

昆虫谐波雷达的发展和利用*

桂连友** 黄秀琴 李传仁

(长江大学农学院 湖北 434025)

摘要 本文从昆虫谐波雷达的基本原理、发展和利用、局限性以及展望 4 个方面出发,阐述了国外昆虫学者利用昆虫谐波雷达技术跟踪昆虫低空扩散飞行或步行的行为研究概况,目的是为了尽快利用这种新技术,为我国农林业害虫综合治理服务。

关键词 昆虫,谐波雷达,标定,跟踪

The development and the use of insect harmonic radar

GUI Lian-You** HUANG Xiu-Qin LI Chuan-Ren

(College of Agriculture, Yangtze University, Hubei 434025, China)

Abstract Progress in research on the use of harmonic radar technology to track low altitude flying, or walking, insects is described, including the basic principle, development and application, limitations and future prospects. It is hoped that this new technology will be used as soon as possible in integrated pest management in agriculture and forestry in China.

Key words insect, harmonic radar, tag, tracking

低空扩散飞行或步行的昆虫(包括所有的非迁飞性种类和到达近地层的迁飞性种类)主要集中在作物冠层以上至几十米以下的高度层或地下 30 cm 土层(翟保平,1999;Riley *et al.*,2007)。昆虫这种类型运动的跟踪主要有 3 种技术,(1)微型线圈跟踪:需要在昆虫身上安装 3 个线圈,可以测量出昆虫的空间绝对位置坐标,测量分辨率较高,但是由于每计算一个点要花费至少 4 ms 的时间,所以其速度受到一定的影响,而且跟踪范围几米以内。(2)图像跟踪:单纯的图像跟踪系统不能测量绝对位置,跟踪速度受到 CCD 帧频的限制,但是它不需要在昆虫身上安装附加装置,而且可以得到昆虫飞行时的清晰的图像,距离在几十米范围,不适合高速运动昆虫。(3)谐波雷达(harmonic radar)技术:需要在昆虫身上安装标定 Tag 跟踪速度快、范围大,能测量昆虫的绝对位置坐标,但是分辨率较低(Colpitts *et al.*,1999;Boiteau and Colpitts,2001;蔡志坚和曾理江,2002)。其它常规雷达(如扫描昆虫雷达、昆虫追

踪雷达、垂直监测雷达、机载昆虫雷达、船载昆虫雷达、双极化多普勒雷达、8.8 mm 扫描昆虫雷达等)对于低空扩散飞行或步行的昆虫运动的跟踪确是盲区。因常规雷达信号的收发用的是同一天线,故在这样短的距离内,到达接收机的信号被发射机发射的信号所抵消;同时,强大的地物回波也淹没了来自近地空间的昆虫回波(翟保平,1999)。

1 昆虫谐波雷达的基本原理

昆虫谐波雷达的基本原理是靠昆虫谐波雷达系统(harmonic radar transceiver)的发射天线(transmit antenna)发射出一种高功率的脉冲电磁波,待检测的目标上绑有一很小的电子装置标定,该装置吸收雷达波束中的能量并将输入信号调制为谐波后再发射回去;昆虫谐波雷达系统的接收天线(receiver antenna)即可屏蔽地物回波而从其中将该反射的回来的另一种脉冲电磁谐波检测出来,通过相位比较测量出目标回波的相位、幅度相

* 资助项目:湖北省自然科学基金(2007ABA099)。

**通讯作者, E-mail: guilianyou@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-09-09,接受日期:2010-09-28

对于空间、时间和频率的变化率而言,至少应包含有关目标角度、径向速度、距离、形状、自旋和尺寸

等信息(Schaefer, 1969; 蔡志坚和曾理江, 2002; Colpitts and Boiteau, 2004)(图1)。

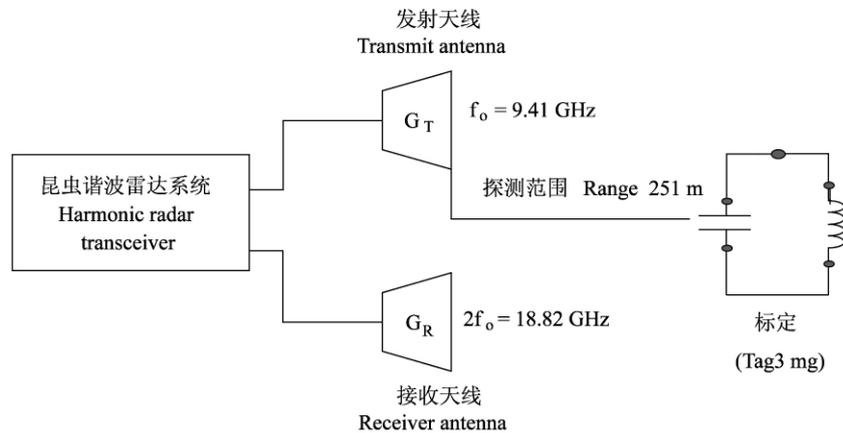


图1 谐波雷达系统和标定(Colpitts and Boiteau, 2004)

Fig. 1 Insect harmonic radar system and tag(Colpitts and Boiteau, 2004)

电子装置标定是利用肖特基二极管(Schottky diode)的特性发展出来的,肖特基二极管能够吸收高频的电磁波的部分能量并反射出二次谐波,由于植物、地物和海洋不产生高次谐波而由它们产生的基波又被抑制,故谐波雷达具有很强的抗杂波能力,其频率就和其他地面物体的反射波区可以分开来。因此谐波雷达用在跟踪昆虫上时需要在昆虫身上安装一个由肖特基二极管等组成的标记,和一般的无线电收发装置不同的是,谐波雷达的标记不需要电池,可以做得很轻很小。这对昆虫的研究非常重要,一般地来说,标定装置要求不明显影响昆虫的正常飞行习性(标定重量不超过昆虫体重10%)(Colpitts *et al.*, 1999; Boiteau and Colpitts, 2001; 蔡志坚和曾理江, 2002)。

昆虫谐波雷达由于比上述常规雷达能够提供更多的信息,例如,昆虫表现为静止不动、原地转动或爬行、飞翔等动作。同时其高次谐波通道自然地抑制了地物海浪杂波,在识别低空扩散飞行、地表步行或洞穴中的昆虫目标时,提取目标极点不受地杂波影响,因而能提供很高的识别概率。这意味着运用谐波雷达技术在探测识别昆虫目标时,即使雷达本身的精度不高也能达到很高的探测识别概率,从而降低了雷达系统的复杂性(顾继慧和陈如山, 2001)。

2 昆虫谐波雷达的发展和利用

美国北达科他州州立大学 Klempel 研究小组(1977),首先开展利用谐波雷达追踪单个昆虫,对螺旋蝇 *Cochliomyia hominivorax* (Coquerel) 飞行行为研究,展示了一个利用谐波雷达追踪单个飞行行为的新手段。但他们研究小组没有建成真正实用意义上昆虫谐波雷达(Barbie, 1978; Shiao, 1978; Boyd, 1979)。

Mascanzoni 和 Wallin 研究小组于 1986 年制造出绑一个电子装置标定在昆虫身体上的手持昆虫谐波雷达,并成功地跟踪了土壤洞穴中的昆虫活动行为,这是一部真正实用意义上昆虫谐波雷达(Mascanzoni and Wallin, 1986)。O'Neal 等人于 2004 年利用昆虫谐波雷达(标定是重量不到 26 mg,天线长度 16 cm)跟踪 *Scarites quadriceps* Chaudoir 和 *Harpalus pennsylvanicus* (DeG.) 2 种步甲,结果表明,这 2 种昆虫活动范围在地下 3~9 cm,但这部雷达可探测到地下 30 cm 深处昆虫目标。主要针对土壤洞穴中活动较慢的昆虫(O'Neal *et al.*, 2004)。

在英国,Riley 研究小组于 1994 年研制一部基站式昆虫谐波雷达,在 X 频带扫描雷达的天线(3.2 cm 波长,1.5 m 直径,发射功率 25 kW,脉冲宽度 0.1 μ s)上方增设一个谐波信号的接收天线(1.6 cm 波长,0.7 m 直径),二者同时以 20 r/min

的转速旋转,可检测 700 m 高度以下的目标昆虫,测定水平距离 900 m 左右。在同年的首次野外观测试验中,目标标定装置是一个总重不到 3 mg、长度 16 mm 的微型天线(可以转动),将其粘在蜜蜂的背部,成功地跟踪了蜜蜂在蜂巢与蜜源之间的飞行(Riley *et al.*, 1996)。

奥地利生物学家弗里施自 1915 年开始与其学生和同事对蜜蜂进行了 50 多年的试验研究,认为蜜蜂之所以能够有条不紊、迅速而敏捷地采到花蜜是因为它可通过舞蹈语言相互交流。大批工蜂出巢采蜜前先派出“侦察蜂”去寻找蜜源,这些“侦察员”一旦发现了有利的采蜜地点或新的优质蜜源植物,它们就会变成采集蜂,并飞回蜂巢跳上一支圆圈舞蹈或“8”字形舞蹈来指出食物的所在地,并以舞蹈的速度表示蜂巢到蜜源之间的距离,还以附在身上的花粉的味道告知食物的种类,通知大家一块儿去采蜜。侦察蜂找到距蜂箱 100 m 以内的蜜源时,即回巢报信,除留有追踪信息外,还在蜂巢上交替性地向左或向右转着小圆圈,以“圆舞”的方式爬行。蜜蜂可以用舞蹈方式指示它的同伴食源的质量、距离和方位。这个研究还让弗里施在 1973 年获得了诺贝尔奖。但关于这种“编码”是怎样被翻译成一种“飞行计划”的却一直没有定量描述,Riley 研究小组于 1996 年,在 *Nature* 发表论文,实验结果显示,蜜蜂确实能够迅速解读舞蹈提供的信息,然后快速飞抵所指示的地点,而且在它们飞向目标的过程中也不会受风向变化的影响。但是它们飞抵的目的地很少是完全正确的,通常离蜜源都有 5 到 6 m 的误差。一旦蜜蜂结束了依指示前行的飞行后会改变飞行模式,它们会进行环绕飞行来寻找精确的蜜源。来来回回的环绕飞行一般要耗上 10 多分钟,正是时差之所在(Riley *et al.*, 1996; 2007)。

Riley 研究小组还研制适于监测采采蝇的、重量低于 1 mg 的微型天线。1997 年,Osborne 等(1999)利用这套昆虫谐波雷达系统,目标标定装置是一个总重不到 12 mg、长度 16 mm 的微型天线,跟踪了蜜蜂取食蜜源范围的飞行行为,研究结果表明,蜜蜂取食距离 70 ~ 631 m,平均(275.3 ± 18.5) m,飞行速度 3.0 ~ 15.7 ms⁻¹。这种雷达也

可应用于鳞翅目成虫的飞行行为研究,他们在瑞典对黄地老虎 *Agrotis segetum* 的观测已获初步成功(Riley *et al.*, 1998)。这种昆虫谐波雷达系统发射功率较大,检测范围较大,针对高速飞行昆虫,但需要有基站,体积大,移动不方便,造价高。

在加拿大,Colpitts 研究小组于 1999 年研制便携式昆虫谐波雷达,并跟踪马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (重量 110 mg) 飞行行为,结果表明,用 4 kW 船用雷达改装的,发射功率 4 kW,发射频率 9.41 GHz,传感器重过 3 mg,天线长度为 16 mm,接收频率 18.82 GHz,探测马铃薯甲虫飞行行为距离为 250 m 左右。这种昆虫谐波雷达系统发射功率较小,检测范围较有基站式雷达小,主要针对地面飞行较快的昆虫,而且这种雷达重量轻,结果简单,便于携带,使用方便,造价较低。目前,正在研制信号计算机数字化处理技术(Colpitts and Boiteau, 2004)。

2004 年,美国农业部林业服务处北美研究站 Williams 等人,曾带来了 1 台便携式昆虫谐波雷达到中国北京,开展一次探测单个光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) (体重 589 ~ 1 652 mg) 飞行行为研究,标定有 2 种,重量分别为 17.6 mg、11.6 mg,天线长度均为 15 cm,由于部分天牛逃走或被杨树遮挡,78% 天牛被探测到,平均移动 3 m·d⁻¹,平均移动距离 14 m,最远超过 90 m,取得较好成果(Williams *et al.*, 2004)。

目前,已有的昆虫谐波雷达分基站式和便携式 2 种类型,发射功率 4 kW 或 25 kW 200 kW,标定重 0.4 ~ 27 mg,天线长度 16 ~ 200 mm,探测距离 0 ~ 1000 m,高度地表上 50 m 至地表下 30 cm 深处,精度和分辨率和普通雷达相同,距离分辨率约为 7 m,角度分辨率约为 3.5 m,昆虫一般重量 12.0 ~ 34 000 mg (Loper and Wolf, 1986; van der Ent, 1989; Hockmann *et al.*, 1989; Wallin, 1991; Kennedy, 1994; Carreck, 1996; Osborne *et al.*, 1997; Reynolds and Riley, 1997; Williams *et al.*, 2000; Svensson *et al.*, 2001; Chapman *et al.*, 2004; Reynolds *et al.*, 2007)。被跟踪昆虫种类涉及鞘翅目、鳞翅目、双翅目、膜翅目和直翅目 5 目 23 种(表 1)

表 1 利用谐波雷达追踪昆虫行为的有关文献
Table 1 Literature of using harmonic radar tracking insect behavior

种类(重量) Species (Weight)	扩散 Dispersal mode	标定重量(天线长度) Tag weight (Length)	参考文献 Reference
1 鞘翅目 Coleoptera			
<i>Pterostichus melanarius</i> (160 mg)	步行 Walking	$(3-8) \times 10^{-3}$ g(20 cm)	Wallin and Ekblom, 1988
<i>P. cupreus</i> (70 mg)	步行 Walking	$(3-8) \times 10^{-3}$ g(20 cm)	Mascanzoni and Wallin, 1986
<i>P. niger</i> (220 mg)	步行 Walking	$(3-8) \times 10^{-3}$ g(20 cm)	Wallin and Ekblom, 1994
<i>Scarites quadriceps</i> (未注明 unknown)			
<i>Harpalus pensylvanicus</i> (未注明 unknown)	步行 Walking	2.6×10^{-2} g(16 cm)	O' Neal <i>et al.</i> , 2004
光肩星天牛 (589 ~ 1 652 mg)		1.76×10^{-2} g(15 cm)	
<i>Anoplophora glabripennis</i>	飞行 Flight	1.16×10^{-2} g(15 cm)	Williams <i>et al.</i> , 2004
黑葡萄耳象 (73 mg) <i>Otiorynchus sulcatus</i>	步行 Walking	2.7×10^{-2} g	Brazee <i>et al.</i> , 2005
猫斑长足瓢虫 (32.2 mg)			
<i>Hippodamia convergens</i>			
异色瓢虫 (18.8 mg)			
<i>Harmonia axyridis</i>			
马铃薯甲虫 (110 mg)	飞行或步行	$(0.55-4) \times 10^{-3}$ g	Boiteau and Colpitts, 2001; 2004;
<i>Leptinotarsa decemlineata</i>	Flight or walking	(16 mm)	Boiteau <i>et al.</i> 2004;2009; 2010
李象鼻虫 (14.1 mg)			
<i>Conotrachelus nenuphar</i>			
玉米根萤叶甲 (12.0 mg)			
<i>Diabrotica virgifera virgifera</i>			
2 鳞翅目 Lepidoptera			
<i>Parnassius sminthius</i> (350 mg)	飞行 Flight	4×10^{-4} g(8 cm)	Roland <i>et al.</i> , 1996
森林天幕毛虫 (200 mg)			
<i>Malacosoma disstria</i>	飞行 Flight	4×10^{-4} g(8 cm)	Caldwell, 1997
<i>Erebia epipsodea</i> (150 mg)			
荨麻蛱蝶 (300 mg)			
<i>Aglais urticae</i>	飞行 Flight	1.2×10^{-2} g(16 mm)	Cant <i>et al.</i> , 2005
孔雀蛱蝶 <i>Inachis io</i> (150 mg)			
黄地老虎 <i>Agrotis segetum</i> (未注明 unknown)	飞行 Flight	$(1-12) \times 10^{-2}$ g(16 mm)	Riley <i>et al.</i> , 1998 Roland <i>et al.</i> , 1996
3 双翅目 Diptera			
<i>Arachnidomyia aldrichi</i> (55 mg)	飞行 Flight	4×10^{-4} g(8 cm)	Roland <i>et al.</i> , 1996
<i>Patelloa pachypyga</i> (45 mg)			
4 膜翅目 Hymenoptera			
欧洲熊蜂 <i>Bombus terrestris</i> (50 mg)	飞行	$(1-12) \times 10^{-4}$ g	Riley and Smith, 2002; Osborne <i>et al.</i> , 1999;
意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera</i> (50 mg)	Flight	(16 mm)	Capaldi <i>et al.</i> , 2000; Riley <i>et al.</i> , 1996, 2003; Riley and Osborne, 2001
5 直翅目 Orthoptera			
<i>Motuweta isolata</i> (8.6-34 g)	步行 Walking	1.7 g (未注明 unknown)	Stringer and Chappell, 2008

3 昆虫谐波雷达的局限性

自 20 世纪 70 年代出现昆虫谐波雷达以来, 尽管随着材料科学和谐波雷达技术的发展, 昆虫谐波雷达技术发展取得了长足的进步, 但是, 它还不是非常成熟, 存在一定局限性。同样利用昆虫谐波雷达跟踪昆虫运动目标也存在一些限制。

目前昆虫谐波雷达产品, 因为只有一个发射频率, 理论上只能跟踪 1 个昆虫运动目标, 不能同时跟踪 2 个或 2 个以上昆虫运动目标。但是便携式昆虫谐波雷达通过标记昆虫、转换跟踪角度和设置时间差异, 可以同时跟踪 30 个以上目标。基站式较困难。由于昆虫谐波雷达接发频率限制, 更换电池(便携式)和障碍物遮挡, 跟踪茂密的植物中目标时, 常有中断信号现象; 探测距离 0 ~ 1 000 m, 高度地上 50 m 至地表下 30 cm 深处, 一些昆虫目标容易逃逸出跟踪范围。电子装置标定技术含金量高, 它的制造是昆虫谐波雷达系统中最关键的技术, 在一些研究中, 昆虫体重微小、重量轻, 要求标定重量极轻、天线长度极短, 标定重量一般不超过昆虫体重 10%、天线长度和重量不能影响昆虫正常行为; 标定重量和天线长度与探测距离时有矛盾, 天线长度增长, 探测距离范围扩大, 但标定重量增加, 又影响了昆虫正常行为; 制造重量极轻的标定常常受材料和加工技术限制。标定被粘在昆虫身体上, 由于昆虫运动、昆虫撕咬、与其它物体摩擦或碰撞, 标定或标定的微型天线易受损或脱落, 也可能导致跟踪目标消失。目前研究昆虫主要集中在昆虫成虫或若虫形态, 因为昆虫存在变态现象, 其它虫态如幼虫, 或昆虫各个虫态按生活史全程顺序跟踪, 目前还不能进行。

昆虫谐波雷达研制正处在发展阶段, 随着无线微型传感器网关技术、材料科学和芯片技术的发展, 上述限制会逐渐克服(陈帅等 2006)。

4 展望

利用谐波雷达跟踪昆虫主要用在研究昆虫的对食物或寄主的定向、对配偶的定向、对巢穴的定向(包括越冬场所)和对迁飞路线(短距离)的等定向行为和习性。并能够区分依靠哪一种感觉类型, 如嗅觉定向、听觉定向、视觉定向和磁场定向。还能够区分依靠哪一种感觉能力, 如有趋光性、趋化性、趋温性、趋湿性。在实际应用到食饵诱杀、

灯光诱集、忌避剂、引诱剂、熏蒸剂、产卵抑制剂和杀虫剂(对象为飞行或步行能力较强的成虫、若虫)等方面效果评价。

通过利用昆虫谐波雷达技术研究在田间自然状态下昆虫的飞行模式, 为昆虫食饵诱杀、灯光诱集、忌避剂、引诱剂、熏蒸剂、产卵抑制剂和杀虫剂等研究、开发和利用提供一种新方法和理论基础, 为更好理解其作用机制和害虫防治提供新的视野, 为农业害虫无公害治理研究提供一种新的方法。还可以利用昆虫具有异常灵敏的嗅觉能够记住大量不同的气味特性, 携带标定同时, 也带回一些化学物质(如花粉), 它可以准确探测出生物武器所在位置。

目前国外常见昆虫雷达种类有: 扫描昆虫雷达、昆虫追踪雷达、昆虫垂直监测雷达、机载昆虫雷达、船载昆虫雷达、双极化多普勒昆虫雷达、8.8 mm 扫描昆虫雷达、昆虫谐波雷达。在中国, 1984 年吉林省农科院植保所的我国第 1 台扫描昆虫雷达; 后来, 中国农科院植保所的我国第 2 台扫描昆虫雷达、我国第 1 台毫米波扫描昆虫雷达和我国第 1 台垂直监测昆虫雷达; 南京农业大学也拥有 1 台多普勒昆虫监测雷达(翟保平, 1999)。但在目前, 我国没有昆虫谐波雷达。2008 年 8 月, 笔者曾赴加拿大做访问学者 1 年, 主要与有关国外专家(包括雷达发明也是制造者、测试及应用合作者)开展技术交流; 并在田间利用昆虫谐波雷达和在实验室利用录像系统研究马铃薯叶甲在饥饿的状况下搜索行为。不久作者将昆虫谐波雷达引进到我国, 同时希望国内更多学者参与昆虫谐波雷达研制和利用, 为农林业害虫综合治理研究服务。

参考文献(References)

- Barbie S, 1978. Optimisation of harmonic microwave reflection from Schottky varactor diodes, M. Sc. thesis, State University of North Dakota, Fargo, North Dakota, USA.
- Boiteau G, Colpitts BG, 2001. Electronic tags for the tracking of insects in flight: Effect of weight on flight performance of adult Colorado potato beetles. *Ent. Exp. App.*, 100: 187—193.
- Boiteau G, Colpitts BG, 2004. The potential of portable harmonic radar technology for the tracking of beneficial insects. *In. J. Pest*, 50: 233—242.
- Boiteau G, Meloche F, Vincent C, Leskey TC,

2009. Effectiveness of glues used for harmonic radar tag attachment and impact on survival and behavior of three insect pests. *Environ. Entomol.*, 38:168—175.
- Boiteau G, Vincent C, Meloche F, Leskey TC, 2010. Harmonic radar: Assessing the impact of tag weight on walking activity of Colorado potato beetle, plum curculio and corn rootworm. *J. Econ. Entomol.*, 103: 63—69.
- Boyd LE, 1979. Realisation of a harmonic radar for insect tracking, M. Sc. thesis, State University of North Dakota, Fargo, North Dakota, USA.
- Brazeal RD, Miller ES, Reding ME, Klein MG, Nudd B, Zhu H, 2005. A transponder for harmonic radar tracking of the black vine weevil in behavioral research. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng. B*, 48: 831—838.
- 蔡志坚, 曾理江, 2002. 昆虫运动的跟踪技术. *光学技术*, 28(3): 217—219.
- Caldwell M, 1997. The wired butterfly: the world's tiniest radar tags are making a Rocky Mountain butterfly and its ecology a lot easier to follow. *Discover*, 40: 40—48.
- Cant ET, Smith AD, Reynolds DR, Osborne JL, 2005. Tracking butterfly flight paths across the landscape with harmonic radar. *Proc. Roy. Ent. Soc. Lond. B*, 272: 785—790.
- Capaldi EA, Smith AD, Osborne JL, Fahrbach SE, Farris SM, Reynolds DR, Edwards AS, Martin A, Robinson GE, Poppy GM, Riley JR, 2000. Ontogeny of orientation flight in the honeybee revealed by harmonic radar. *Nature*, 403: 537—540.
- Carreck NL, 1996. The use of harmonic radar to track flying bees. *Bee Craft*, 78(4): 104—109.
- 陈帅, 钟先信, 石军锋, 廖晓纬, 2006. 无线微型传感器网关研究. *自动化仪表*, 27(4): 27—28.
- Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, 2004. Migratory and foraging movements in beneficial insects: a review of radar monitoring and tracking methods. *In. J. Pest*, 50: 225—232.
- Colpitts BG, Boiteau G, 2004. Harmonic radar transceiver design: miniature tags for insect tracking. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52: 2825—2832.
- Colpitts BG, Luke DM, Boiteau G, 1999. Harmonic radar identification tag for insect flight pattern tracking. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 602—605.
- 顾继慧, 陈如山, 2001. 谐波雷达目标识别研究. *现代雷达*, 1: 17—24.
- Hockmann P, Schlomberg P, Wallin H, Weber F, 1989. Patterns of movement and orientation of the carabid beetle *Carabus auronitens* in a Westphalian oak-hornbeam forest (radar tracking and recapture experiments). *Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde*, 51(1): 1—71.
- Kennedy PJ, 1994. The distribution and movement of ground beetles in relation to set-aside arable land // Desender K, Dufrière M, Loreau M, Luff ML, Maelfait JP (eds.). *Carabid Beetles: Ecology and Evolution*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 439—444.
- Klempe DD, 1977. A harmonic radar for tracking individual insects, M. Sc. thesis, State University of North Dakota, Fargo, North Dakota, USA.
- Loper GM, Wolf WW, 1986. Using the USDA-ARS insect radar to monitor honey bee drone activity. *Am. Bee J.*, 126(12): 832.
- Mascanzoni D, Wallin H, 1986. The harmonic radar: a new method of tracing insects in the field. *Ecol. Ent.*, 11: 387—390.
- O'Neal ME, Landis DA, Rothwell E, Kempel L, Reinhard D, 2004. Tracking insects with harmonic radar: a case study. *Am. Ent.*, 50: 212—218.
- Osborne JL, Clark SJ, Morris RJ, Williams IH, Riley JR, Smith AD, Reynolds DR, Edwards AS, 1999. A landscape-scale study of bumble bee foraging range and constancy, using harmonic radar. *J. Appl. Ecol.*, 36: 519—533.
- Osborne JL, Williams IH, Carreck NL, Poppy GM, Riley JR, Smith AD, Reynolds DR, Edwards AS, 1997. Harmonic radar: a new technique for investigating bumblebee and honey bee foraging flight. *Act. Hort.*, 437: 159—163.
- Reynolds AM, Smith AD, Reynolds DR, Carreck NL, Osborne JL, 2007. Honeybees perform optimal scale-free searching flights when attempting to locate a food source. *J. Exp. Biol.*, 210: 3763—3770.
- Reynolds DR, Riley JR, 1997. Flight behaviour and migration of insect pests. Radar studies in developing countries. *NRI Bulletin*, 71: 114.
- Riley JR, Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, 2007. Recent applications of radar to Entomology. *Outlooks on Pest Management*, 18(2): 62—68.
- Riley JR, Greggers U, Smith AD, Stach S, Reynolds DR, Stollhoff N, Brandt R, Schaupp F, Menzel R, 2003. The automatic pilot of honeybees. *Proc. Royal Soc. London B*, 270: 2421—2424.
- Riley JR, Osborne JL, 2001. Flight trajectories of foraging insects: observations using harmonic radar // Woiwod IP,

- Reynolds DR , Thomas CD (eds.). Insect Movement: Mechanisms and Consequences. CAB International , Wallingford , UK. 129—157.
- Riley JR , Smith AD , 2002. Design considerations for an harmonic radar to investigate the flight of insects at low altitude. *Comput. Electron. Agr.* , 35(2/3) : 151—169.
- Riley JR , Smith AD , Reynolds DR , Edwards AS , Osborne JL , Williams IH , Carreck NL , Poppy GM , 1996. Tracking bees with harmonic radar. *Nature* , 379: 29—30.
- Riley JR , Valeur P , Smith AD , Reynolds DR , Poppy G , Löfsted C , 1998. Harmonic radar as a means of tracking the pheromone-finding and pheromone following flight of male moths. *J. Insect Behaviour* , 11: 287—96.
- Roland J , McKinnon G , Backhouse C , Taylor PD , 1996. Even smaller radar tags for insects. *Nature* , 381: 120.
- Schaefer GW , 1969. Radar studies of locust , moth and butterfly migration in the Sahara. *Proc. Roy. Ent. Soc. Lond. C* 34: 39—40.
- Shiao JA , 1978. Solutions to problems associated with harmonic radar tracking of individual insects , M. Sc. thesis , State University of North Dakota , Fargo , North Dakota , USA.
- Stringer I , Chappell R , 2008. Possible rescue from extinction: transfer of a rare New Zealand tussock weta to islands in the Mercury group. *J. Insect Conserv.* , 12: 371—382.
- Svensson G , Valeur PG , Reynolds DR , Smith AD , Riley JR , Baker TC , Poppy GM , Lofstedt C , 2001. Mating disruption in *Agrotis segetum* monitored by harmonic radar. *Ent. Exp. Appl.* , 101: 111—121.
- van der Ent LJ , 1989. Individual walking-behaviour of the carabid *Carabus problematicus* Herbst in a Dutch forest has been recorded by a radar-detection-system. *Neth. J. Zool.* , 39(1/2) : 104.
- Wallin H , 1991. Movement patterns and foraging tactics of a caterpillar hunter inhabiting alfalfa fields. *Funct. Ecol.* , 5: 740—749.
- Wallin H , Ekbohm B , 1988. Movements of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) inhabiting cereal fields: A field tracing study. *Oecologia* , 77: 39—43.
- Wallin H , Ekbohm B , 1994. Influence of hunger level and prey densities on movement patterns in three species of Pterostichus beetles (Coleoptera: Carabidae). *Environ. Entomol.* , 23: 1171—1181.
- Williams DW , Li G , Gao R , 2004. Tracking movements of individual *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) adults: application of harmonic radar. *Environ. Entomol.* , 33: 644—649.
- Williams IH , Osborne JL , Riley JR , Smith AD , Reynolds D R , Carreck NL , Poppy GM , 2000. Harmonic radar: progress in using this new technique to study bee flight// O' Toole C (ed.). Proceedings of the Sixth International Conference on Apiculture in Tropical Climates , Costa Rica , International Bee Research Association. 135—139.
- 翟保平 , 1999. 追踪天使—雷达昆虫学 30 年. *昆虫学报* , 43(2) : 315—326.