： ZLC 制式的问世使雷达昆虫学的发展方向出现重大转折：往常对昆虫迁出活动的短期、集中的观测研究将被对迁入事件的长期监测所取代，全自动运行、雷达信号的即时分析与处理使得迁飞性害虫的灾变预警可望实现。简要述评了 ZLC 制式雷达的特性及其在中国的应用前景。

关键词： 昆虫迁飞；长期监测；垂直波束雷达

中图分类号： TP79 **文献标识码**： A

迁移是生物对栖息环境和资源配置的季节性变化所表现出的适应性行为。害虫的远距离迁飞则往往导致其在农林牧区的突发成灾，对农林牧业生产造成严重威胁。如非洲的沙漠蝗、澳大利亚疫蝗和中国的东亚飞蝗，都是臭名昭著的具有大区域暴发性和毁灭性的迁飞性害虫。中国地处东亚季风区，特殊的地理气候条件使中国农作物的主要大害虫都是南北往返迁飞数千公里，屡屡“小虫成大灾”。如 20 世纪 80 年代以来，稻飞虱就有十几年大发生，尤其是 1991 年全国稻飞虱特大暴发，其损失之惨烈令人触目惊心。1997 年稻飞虱在长江流域再度暴发，造成 500 多万亩水稻冒穿。由于迁飞性害虫在行为上的特殊性(飞行高度远在人的目力之外)，如果没有专门的设备就无法对其迁飞过程进行直接监测，更不可能做出定量分析；而迁飞性害虫的突发性给预测预报带来了很大的难度，在防治决策上往往处于被动地位，每每造成惨重损失。昆虫雷达的出现为监测昆虫的迁飞过程提供了一种无可替代的强有力的工具[1]。

昆虫的迁飞过程一直是过去迁飞研究中的“黑箱”。30 年来，英、澳、美、中的雷达昆虫学家利用各种类型的昆虫雷达在许多地区开展了多次不同规模的观测研究(表 1)，揭示了昆虫在迁飞过程中的各种行为特征及其与大气结构和运动的关系，而这些正是用其它研究手段所无法得到的。就像人们通过显微镜认识了微观世界一样，昆虫雷达的应用为我们认识昆虫迁飞的行为机制提供了许多令人耳目一新的画面[9,76-79]。

目前应用于昆虫迁飞研究的雷达有多种[78]，但大都有一个致命缺陷，即其操作和观测资料的处理都非常费时费力且耗资巨大，故只能用于特定世代迁出期的短期观测而无法应用于长期监测。因此，迄今为止的观测资料基本上都是对迁出种群的描述而极少对迁飞季节里迁入种群数量时空动态的长期监测，但生产上所注重的恰恰是迁入种群而非迁出种群的动态，这也正是雷达昆虫学长期滞留在研究层面上而成为“高处不胜寒”的名门闺秀的根本原因。

据此，可将昆虫雷达分成两类：研究型雷达(如扫描雷达、机载雷达、谐波雷达、跟踪雷达等)，和实用型雷达(VLR 或 IMR)[80]。前者提供的信息可深化人们对迁飞现象的认识和理解，而后者所得的信息则可直接用于虫情动态的预测和防治决策。对实用型雷达的期盼由来已久，其采用 ZLC(Zenith-pointing Linearly-polarised Conical-scan)制式实现这一目标的设想早在 20 世纪 70 年代末就已出现，但直到 90 年代才达到实用程度。下面就实用型雷达的特性和在中国的应用前景做一简要述评。

收稿日期：2000-03-30；**修订日期**：2000-10-17

基金项目：农业部“引进国外先进农业技术”项目(961020)，江苏省国际科技合作项目(BS99724)和国家 973 项目(G20000016210)资助。

作者简介：翟保平(1957—)男，河南修武人，1985 年获中国农业科学院农学硕士，1994 年获南京农业大学理学博士，1996 年浙江农业大学昆虫学博士后出站。现任南京农业大学昆虫学系教授，博导。研究方向：雷达昆虫学、昆虫生态与预测预报。已发表学术论文 50 余篇。

表1　昆虫迁飞的雷达观测活动

Table 1　Radar observations of insect migration

时间	地点	单位	雷达种类	观测内容	文献
1968,9—10	尼日尔	LUT/ALRC	X频带,扫描	首次应用昆虫雷达。蝗虫	[1—3]
1969,6—9	美国	USAEIC	X频带,扫描	蚊群	[4]
1970,2,8	美国	海军电子实验中心	FM-CW	昆虫与大气边界层(PBL)结构	[5]
1971,3,11,12	澳大利亚	LUT/CSIRO	X频带,扫描	澳首次应用。蝗虫、蛾类等	[2,6]
1971-1974,10	苏丹	LUT/AARU	X频带,扫描	蝗虫	[2]
1971,6;1972,8	法国	OPDCRA	Ka频带,8.6mm	稳定和对流边界层内的angels	[7]
1972,2—3	沙特阿拉伯	COPR	X频带,扫描	个体沙漠蝗	[8]
1972,3	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	澳大利亚疫蝗	[6]
1972,11	塞浦路斯	COPR	X频带,扫描	非洲粘虫的迁出与迁入	[9]
1973,6,9—10	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	春季蛾类的越海迁飞	[10]
1973—1976,7	加拿大	LUT/AARU/CFS	扫描,机载	枞色卷蛾迁飞的大规模综合观测	[11,12]
1973,1974,11	马里	COPR	X频带,扫描	蝗虫	[13]
1974,2	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	澳大利亚疫蝗等的昼夜迁飞	[14]
1975,10—11	马里	COPR	2扫描,1VLR	蝗虫,3部雷达两地同时观测	[15]
1977—1978,1—3	澳大利亚	CSIRO/COPR	X频带,扫描	2部雷达两地同时观测越海迁飞	[16]
1978.9—1979.3	澳大利亚	CSIRO/APLC	X频带,扫描	PBL内驻波扰动下昆虫的迁飞	[17,18]
1978,9—10	马里	COPR	2扫描,1VLR	蝗虫,3部雷达两地同时观测	[19,20]
1978,8—10	美国	WCRL	X频带,扫描	美国的首次观测,棉田昆虫	[21]
1979—1980,2—4	肯尼亚	COPR	2扫描,1红外	两地及高低空同时观测非洲粘虫	[22,23]
1979,1980	美国	WCRL	X频带,扫描	各种迁飞现象,棉田昆虫	[24]
1979,7	英国	CIT	扫描,红外	蚜虫,欧洲蚜虫监测网的标定	[25]
1979,10—12	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	蝗虫定向、空中虫群时空分布	[26,27]
1980,9,12	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	低空急流和海风锋中的昆虫	[28—30]
1981,3—9	美国佐州	SGIRL	X频带,扫描	各种迁飞现象,棉田昆虫	[31]
1981,9	澳大利亚	CSIRO	X频带,扫描	海洋PBL驻波扰动与昆虫迁飞	[32]
1982,3—5	肯尼亚	COPR	2扫描,1VLR	3机两地同时观测非洲粘虫	[15,33]
1982,3—4	美国德州	USDA-ARS	X频带,扫描	大气结构与昆虫迁飞	[34]
1982,4—5	美国伊州	INHS/ISWS	多普勒,跟踪	S、X频带雷达同时观测昆虫、大气	[35]
1982,10;1983,4—5	墨西哥湾	USDA-ARS	船载雷达	蛾类和其它昆虫的越海迁飞	[36]
1983,1984,6,9	美国德州	USDA-ARS	X频带,扫描	蛾类和其它昆虫的往返迁飞	[37,38]
1984,3	菲律宾	TDRI/CSIRO	X,Q频带扫描	热带稻区稻飞虱的迁飞	[39]
1984,6	中国应县	JAAS	X频带,扫描	草地螟的春季北迁	[40]
1984,8	美国伊州	INHS/ISWS	S频带,多普勒	蚜虫的远距离迁飞	[41,4]
1984,9—11	澳大利亚	CSIRO/APLC	X频带,扫描	蛾类早春迁入与澳洲疫蝗迁飞	[TREWS]
1985—1990,5—6	美国德州	APMRU	X频带,扫描	*Heliothis*与其它蛾类的迁飞	[43,44]
1985,1987,4,7	美国堪州	USDA-ARS	X频带,扫描	蜜蜂雄蜂蜂群的飞行行为	[45]
1985,1986,11,12	印度	TDRI	X频带,扫描	棉铃虫。ZLC-VLR首次试验	[46]
1986,6	中国公主岭	JAAS/CSIRO	X频带,扫描	粘虫春季迁入东北	[47]
1986,1987,7	美国德州	APMRU	X频带,扫描	*Heliothis zea*从玉米田的迁出	[48]
1987,5—6	美国德州	APMRU	机载雷达	*Heliothis*与其它蛾类的迁飞	[49]

续表 1

Table 1 Cont

时间	地点	单位	雷达种类	观测内容	文献
1987,1988,5—8	中国公主岭	JAAS	X 频带，扫描	东北粘虫的春夏迁飞	[50]
1987,7	美国北达州	NDARB/ISWS	S 频带，多普勒	蝗虫迁飞与 PBL 垂直扰动	[51,52]
1987,7—8	法国	UPS	Ka 频带，8.6mm	越海迁飞的昆虫的带状集聚	[53]
1988,1989,2—10	美国德州	CIPMRU	X 频带，扫描	夜间 PBL 结构与昆虫季节性迁飞	[54]
1988—1990,3—4	美国亚利桑那	CIPMRU/CHBRC	X 频带，扫描	蜜蜂蜂群的飞行行为	[55,56]
1988,1990,9	中国江浦	NAU/NRIRU	X，Q 频带扫描	稻飞虱的秋季回迁	[57,58]
1989,3,5,6	美国德州	IBPMRL	机载，扫描	棉铃虫迁飞与夜间 PBL 结构	[59,60]
1989,5—6	中国鲅鱼圈	JAAS/CSIRO	X 频带，扫描	春季粘虫飞越渤海迁入东北	[61]
1989,10—1990.1	澳大利亚	CSIRO	X 频带，扫描	蜜蜂飞行行为和棉铃虫迁飞	[62]
1990,1991,1—12	美国德州	CIPMRU	VLR	连续 2 年空中种群的自动监测	[63,64]
1990.11—1991.1	澳大利亚	CSIRO/NRIRU	扫描，VLR	棉铃虫迁飞与 NRI VLR 试验	[65,66]
1990,1991,6	中国吉林蔡家	JAAS	X 频带，扫描	粘虫春季迁飞	[61]
1991,7—8	美国弗罗里达	NCAR	多普勒气象雷达	海风锋中的空中浮游生物	[67,68]
1991,10	中国东乡	NAU/NRIRU	X，Q 频带扫描	稻飞虱，稻纵卷叶螟，库蚊回迁	[69,70]
1992,5—6	中国梨树	JAAS/ASOP	X 频带，扫描	粘虫春季迁飞	[61]
1992,6—7	美国德州	APMRU	X 频带，扫描	*Heliothis* 的迁飞路径	[71]
1993,1994,5—6	美国克罗拉多	INHS/CSU	S 频带多普勒	蚜虫及其它昆虫的迁飞	[TREWS]
1993,1994,9—10	毛里塔尼亚	NRIRU	扫描，VLR	沙漠蝗迁飞	[72]
1994,9	美国德州	APMRU	VLR，NEXRAD	VLR 与多普勒气象雷达观测比较	[TREWS]
1995—1999	美国德州	APMRU	扫描，VLR	*H. zea*，*Spodoptera exigua* 的迁飞	[TREWS]
1995,6—9	英国 Malvern	NRIRU	VLR	VLR 长期监测试验，混合种群	[9]
1995—1999,6—8	英国 Harpenden	NRIRU	谐波雷达	蜜蜂飞行行为	[73,74]
1996,3,6—9	美国德州	AMPRU/ASOP	扫描，跟踪，VLR	多机 3 地同时观测并比较结果	[TREWS]
1997,6	芬兰赫尔辛基	赫尔辛基大学	多普勒雷达	小菜蛾迁飞观测	[TREWS]
1998—1999,5—12	澳新南威尔士	ASOP/APLC/UNE	VLR	蛾类和蝗虫	[75]
1990.5	英国 Harpenden	NRIRU/IACR	VLR	英格兰中南部的昆虫迁飞观测	[74]

注：TREWS—The Radar Entomology Web Site (*http://www.ph.adfa.edu.au/a-drake/trews/*)

1　ZLC 制式昆虫雷达的发展

般雷达和昆虫联系起来，大多数人难以置信。其实，飞行动物体内所含的大量水分能向雷达接收机返回可分辨的回波能量，故也是良好的反射体。英国昆虫学家 R.C.Rainey 博士 1950 年提出用雷达观测蝗虫迁飞的设想，并与英国海军合作，于 1954 年用舰载雷达的波斯湾首次检测到夜家中覆盖 50km^2 的蝗群[81]。但适于观测昆虫的雷达是能从天线发射足够能量和足够短的脉冲波束目标的脉冲雷达，且波长必须是厘米级以下的。而直到 60 年代，波长 10 cm(S 频带)和 3 cm(X 频带)、脉冲功率数十千瓦、脉冲宽度不到 1 μs 的雷达(主要是船用雷达)才大批生产，也正是这种雷达为 60 年代末期雷达昆虫学的诞生提供了物质和技术基础。1968 年，英国的 G.W.Schaefer 博士建造了世界上第一部专用昆虫雷达(3.2 cm 波长，X 频带)，在尼日尔成功地观测了沙漠蝗的迁飞[1−3]。昆虫雷达从此成为昆虫迁飞研究中一种无可替代的重要工具，30 年来已研制出扫描雷达、机载雷达、谐波雷达、跟踪雷达、毫米波雷达等多种机型，且逐渐从研究走向实用。

ZLC 制式最初的构想是从早期的雷达观测实践中检测空中昆虫的振翅频率[1]、迁飞个体的体型和定向[15]所用的静止波束法(垂直上指、线性偏振、锥形扫描)发展起来的。英国的 J. R. Riley 博士于

1975年研制出最早的一部垂直波束雷达(Vertical Looking Radar, VLR),可产生目标昆虫高质量的翅频记录,且能提供迁飞种群定向分布的微尺度细节[15],但对迁飞个体的体型信息的提取未能成功。为此,Schaefer博士提出引入跟踪雷达所用的章动原理来增进VLR性能的设想;英国洛桑试验站的G. A. Bent博士进一步发展了Schaefer的建议,于1984年提出了ZLC制式的完整概念[82],即垂直上指、偏振旋动、波束章动,锥形扫描(Zenith-pointing Polarization-rotation Beam-nutation Conical-scan);并通过室内模拟试验表明,只要使VLR天线的旋动馈电稍做偏转,即可很方便地将旋动和章动结合起来,从而可测得飞行个体的速度、方向和定向,以及与体型(RCS)有关的两个参数(图1,其中:(a) VLR侧面观,示偏振旋动、波束章动。当抛物面天线接收一个双偶极馈电时,产生一个约2.6°宽、平面偏振的锥形波束;在该波束转动时,天线馈电以6 Hz的周期连续形成对天线旋转轴的轻微偏差,从而造成波束绕垂直轴几分之一宽度的章动和偏振平面的转动。(b) VLR平面观,示昆虫轨迹与波束章动半径的几何关系,C为波束中心。当一头昆虫飞越VLR波束时,其回波的振幅取决于虫体在波束内的位置及其雷达截面(RCS)。RCS是虫体轴线与偏振平面之间的夹角的函数,

$$\sigma(\phi)=a_0+a_2\cos 2\phi+a_4\cos 4\phi \qquad (1)$$

其中,$\sigma(\phi)$是ϕ为东向矢量平面与虫体轴线的夹角时的RCS。VLR接收的信号既随偏振旋转加以调制,又随波束章动和昆虫飞越波束的直线运动进行调制,因为这两种运动均可影响虫体与波束轴之间的距离,而天线的增益则是该距离的指数函数。在虫体方向上的天线增益根据昆虫的运行轨迹和雷达波束章动半径以下式描述:

$$G=G_0\exp(-Kr^2) \qquad (2)$$

式中,G和G_0分别为虫体处和波束轴上的天线增益,$K=8\ln 2$, $r^2=R^2+\Delta^2+2\Delta R\cos(\Omega t-\alpha)$, $R^2=V^2(t-\tau)+r^2$, τ为昆虫到达距章动轴最近点(P)时的时间。将式(1)乘以式(2)的平方即得个体昆虫以恒速及不变的倾角和方位角飞越VLR上空时回波信号的时间变化)。

但由于Bent的目的是应用VLR检测蚜虫,目标个体太小而使其技术要求特别高,他的信号分析程序在处理野外实测数据时没能成功,其样机最终也未达到可操作的水平。然而,Bent的工作使Rilev深受启发。他和助手们在Bent的基础上设计了新的信号分析算法,并进一步改进了硬件系统,于1985年制成了观测中大型昆虫的第二代VLR样机,并分别于1985和1986年在印度、1990年在澳大利亚进行试运行,成功地测得了目标昆虫的飞行速度、方向和定向,以及与体型(大小和形状)有关的3个RCS参数[83]。1993年和1994年在毛里塔尼亚进行了第一次正式观测,1995年7—9月又在英国本土进行了连续3个月的长期监测试验[9]。结果表明,该雷达不仅目标辨识能力有所提高,而且整机运行和数据分析全部实现计算机自动控制,观测费用也大大降低,从而使迁飞性害虫的长期自动监测成为可能。

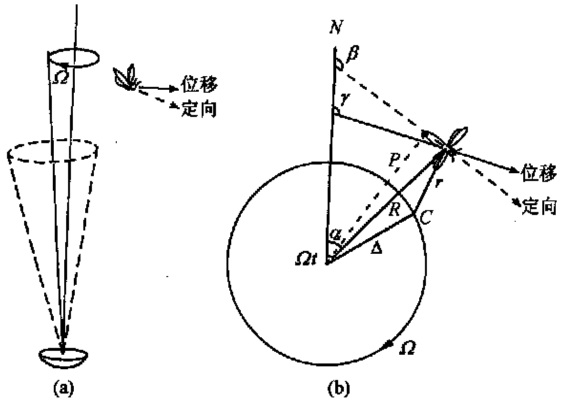

图1 昆虫监测雷达(VLR/IMR)工作原理[65]

Fig. 1 Geometry of VLR and target configuration

80年代末,美国农业部的Beerwinkle博士移植了旋动偏振的设计思想,但放弃了锥形扫描功能。此举大大降低了制造和操作成本,但也因此丧失了检测空中种群迁飞方向的能力。不过,他所建造的这部电脑控制的全自动VLR可以测出空中迁飞种群的密度和定向,并创造了一部雷达连续运行两年监测昆虫迁飞的记录[64]。澳大利亚的Drake博士也引入ZLC技术,建造了两部昆虫监测雷达(Insect Monitoring Radar, IMR),用于澳洲蝗虫的棉铃虫的长期监测[80],并于1996年1—7月携至美国与APMRU合作研究*Heliothis zea*的迁飞[84]。

2 ZLC制式昆虫雷达的特性与局限性

ZLC雷达与扫描雷达的工作方式完全不同,因而所提供的信息的质量也各不相同。首先,VLR较之传统昆虫雷达的不足之处是以样空间太小(波束直径30 m),只能检测飞越其正上方的个体,致使其灵敏度(检测并量化低密度种群的能力)和时空分辨

率均较低，只在空中昆虫密度较高时才能得到有关参数。其次，因为VLR不像扫描雷达那样利用波束仰角的变化测得迁飞种群数量的垂直廓线，故其所测的密度垂直廓线更容易产生较大的系统误差。

不过，任何事物都具有两面性。VLR较小的取样空间使得近地空间的波束较窄，因而减少了由于此处昆虫密度较高造成回波重叠所产生的信息损失；就其信息质量而言，VLR可提供迁飞个体的翅频、体型、大小和定向信息从而辨别目标种类，这正是扫描雷达所不及的，后者只能测出群体的翅频和定向。更重要的是，VLR结构简单，造价低廉，数据采集量小，故很容易实现雷达运行和信号采集、存储和处理和微机全自动控制进而实现对迁飞性害虫的长期监测。由微机自动产生逐日(逐夜)的记录报告并通过调制解调器传给研究人员或管理部门即时处理并归档保存。

3　ZLC制式昆虫雷达的应用前景

通过30年的发展，昆虫雷达已从纯研究工具演变为长期监测的实用工具。ALC制式的问世使雷达昆虫学的发展方向出现重大转折：往常对昆虫迁出活动的短期、集中的观测研究将被对迁入事件的长期监测所取代，全自动运行、雷达信号的即时分析与处理使得迁飞性害虫的灾变预警可望实现。美国农业部的APMRU领风气之先，用VLR进行了长达两年连续观测，在昆虫迁飞行为研究方面做了卓有成效的工作[63,64]。美国的大气生物学联盟(Alliance for Aerobiology Research，AFAR)与美国国家气象局的NEXRAD多普勒天气雷达网合作，正在筹建VLR网以实现对全美低层大气(2km以下)中多种生物的生物流量长期监测(图2)。作为VLR的发明者，英国自1995年始以洛桑试验站为基地，配合欧洲蚜虫监测网用VLR在本土进行雷达观测[75]。在澳大利亚，Drake博士自1998年以来正连续运行两部ALC制式的IMR研究澳洲棉铃虫和蝗虫迁飞种群的空间生态学[85](图3)；他还将IMR和LARG拥有的多普勒UHF雷达(测风廓线)，多普勒声达(测风廓线)和无线电声控空系统(测温度廓线)联合作用，通过连续自动监测和气象要素的实时采集研究昆虫迁飞的生物气象学[86]。

中国目前拥有两部扫描雷达(吉林省农业科学院和中国农业科学院)，近期内还将有一部VLR投入使用(南京农业大学)。用VLR和扫描雷达联合观测，可为昆虫迁飞行为机制研究提供更多有价值的信息。其中，降落机制和再迁飞机制将是今后研究中亟需突破的重点。若能在中国东半部建起VLR网，通过连续几年的数据积累，再综合高空和地面

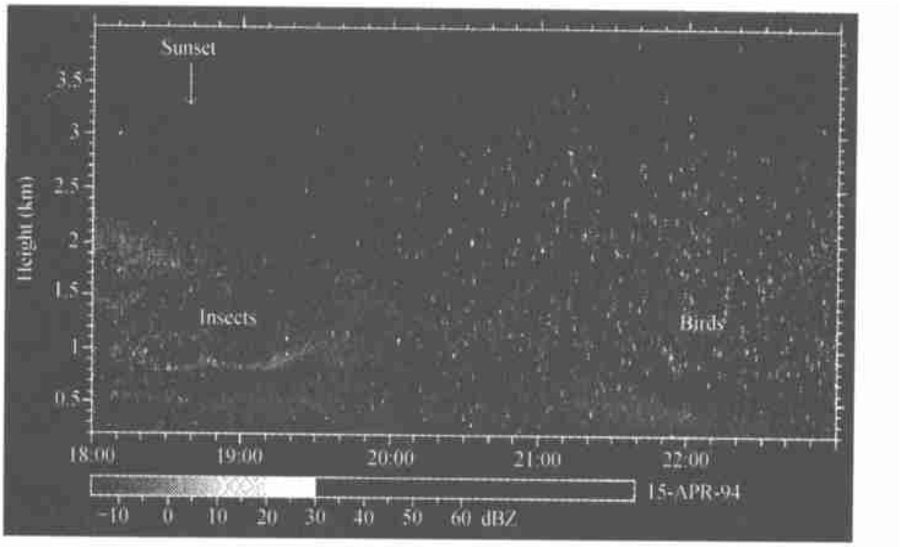

图2　VLR回波图像合成图

自18：00始，1.5－2 km高度一直存在25 m/s的强偏南风(S/SWS)，20：00之后1.5 km高度以下的风速也达20 m/s。日落前昆虫在2 km高度成层北迁，日落后虫层高度下降到1 km左右，20：00之后虫层高度位于500 m左右，同时可见鸟类迁飞的大量回波

Fig. 2　VLR image showing the spring migration of insects and birds in Cornwall and Granby, Canada

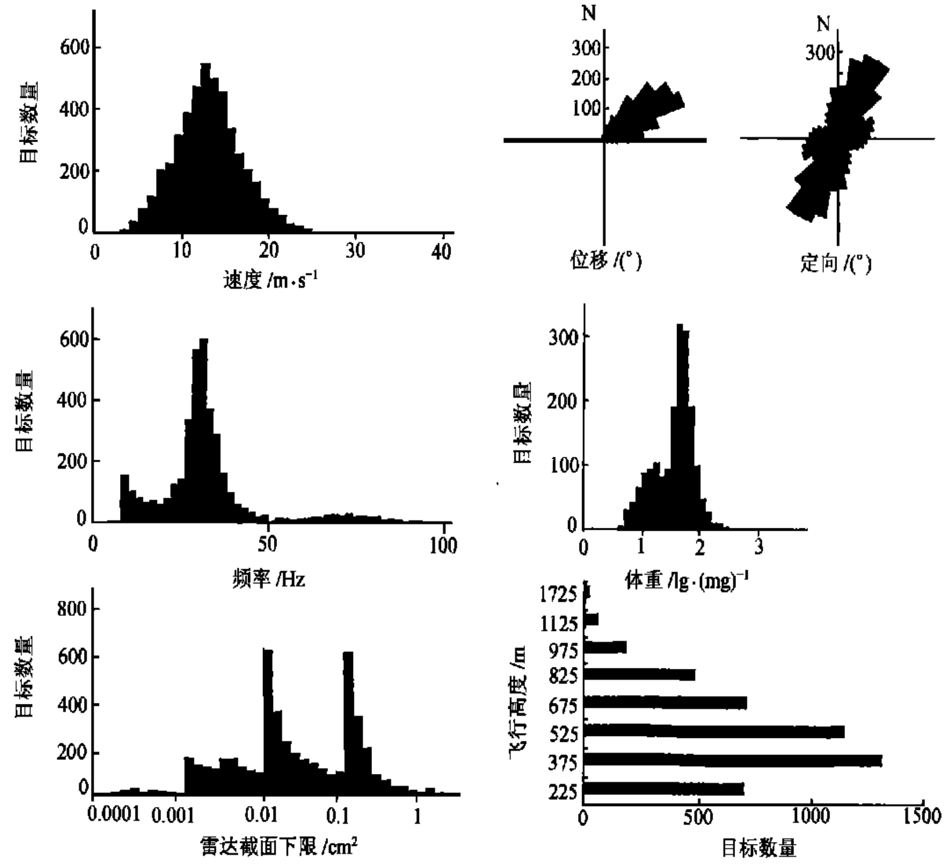

图3 IMR采集的澳洲疫蝗迁飞行为参数(澳大利亚,1999-03-14)

Fig. 3 Migratory paramcters of Australian plague locust sampled by insect monitoring radar in NSW Bourke, Australia

风温场、作物信息及相关地理信息,用GIS对逐日虫情做大区域的空间分析和三维轨迹分析,可望阐明迁飞性害虫的时空分布、行为参数和空中种群参数及特定天气系统与不同立地条件下空中种群的降落分布规律,据此得出主降区和迁入量及迁入种群的发育期距等灾变预警参数,计算迁出区和迁入区的动态分布及其影响因子。将VLR的实时监测与专家系统和GIS相耦合,即可形成迁飞性害虫灾变预警和决策支持系统(GIS/DSS)。而且,如果有了VLR网及GIS/DSS,对迁飞性害虫的“空对空”防治就有望实现[87]。此外,VLR网还可用于监测环境变化的影响,如森林砍伐、不同的环境污染水平、农药的大规模使用等引起的生物多样性的丧失等。

致谢 Drs J. R. Riley, D. R. Reynolds 和 V. V. Drake 提供了大量文献资料,谨致谢忱!

参考文献(References)

[1] Schaefer G W. Radar observations of insect flight [A]. In: Rainey R C. Insect Flight [C]. Oxford: Blackwell Scientific, 1976.

[2] Schaefer G W. Radar studies of locust, moth and butterfly migration in the Sahara [A]. Proceedings of Royal Entomological Society of London [C]. 1969.

[3] Roffey J. Radar studies on the desert locust, Niger, September-October 1968 [R]. Anti-Locust Research Center Occasional Report, 1969.

[4] Frost E L. Tracking insect swarms by radar: a feasibility study [A]. Proceedings of New Jersey Mosquito Extermination Association [C]. 1970.

[5] Atlas D, Harris F I, Richter J H. Measurement of point target speeds with incoherent non-tracking radar: insect speeds in atmospheric waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**: 7588—7595.

[6] Roffey J. Radar studies of insects [J]. *PANS*, 1972, **18**(3): 303—309.

[7] Campistron B. Characteristic distributions of angel echoes in the lower atmosphere and their meteorological implications [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1975, **9**: 411—426.

[8] Riley J R. Radar observations of individual desert locusts (*Schistocerca gregaria* (Forsk.) (Orthoptera: Locustidae)) [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1974, **64**: 19—32.

[9] Reynolds D R, Riley J R. Flight behaviour and migration of insect pests: radar studies in developing countries [R]. NRI Bulletin, 1997, No. 71. Chatham Maritime: NRI.

[10] Drake V A，Helm K F，Readshaw J L *et al*．Insect migration across Bass Strait during spring：a radar study [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1981，**71**：449—466．

[11] Schaefer G W．An airborne radar technique for the investigation and control of migrating pest insects [J]．*Philosophical Transactions of Royal Society of London*，1979，**B 287**：459—465．

[12] Greenbank D O，Schaefer G W，Rainey R C．Spruce budworm (Lepidoptera：Tortricidae) moth flight and dispersal：new understanding from canopy observations，radar，and aircraft [J]．*Memoirs of the Entomological Society of Canada*，1980，**110**：1—49．

[13] Reynolds D R，Riley J R．Radar observations of concentrations of insects above a river in Mali，West Africa [J]．*Ecological Entomology*，1979，**4**：161—174．

[14] Reid D G，Wardhaugh K G，Roffey J．Radar studies of insect flight at Benalla，Victoria in February 1974 [R]．CSIRO Australia，Division of Entomology Technical Paper，1979．

[15] Riley J R，Reynolds D R．Radar-based studies of the migratory flight of grasshoppers in middle Neger area of Mali [A]．Proceedings of the Royal Society [C]．1979．

[16] Seymour J．Plotting insect flight paths [J]．*Ecoscience*，1982，**31**：8—10．

[17] Drake V A．The vertical distribution of macro-insects migrating in the nocturnal boundary layer：a radar study [J]．*Boundary-Layer Meteorology*，1984，**28**：353—374．

[18] Drake V A．Solitary wave disturbances of the nocturnal boundary layer revealed by radar observations of migrating insects [J]．*Boundary-Layer Meteorology*，1985，**31**：269—286．

[19] Riley J R，Reynolds D R．A long-range migration of grasshoppers observed in the Sahelian zone of Mali by two radars [J]．*Journal of Animal Ecology*，1983，**52**：167—183．

[20] Reynolds D R，Riley J R．A migration of grasshoppers，particularly *Diabolocatantops axillaris* (Thunberg) (Orthoptera：Acrididae)，in the West African Sahel [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1988，**78**：251—271．

[21] Wolf W W．Radar program at western cotton research laboratory [A]．Vaughn C R，Wolf W W，Klassen W．Radar，Insect Population Ecology，and Pest Management [C]．Virginia：NASA，1979，159—160．

[22] Riley J R，Reynolds D R，Farmery M J．Observations of the flight behaviour of the armyworm moth，*Spodoptera exempta*，at an emergence site using radar and infra-red optical techniques [J]．*Ecological Entomology*，1983，**8**：395—418．

[23] Riley J R，Reynolds D R，Farmery M J．Radar observations of *Spodoptera exempat* Kenya，March-April 1979 [R]．COPR Miscellaneous Report，1981．

[24] Lingren P D，Wolf W W．Nocturnal activity of the tobacco budworm and other insects [A]．Hatfield J L，Thomason I J．Biometeorology in Integrated Pest Management [C]．New York：Academic Press，1982．

[25] Schaefer G W，Bent G A，Allsopp K．Radar and opto-electronic measurements of the effectiveness of Rothamsted Insect Survey suction traps [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1985，**75**：701—715．

[26] Drake V A．Collective orientation by nocturnally migrating Australian plague locusts，*Chortoicetes terminifera* (Walker) (Orthoptera：Acrididae)：a radar study [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1983，**73**：679—692．

[27] Drake V A，Farrow R A．The nocturnal migration of the Australian plague locust，*Chortoicetes terminifera* (Walker) (Orthoptera：Acrididae)：quantitative radar observations of a series of northward flights [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1983，**73**：567—585．

[28] Drake V A．Insects in the sea-breeze front at Canberra：a radar study [J]．*Weather*，1982，**37**：134—143．

[29] Drake V A．Radar observations of moths migrating in a nocturnal low-level jet [J]．*Ecological Entomology*，1985，**10**：259—265．

[30] Drake V A，Farrow R A．A radar and aerial-trapping study of an early spring migration of moths (Lepidoptera) in inland New South Wales [J]．*Australian Journal of Ecology*，1985，**10**：223—235．

[31] Raulston J R，Wolf W W，Lingren P D *et al*．Migration as a factor in Heliothis management [A]．ICRISAT．Proceedings of International Workshop on Heliothis Management [C]．India：Patancheru，1982．

[32] Drake V A．Solitary wave disturbance of the marine boundary layer over Spencer Gulf revealed by radar observations of migrating insects [J]．*Australian Meteorological Magazine*，1984，**42**：131—135．

[33] Rose D J W，Page W W，Dewhurst C F *et al*．Downwind migration of the African armyworm moth，*Spodoptera exempta*，studied by mark-and-capture and by radar [J]．*Ecological Entomology*，1985，**10**：299—313．

[34] Wolf W W，Westbrook J K，Sparks A N．Relationship between radar entomological measurements and atmospheric structure in south Texas during March and April 1982 [A]．Sparks A N．Long-range migration of moths of agronomic importance to the United States and Canada：specific examples of occurrence and synoptic weather patterns conducive to migration [C]．USDA-ARS-43，1986．

[35] Mueller E A，Larkin R P．Insects observed using dual-polarization radar [J]．*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*，1985，**2**：49—52．

[36] Wolf W W，Sparks A N，Pair S D *et al*．Radar observations and collections of insects in the Gulf of Mexico [A]．Danthanarayana W．Insect Flight：Dispersal and Migration [C]．Berlin：Springer-Verlag，1986．

[37] Parks A N，Westbrook J K，Wolf W W *et al*．Atmospheric transport of biotic agents on a local scale [C]．See Ref．42，1985．

[38] Pair S D，Raulston J R，Rummel D R *et al*．Development and production of corn earworm and fall armyworm in the Texas high plains：evidence for reverse fall migration [J]．*South western Entomologist*，1987，**12**：89—99．

[39] Riley J R，Reynolds D R，Farrow R A．The migration of *Nilaparvata lugens* (Stal) (Delphacidae) and other Hemiptera associated with rice during the dry season in the Philippines：a study using radar，visual observations，aerial netting and ground trapping [J]．*Bulletin of Entomological Research*，1987，**77**：145—169．

[40] Chen Ruilu，Bao Xiangzhi，Wang Suyun *et al*．An observation on migration of meadow moth by radar [J]．*Acta Phytophylacica Sinica*，

1992, **19**(2): 171—174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云等. 草地螟迁飞的雷达观测[J]. 植物保护学报, 1992, **19**(2): 171—174.]

[41] Irwin M E, Thresh J M. Long-range aerial dispersal of cereal aphids as virus vectors in North America [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, **B321**: 421—446.

[42] Hendrie L K, Irwin M E, Liquido N J *et al*. Conceptual approach to modeling aphid migration [A]. MacKenzie D R, Barfield C S, Kennedy G C *et al*. The Movement and Dispersal of Agriculturally Important Biotic Agents [C]. Louisiana: Clatior's Publ. Div., 1985.

[43] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J R *et al*. Radar detection of ascent of *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) moths from corn in the Lower Rio Grande Valley of Texas [A]. Maarouf A R, Barthakur N N, Haufe W O. Proceedings of the 13th International Conference of Biometeorology [C]. Canada: International Society of Biometeorology, 1993.

[44] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J R *et al*. Radar observations of orientation of noctuids migrating from corn fields in the Lower Rio Grande Valley [J]. *Southwestern Entomologist*, 1995, Suppl. 45—61.

[45] Loper G M, Wolf W W, Taylor O R. Detection and monitoring of honeybee drone congregation areas by radar [J]. *Apidologie*, 1978, **18**: 163—172.

[46] Riley J R, Armes N J, Reynolds D R *et al*. Nocturnal observations on the emergence and flight behaviour of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in the post-rainy season in central India [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1992, **82**: 243—256.

[47] Chen R L, Bao X Z, Drake V A *et al*. Radar observations of the spring migration into north-eastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects [J]. *Ecological Entomology*, 1989, **14**: 149—162.

[48] Beerwinkle K R, Lopez J D, Witz J A. Emergence and radar-observed movement of *Heliothis zea* from senescent corn in east-central Texas [A]. Proceedings of 1988 Beltwide Cotton Production Research Conferences [C]. 1988.

[49] Hobbs S E, Wolf W W. An airborne radar for studying insect migration [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1989, **79**: 693—704.

[50] Chen Ruilu, Radar studies on migration of armyworm [A]. Lin Changshan *et al*. Physiological Ecology of Armyworm [C]. Beijing: Beijing University Press, 1990. [陈瑞鹿. 雷达在粘虫迁飞研究中的应用[A]. 林昌善. 粘虫生理生态学[C]. 北京: 北京大学出版社, 1990.]

[51] Achtemeier G L. The use of insects as tracers for "clear-air" boundary-layer studies by Doppler radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1991, **8**: 746—765.

[52] Achtemeier G L. Grasshopper response to rapid vertical displacements within a "clear air" boundary layer as observed by Doppler radar [J]. *Environmental Entomology*, 1992, **21**: 921—938.

[53] Sauvageot H, Despaux G. The clear-air coastal vespertine radar bands [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1996, **77**: 673—681.

[54] Beerwinkle K R, Lopez J D, Witz J A *et al*. Seasonal radar and meteorological observations associated with nocturnal insect flight at altitudes to 900 meters [J]. *Environmental Entomology*, 1994, **23**: 676—683.

[55] Loper G M, Wolf W W, Taylor O R. Honey bee drone flyways and congregation areas-radar observations [J]. *Journal of Kansas Entomological Society*, 1992, **65**: 223—230.

[56] Loper G M, Wolf W W, Taylor O R. Radar detection of drones responding to honeybee queen pheromone [J]. *Journal of Chemical Ecology* 1993, **19**: 1929—1938.

[57] Riley J R, Cheng X N, Zhang X X *et al*. The long-distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stal) (Delphacidae) in China: radar observations of mass return flight in autumn [J]. *Ecological Entomology* 1991, **16**: 471—489.

[58] Riley J R, Reynolds D R, Smith A D *et al*. Observations on the autumn migration of *Nilapar vata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in east central China [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1994, **84**: 389—402.

[59] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J *et al*. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States [J]. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 1990, **B328**: 619—630.

[60] Pair S D, Raulston J R, Westbrook J K *et al*. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) outbreak originating in the Lower Rio Grande Valley, 1989, [J]. *Florida Entomologist*, 1991, **74**: 200—213.

[61] Chen R L, Sun Y J, Wang S Y *et al*. Migration of the Oriental Armyworm *Mythimna separata* in East Asia in relation to weather and climate. I. Northeastern China [A]. Drake V A, Gatehouse A G. Insect Migration: Tracking Resources through Space and Time [C]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.

[62] Drake V A, Fitt G P, Rochester W A. Methodology for a comprehensive field study of adult movement in *Helicoverpa* spp [A]. Corey S A, Dall D J, Milne W M. Pest Control and Sustainable Agriculture [C]. Melbourne: CSIRO Publications, 1993.

[63] Beerwinkle K R, Lopez J D, Schleider P G *et al*. Annual patterns of aerial insect densities at altitudes from 500 to 2400 metres in east-central Texas indicated by continuously-operating vertically-oriented radar [J]. *Southwestern Entomologist*, 1995, **Suppl**. 63—79.

[64] Beerwinkle K R, Witz J A, Schleider P G. An automated, vertical looking, X-band radar system for continuously monitoring aerial insect activity [J]. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 1993, **36**: 965—970.

[65] Smith A D, Riley J R, Gregory R D. A method for routine monitoring of the aerial migration of insects by using a vertical-looking radar [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1993, **B340**: 393—404.

[66] Drake V A, Rochester W A. The formation of layer concentrations by migrating insects [A]. Proceedings of the 21st Conference of Agricultural and Forestry Meteorology and the 11th Conference of Biometeorology and Aerobiology [C]. Boston: American Meteorological Society, 1994.

[67] Russell R W, Wilson J W. Aerial plankton detected by radar [J]. *Nature*, 1996, **381**: 200—201.

[68] Russell R W, Wilson J W. Radar-observed "fine-lines" in the opti-

cally clear boundary layer: reflectivity contributions from aerial plankton and its predators [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **82**: 235—262.

[69] Ming J I, Jin H, Riley J R *et al*. Autumn southward 'return' migration of the mosquito *Culex Tritaeniorhynchus* in China [J]. *Medical and Veterinary Entomology*, 1993, **7**: 323—327.

[70] Riley J R, Reynolds D R, Smith A D *et al*. Observations of the autumn migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other moths in eastern China [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1995, **85**: 397—414.

[71] Westbrook J K, Eyster R S, Wolf W W *et al*. Migration pathways of corn earworm (Lepidop-tera: Noctuidae) indicated by tetroon trajectories [J]. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 1995, **73**: 67—87.

[72] Riley J R, Reynolds D R. Vertical-looking radar as a means to improve forecasting and control of desert locusts [A]. Krall S, Peveling R, Diallo B D. New Strategies in Locust Control [C]. Basel: Birkhauser Verlag, 1997.

[73] Riley J R, Smith A D, Reynolds D R *et al*. Tracking bees with harmonic radar [J]. *Nature*, 1996, **379**: 29—30.

[74] Riley J R. Riding on the wind: a radar perspective of insect flight [R]. UK: University of Greenwich, Inaugural Lecture Series. 1999.

[75] Drake V A, Harman I T, Hunter D M. Monitoring locust migratory flight with radar: an Australian field study [A]. The 2nd Urban Environment Symposium and the 13th Conference of Biometeorology and Aerobiology [C]. November 2—6, 1998, Albuquerque, New Mexico. AMS, Boston. AN02304, 1998.

[76] Zhai Baoping, Zhang Xiaoxi. Behaviour of migrating insects: adaptation and selection to atmospheric environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, **13**(4): 356—363. [翟保平,张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为:对风温场的适应与选择[J]. 生态学报,1993,**13**(4):356—363.]

[77] Zhai Baoping, Zhang Xiaoxi, Cheng Xianian. Parameterizating the migratory behaviour of insects. I Behavioural analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(1): 7—17. [翟保平, 张孝羲,程遐年. 昆虫迁飞行为的参数化. I 行为分析. 生态学报,1997,**17**(1): 7—17.]

[78] Zhai Baoping. Tracking angels: 30 years of radar entomology [J]. *Acta Entomologica Sinica* 1999, **42**(3): 315—326. [翟保平. 追踪天使—雷达昆虫学30年[J]. 昆虫学报,1999,**42**(3):315—326.]

[79] Drake V A, Farrow R A. The influence of atmospheric structure and motions on insect migration [J]. *Annual Review of Entomology*, 1988, **33**: 183—210.

[80] Drake V A. Insect-monitoring radar: a new source of information for migration research and operational pest monitoring [A]. Corey S A, Dall D J, Milne W M. Pest Control and Sustainable Agriculture [C]. Melbourne: CSIRO Publications, 1993.

[81] Rainey R C. Observation of desert locust swarms by radar [J]. *Nature*, 1955, **175**: 77.

[82] Bent G A. Developments in detection of airborne aphids with radal [A]. 1984 British Crop Protection Conference-Pests and Diseases [C]. Croydon, UK: BCPC, 1984.

[83] Riley J R, Reynolds D R. Radar monitoring of locusts and other migratory insects [A]. Cartwright A. World Agriculture 1993 [C]. London: Sterling Publications, 1993.

[84] Drake V A, Harman I T, Westbrook J K, Wolf W W. Corn earworm migration trajectories in the Lower Rio Grande valley observed with an Insect Monitoring Radar [A]. The 2nd Urban Environment Symposium & 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology, November 2—6, 1998, Albuquerque, New Mexico [C]. AMS: Boston, 1998.

[85] Drake V A. Forecasting highly mobile pests-confronting the limits of predictability? Pest Management-Future Challenges [A]. M. P. Zalucki, R. A. I. Drew, G. G. White, Proceedings of the 6th Australian Applied Entomological Research Conference, Brisbane, Australia, Vol. 2 [C]. 1998.

[86] Drake V A, Harman I T, Bourne I A *et al*. Simultaneous entomological and atmospheric profiling: A novel technique for studying the biometeorology of insect migration [A]. Proceedings of the 21st Conference of Agricultural and Forestry Meteorology and the 11th Conference on Biometeorology and Aerobiology [C]. Boston: American Meteorological Society, 1994.

[87] Riley J R, Reynolds D R. Nocturnal grasshopper migration in West Africa: transport and concentration by the wind, and implications for air-to-air control [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **B328**: 655—672.

Entomological Radar: from Research to Practice

ZHAI Bao-ping

(*Key Laboratory of Pest Monitoring and Management of Agricultural Ministry of China, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: Insect migration panorama was always regarded as a 'black-box' before radar entomology was borne in 1968. Comprehensive and intensive studies have been undertaken in UK, USA, Australia and China since then. Although many new phenomena and their mechanisms in the process of insect migration have been revealed by radar and the technique's utility for insect migration research is clearly established, it is, however, the complexity of the equipment and labor-intensive nature of the data analysis procedures in radar entomology that form a giant obstacle to apply the technique to become a practicable and economic proposition for routine and long-term monitoring. The development of the ZLC configuration enable radar entomology entering a new era. The current emphasis on short-term, and intensive studies on emigration events will be replaced by long-term monitoring and to the detection of immigration events. Fully automatic, unattended operation, with immediate analysis and processing of the observations and full dissemination of reports within 24 hours, will hopefully let the outbreak forecasting of migratory insect pests to be operational. The characteristics of the ZLC radar and its prospects of application in China are reviewed. Developing a VLR network in China and combining with the GIS technique will produce an operational surveillance system for migratory pest outbreaks. Possible applications include monitoring the side-effect of large-scale pesticide spraying, comparing insect diversity in different environment, and monitoring the effects of environmental change such as deforestation or varying pollution levels.

Key words: insect migration; long-term monitoring; vertical looking radar; insect monitoring radar