

# 昆虫监测雷达精细测量技术

胡 程<sup>1,2,3</sup>, 王 锐<sup>1,2,3\*</sup>, 李卫东<sup>1,2,3</sup>, 王江涛<sup>1</sup>, 叶子涵<sup>1</sup>,  
蔡 炯<sup>1</sup>, 姜 琦<sup>1,2</sup>, 张济川<sup>1</sup>, 谭荔嘉<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学前沿技术研究院, 山东济南 250300;  
3. 国家盐碱地综合利用技术创新中心, 山东东营 257300)

**摘 要:** 昆虫迁飞是虫害跨区域暴发与病害大规模流行的重要因素, 造成严重的粮食损失、环境污染、生物安全等问题, 迁飞昆虫监测对粮食安全、物种入侵生物安全等国家战略具有重大意义. 昆虫监测雷达是专用于探测迁飞昆虫的雷达系统, 相较于空中网捕、高空灯诱等传统监测手段, 雷达能够对迁飞昆虫进行全天候、全天时、广域范围的非侵入式监测, 成为当前研究和监测昆虫迁飞最有效的技术手段之一, 已发现聚集成层、共同定向等很多昆虫群体迁飞现象和规律. 但昆虫迁飞研究至今仍是世界性难题, 是《Science》公布 125 个科学难题之一. 要破解昆虫迁飞未解之谜, 国际昆虫学领域专家普遍认为首先要对昆虫迁飞个体进行轨迹分析与种类辨识. 其中, 轨迹分析的核心是测量昆虫个体头部朝向等行为学参数, 种类辨识的核心是测量昆虫个体体长、体宽、振翅频率等生物学参数. 然而, 昆虫体型从毫米至厘米级分布, 跨度大, 散射特性覆盖瑞利区至谐振区, 散射特性复杂; 昆虫个体雷达散射截面积 (Radar Cross Section, RCS) 低至  $-70$  dBsm, 回波信号微弱, 信噪比极低, 振翅回波信号更微弱. 因此, 传统雷达难以实现行为学和生物学参数的精细测量. 为此, 课题组开展了雷达谐振区微弱目标测量技术研究, 提出了谐振区全极化多视角昆虫三维朝向测量、谐振区多频点全极化特征映射的昆虫尺寸测量、极弱微动回波增强的昆虫振翅频率测量等系列方法, 攻克了昆虫头部朝向、体长、体宽、振翅频率等个体参数精确测量难题, 并在此基础上研发了新一代昆虫个体监测雷达系统, 首次实现了昆虫个体三维头部朝向、体长、体宽等参数测量, 大幅提升了昆虫振翅频率测量精度. 目前, 该系统已布设于我国山东东营国家级农高区——北方重要迁飞通道途径地, 并开展业务观测, 为迁飞昆虫行为机理研究和重大虫害预警防控提供重要技术和数据支撑.

**关键词:** 昆虫个体监测雷达; 谐振区测量; 头部朝向; 体型尺寸; 振翅频率

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.31727901)

**中图分类号:** TN959.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)12-4216-15

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20250883

## Fine Measurement Technology of Insect Monitoring Radar

HU Cheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Rui<sup>1,2,3\*</sup>, LI Wei-dong<sup>1,2,3</sup>, WANG Jiang-tao<sup>1</sup>, YE Zi-han<sup>1</sup>,  
CAI Jiong<sup>1</sup>, JIANG Qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-chuan<sup>1</sup>, TAN Li-jia<sup>1</sup>

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Advanced Technology Research Institute, Beijing Institute of Technology, Jinan, Shandong 250300, China;

3. National Center of Technology Innovation for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying, Shandong 257300, China)

**Abstract:** Insect migration is a key factor in the cross-regional outbreak of pests and the large-scale spread of diseases, leading to severe issues such as crop loss, environmental pollution, and biosecurity threats. Monitoring migratory insects is therefore of great significance for national strategies on food security and invasive species biosecurity. Entomological radar is a specialized radar system designed for detecting migratory insects. Compared to traditional methods such as aerial net trapping and high-altitude light trapping, radar enables all-weather, all-day, non-invasive, and wide-area monitoring of migratory insects, making it one of the most effective technical means for studying and monitoring insect migration. It has already revealed many collective migration phenomena and patterns, such as layer formation and common orientation. However, research on insect migration remains a global challenge and is listed as one of the 125 scientific puzzles by journal Sci-

ence. To unravel the mysteries of insect migration, international entomology experts generally agree that the first step is to realize flight trajectory analysis and species identification of individual insect. The core of trajectory analysis lies in measuring behavioral parameters such as insect head orientation, while species identification relies on measuring biological parameters such as body length, body width, and wingbeat frequency. Nevertheless, insects vary widely in size from millimeters to centimeters, covering scattering regimes from Rayleigh to resonance regions, resulting in complex scattering characteristics. Their radar cross-section (RCS) can be as low as  $-70$  dBsm, yielding extremely weak echo signals with very low signal-to-noise ratios, and wingbeat echoes are even weaker. Consequently, conventional radar systems struggle to achieve precise measurements of behavioral and biological parameters. To address this, our research group has conducted studies on weak-target measurement technology in the resonance region. We have proposed a series of methods, including full-polarization multi-aspect 3D orientation estimation for insects in the resonance region, insect size measurement via multi-frequency full-polarization feature mapping, and wingbeat frequency measurement via extremely weak micro-Doppler echo enhancement. These approaches have overcome the challenges in accurately measuring individual parameters such as head orientation, body length, body width, and wingbeat frequency. Building on this, we have developed a new-generation insect individual monitoring radar system, achieving for the first time the measurement of 3D head orientation, body length, and body width, while significantly improving the accuracy of wingbeat frequency measurement. Currently, this system has been deployed in Dongying, Shandong—a national agricultural high-tech zone and a key pathway in northern China's migration corridor—and is operating for routine observation. It provides essential technological and data support for research on insect migration behavior and early-warning control of major pest outbreaks.

**Key words:** entomological radar for individual monitoring; resonance region measurement; orientation; body size; wingbeat frequency

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.31727901)

## 1 引言

迁飞是昆虫为规避不良环境、寻求生存资源而进化出的一种适应性行为,同时也是导致虫害跨区域暴发与病害大规模流行的重要因素,严重威胁粮食安全生产<sup>[1,2]</sup>。据统计,全球农作物因病虫害草害导致的产量损失超过40%<sup>[3,4]</sup>,其中虫害占据主导地位<sup>[3]</sup>。受东亚季风气候影响,我国是迁飞性害虫发生与危害最为严重的国家之一<sup>[5-9]</sup>。在最新认定的全国一类害虫名录中,10种中有8种属于迁飞性种类,凸显其防控重要性。目前,化学农药依然是虫害防治的最主要方式,中国每年的农药用量约占全球的14%<sup>[10]</sup>,长期大量使用农药不仅带来了严峻的食品安全、环境污染问题,也加剧了害虫的抗药性。因此,积极推进绿色防控技术的研发与应用,已成为保障农业可持续发展的迫切需求。在此背景下,构建高效的迁飞昆虫监测体系,实现虫情实时追踪与早期预警,对于在虫害初期采取精准控制措施、减轻损失具有重要意义<sup>[11]</sup>。

此外,昆虫迁飞还存在许多未解之谜,迁飞个体监测仍是世界性难题。《Science》公布125个科学难题之一就是“迁徙生物怎样发现其迁移路线”<sup>[12,13]</sup>,《Science》迁徙专刊提到如果不能从群体行为中分离出个体行为,昆虫迁飞将始终难以被理解<sup>[14,15]</sup>。因此,亟待建立迁飞昆虫个体精细测量技术体系。

雷达因其全天时、全天候的优势被广泛应用在目标遥感探测、成像、识别等领域<sup>[16,17]</sup>。昆虫监测雷达是

专用于探测迁飞昆虫的雷达系统,通过发射电磁波并接收目标昆虫的散射回波,获取其数量、飞行方向等关键信息<sup>[18,19]</sup>。相较于空中网捕、高空灯诱等传统监测手段,雷达能够对迁飞昆虫进行全天时、全天候、广域范围的非侵入式监测,成为当前研究和监测昆虫迁飞最有效的技术手段之一<sup>[2]</sup>。自20世纪60年代起,雷达技术逐步应用于昆虫迁飞监测,并陆续发展出扫描昆虫雷达、垂直昆虫雷达等多种型号专用昆虫雷达<sup>[20]</sup>。早期昆虫雷达主要为扫描昆虫雷达,采用抛物面天线、机械扫描体制,通过在数个固定仰角进行大范围方位扫描,可测量数公里范围内昆虫的空间分布,结合昆虫头尾部和身体侧面的散射差异,可获取群体迁飞昆虫的共同定向,然而,该体制操作和数据处理费时费力,难以长时间业务运行。20世纪90年代研制成功的垂直观测昆虫雷达(Vertical-Looking Radar, VLR),采用“垂直指向-线性极化-圆锥扫描”的雷达体制,即天线垂直向上发射线极化波,波束相对垂直轴偏离很小的角度并进行快速圆锥扫描,通过圆锥扫描波束对飞行昆虫的调制效应,可解算昆虫的飞行方向、速度、体重等参数。该型昆虫雷达首次实现了无人值守自动运行,迅速在多个国家推广应用。基于传统昆虫雷达,已发现很多昆虫群体迁飞现象和规律,取得多项重大成果,如发现多种昆虫的宏观迁飞现象、虫群聚集成层和共同定向行为等,在多篇Nature、Science正刊论文中报道,推动了昆虫迁飞学的发展<sup>[1,2]</sup>。但传统昆虫监测雷达的距离分辨

率介于数十米至 7.5 m 之间,仅能区分间距大于分辨率的个体<sup>[21,22]</sup>. 在迁飞高峰期,昆虫常呈高密度集群迁飞,导致现有雷达难以分辨单个个体,限制了对个体行为的精细观测.

对于昆虫个体监测,国际迁飞昆虫学领域专家普遍认为,首先要对迁飞昆虫个体进行轨迹分析与种类辨识,以揭示昆虫迁飞动力学行为机制、空中生态群落结构等现象与规律<sup>[2,14,15]</sup>. 其中,轨迹分析的核心是测量昆虫个体头部朝向<sup>[23]</sup>,而种类辨识的核心是测量昆虫个体体型尺寸、振翅频率等参数<sup>[2]</sup>. 然而,现有雷达技术在昆虫个体朝向、尺寸与振翅频率等参数的精细测量方面面临重大技术挑战. 雷达目标测量与目标散射截面积(Radar Cross Section, RCS)密切相关. 根据目标尺寸与雷达波长之间的比例关系,目标散射特性通常分为瑞利区、谐振区和光学区,分别对应尺寸远小于、接近及远大于波长的情况. 瑞利区与光学区内, RCS 随尺寸波长之比变化较为简单,因此现有雷达系统通常在这两个区域进行探测;而在谐振区, RCS 随该比例呈复杂振荡特性,极难处理<sup>[24]</sup>. 昆虫体长范围覆盖毫米到厘米量级,尺寸差异可达数十倍,其雷达散射特性覆盖瑞利区至谐振区<sup>[25,26]</sup>,电磁散射回波复杂,极大增加了昆虫个体朝向和体型尺寸测量的难度<sup>[27]</sup>. 此外,昆虫个体普遍较小, RCS 可低至 $-70$  dBsm<sup>[26,28]</sup>,回波信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)低,而振翅信号比虫体回波还弱 1~2 个数量级,使得昆虫振翅频率的提取极难. 因此,要研制昆虫个体精细测量雷达,必须攻克雷达谐振区微弱目标测量难题.

针对昆虫尺寸处于传统雷达难以测量的谐振区难题,团队依托国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)“面向动物迁飞机理分析的高分辨多维协同雷达测量仪”,攻克了雷达谐振区微弱目标测量难题,提出了昆虫个体精细测量系列方法<sup>[27-39]</sup>,成功研发了新一代昆虫个体监测雷达系统

——高分辨多维协同雷达测量仪<sup>[20,40]</sup>,仪器主要包含 1 部高分辨相控阵雷达与 3 部多频段全极化雷达,首次实现了昆虫三维朝向、体长、体宽测量,并大幅提高了振翅频率测量成功率与精度,推动昆虫雷达监测由群体粗略监测进入个体精细化测量新时代. 本文旨在对上述系统和方法进行介绍,以期对相关领域研究者提供有益参考.

## 2 谐振区微弱目标测量

### 2.1 谐振区全极化多视角昆虫三维朝向测量

雷达极化对目标姿态高度敏感,因此利用极化信息可实现目标姿态测量<sup>[41]</sup>. 传统昆虫朝向测量利用 VLR 的单站非相旋转线极化测量实现<sup>[20,21]</sup>,即通过天线周期性旋转带动极化方向旋转,获取昆虫在不同极化方向( $360^\circ$ )下的 RCS,从而形成极化方向图[图 1(a)、图 1(c)],然后基于“极化方向与昆虫体轴平行时 RCS 最大”的假设提取昆虫朝向[图 1(a)]<sup>[21]</sup>,但该方法仅对处于瑞利区的小昆虫有效. 在瑞利区,极化方向平行体轴时的 RCS(记为 $\sigma_L$ )始终大于垂直体轴的 RCS(记为 $\sigma_W$ ),因此最大 RCS 方向即为朝向. 但随着昆虫尺寸波长比增大,散射逐渐进入谐振区,此时 $\sigma_L$ 与 $\sigma_W$ 随频率呈现复杂振荡特性,二者大小关系不再稳定[图 1(b)]. 在此情况下,若仍采用最大 RCS 方向作为朝向估计,可能导致 $90^\circ$ 错误[图 1(c)]<sup>[27,31]</sup>.

此外,目标完整的空间朝向应包含方位角和俯仰角,即三维朝向. 在单视角观测下,雷达测得的昆虫朝向实际上是三维朝向在雷达极化平面上的投影方向,通常称为二维朝向<sup>[30,41]</sup>. VLR 在垂直对天观测时极化平面与水平面平行,因此所测量的朝向实质上是昆虫三维朝向在水平面的投影方向,即三维朝向的方位角分量. 然而,昆虫飞行能力有限,极易受到气流扰动,导致姿态表现出较强的随机性,仅方位测量难以全面反映其飞行定向特征.

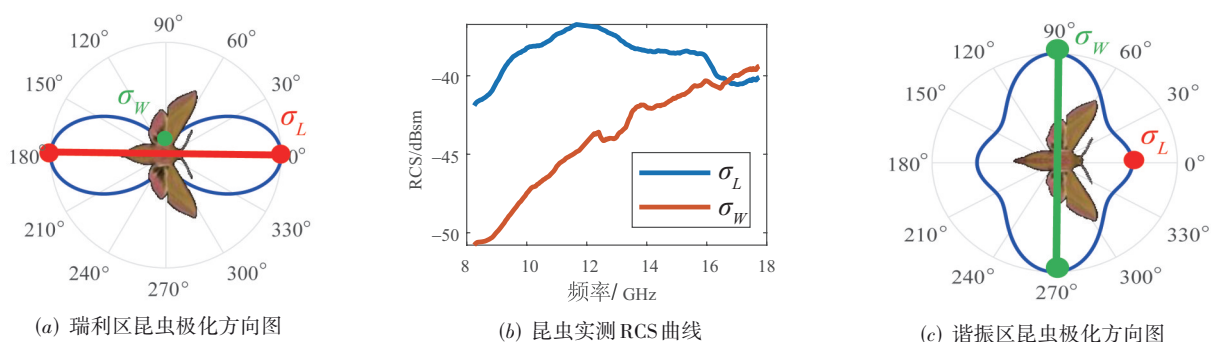


图1 传统昆虫朝向测量原理及挑战

针对谐振区散射导致的 $90^\circ$ 错误和三维朝向测量难题,团队提出了一种基于多视角全极化雷达协同观

测的昆虫三维朝向测量方法. 该方法首先利用全极化测量获取昆虫最大 RCS 方向,得到二维朝向初步估

计<sup>[29]</sup>;其次,发现极化方向平行体轴时的回波相位通常滞后于垂直体轴时的回波相位,基于此实现对二维朝向初步估计结果的判别校正<sup>[31]</sup>;最后,通过多视角协同观测,重构昆虫三维朝向<sup>[30]</sup>.

首先提取昆虫最大 RCS 方向获取昆虫二维朝向估计. 多频段全极化雷达可测量目标的散射矩阵(Scattering Matrix, SM),最优极化理论指出,雷达极化状态与目标 SM 主特征向量匹配时,可实现最大回波功率,基于此,可从 SM 中提取最大 RCS 方向<sup>[19,29]</sup>. 假设雷达测量的昆虫 SM 为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $s_{ij}(i, j = h, v)$  表示以  $j$  极化发射,  $i$  极化接收时的散射幅相,对于单基地雷达,有  $s_{hv} = s_{vh}$ .

由式(1)可计算 SM 的 2 个特征值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ , 不失一般性,假设  $|\mu_1| \geq |\mu_2|$ . 同时,主特征值  $\mu_1$  对应的主特征向量可以表示为

$$\mathbf{v}_1 = \frac{1}{\sqrt{\kappa^2 + 1}} \begin{bmatrix} \kappa \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$\kappa = \frac{S_{hv}}{\mu_1 - S_{hh}} \quad (3)$$

将  $\mathbf{v}_1$  用椭圆极化形式表示即可得到目标最大 RCS 对应的极化方向:

$$\alpha_m = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \right]}{\operatorname{Re} \left[ \frac{\kappa}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \right]} \right\} \quad (4)$$

其中,  $\operatorname{Re}$  表示取实部. 须知当  $\mu_1 - s_{11} = 0$  时,式(4)不再成立,此时  $\alpha_m$  为 0.

$\alpha_m$  即为昆虫二维朝向的初步估计值. 对于瑞利区小昆虫,  $\alpha_m$  即为朝向;而对于谐振区大昆虫,  $\alpha_m$  可能与朝向相差  $90^\circ$ . 因此,还需进一步进行朝向判别,以获取真实的昆虫二维朝向.

多频段全极化雷达为相参雷达,可获取目标的相位信息. 对昆虫的相位特性分析发现,无论在瑞利区还是谐振区,极化方向平行昆虫体轴时的回波相位始终滞后于垂直时的回波相位,为昆虫二维朝向判别提供了依据<sup>[27,31]</sup>. 昆虫 SM 的两个特征值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ ,本质上为极化方向平行于垂直昆虫体轴时的散射幅相. 因此,在实际测量中可利用它们的相对相位  $\Delta\varphi$  实现二维朝向判别<sup>[31]</sup>.  $\Delta\varphi$  定义为

$$\Delta\varphi = \arg \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right) \quad (5)$$

其中,  $\arg(\cdot) \in [-\pi, \pi]$  表示取相位运算. 当  $\Delta\varphi < 0$  时,意味着大特征值对应的散射相位滞后于小特征值对应

的散射相位,因此大特征值为极化方向平行体轴时的散射特征,最大 RCS 方向即为真实朝向;反之,  $\Delta\varphi > 0$  表明大特征值为极化方向垂直体轴时的散射特征,最大 RCS 方向与真实朝向相差  $90^\circ$ . 由此,可对初估二维朝向判别,得到最终二维朝向估计  $\theta$ :

$$\theta = \begin{cases} \alpha_m, & \Delta\varphi < 0 \\ \alpha_m + 90^\circ, & \Delta\varphi > 0 \end{cases} \quad (6)$$

接下来通过多角度二维朝向融合重构昆虫三维朝向. 图 2 展示了三维朝向测量的几何关系. 其中:  $\mathbf{h}_r$ 、 $\mathbf{v}_r$ 、 $\mathbf{l}_r$  分别表示第  $r$  部多频段全极化雷达的 H 极化、V 极化,以及雷达视线(Line Of Sight, LOS)方向的单位矢量;  $\mathbf{x}$  为昆虫三维朝向的单位方向矢量;  $\theta_r$  为第  $r$  部雷达测得的昆虫二维朝向,即  $\mathbf{x}$  在极化平面上的投影与  $\mathbf{h}_r$  的夹角. 由  $\mathbf{x}$  与  $\mathbf{l}_r$  张成的平面称为投影平面,其法向量为  $\mathbf{d}_r$ .

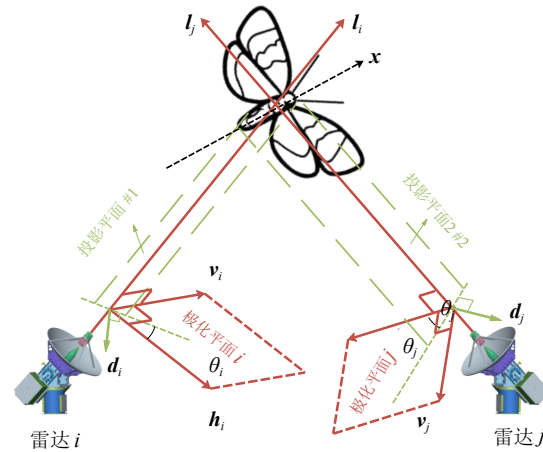


图 2 昆虫三维朝向测量示意

多频段全极化雷达的伺服顺时针旋转为方位增加方向. 当其伺服方位角为  $0^\circ$ , 俯仰角为  $90^\circ$  时,水平极化方向为正东,垂直极化方向为正北. 基于此,以正东为 X 轴正方向,正北为 Y 轴正方向,垂直对天为 Z 轴正方向建立一个全局直角坐标系. 那么当第  $r$  部雷达伺服方位角为  $\omega_r$ , 俯仰角为  $\gamma_r$  时,可直接得到其极化方向和 LOS 的矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{h}_r = [\cos(\omega_r) & -\sin(\omega_r) & 0] \\ \mathbf{v}_r = [\sin(\gamma_r)\sin(\omega_r) & \sin(\gamma_r)\cos(\omega_r) & -\cos(\gamma_r)] \\ \mathbf{l}_r = [\cos\gamma_r\sin\omega_r & \cos\gamma_r\cos(\omega_r) & \sin\gamma_r] \end{cases} \quad (7)$$

由图 2 所示几何关系可知,投影平面法向量  $\mathbf{d}_r$  可通过  $\mathbf{h}_r$ 、 $\mathbf{v}_r$  以及二维朝向  $\theta_r$  确定:

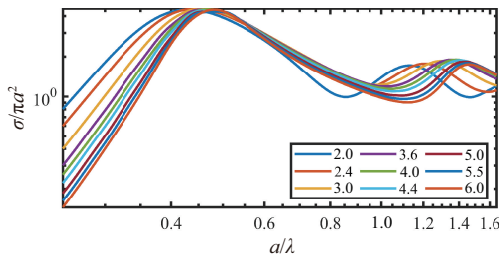
$$\mathbf{d}_r = \sin\theta_r \cdot \mathbf{h}_r + \cos\theta_r \cdot \mathbf{v}_r \quad (8)$$

那么两个不共线的法向量  $\mathbf{d}_i$  与  $\mathbf{d}_j$  (如图 2 所示) 通过叉乘即得到投影平面交线,即昆虫三维朝向<sup>[30]</sup>:

$$\mathbf{x} = \mathbf{d}_i \times \mathbf{d}_j \quad (9)$$

## 2.2 谐振区多频点全极化特征映射的昆虫尺寸测量

传统昆虫雷达不具备昆虫体长、体宽等尺寸参数测量能力. 在雷达目标尺寸测量领域,不同散射区的目标通常采用不同测量方法. 对于尺寸大于雷达分辨率的扩展目标,多基于雷达分辨测量,通过发射大带宽信号对目标尺寸直接高分辨测量;对于尺寸小于雷达分辨率的点目标,通常将其简化为球形散射体,并基于球体 RCS 与尺寸之间的线性关系,通过测量 RCS 间接反演目标尺寸<sup>[42]</sup>. 然而,昆虫体长范围覆盖毫米到厘米量级,尺寸差异可达数十倍,其散射特性覆盖了瑞利区至谐振区,使得传统方法面临严峻挑战. 一方面,目标谐振区 RCS 随频率呈复杂振荡特性,导致传统瑞利区基于 RCS 线性反演尺寸的方法失效;另一方面,昆虫实际形态通常更接近椭球体而非理想球体,不同体轴比椭球 RCS 曲线存在显著差异(图 3),进一步导致基于球形假设的尺寸反演模型无法准确适配复杂的椭球体形态昆虫.



注:图中  $a$  表示椭球长轴长度, $\lambda$  为雷达波长, $\sigma$  表示 RCS

图 3 不同体轴比椭球 RCS 曲线仿真结果

针对上述问题,团队提出了一种基于多频点全极化特征映射的昆虫尺寸(体长、体宽)反演方法. 由于昆虫形态差异导致其 RCS 曲线不同,只有多频观测才能提供足够的曲线采样信息. 多频段全极化雷达可在五个工作频点对目标开展全极化测量,将实测多频点 RCS 与已知不同形态昆虫的多频 RCS 数据进行匹配,理论上即可实现体长与体宽反演.

因此,团队在微波暗室中搭建了昆虫多频点 SM 测量系统,对 159 头昆虫在 8~18 GHz 范围内的 SM 进行了测量. 实验昆虫体长分布在 10.3~47 mm,体宽范围 2.2~14 mm,体重覆盖 20.2~964 mg,体轴比范围 1.9~6.4,由此构建了涵盖多种体型形态的昆虫多频散射数据库<sup>[33]</sup>. 昆虫极化回波对姿态敏感,同一昆虫在不同姿态下,其极化回波会存在较大差异,因此,需消除姿态对极化的影响,而仅提取与昆虫形态相关的极化特征. 为此,利用所测 SM 及对应的昆虫头部朝向(姿态)信息,深度挖掘研究昆虫的极化散射特性,在各频点分别提取了 11 维极化不变量特征,这些特征消除了姿态影响,包括体轴极化 RCS、极化方向图谐波分量、形态伸

长参数以及 Graves 功率矩阵相关特征. 极化不变量及其物理意义见表 1<sup>[36]</sup>.

表 1 描述昆虫椭球形态的极化不变量特征

序号	特征	物理意义
1	$\sigma_L$	极化方向平行体轴 RCS
2	$\sigma_W$	极化方向垂直体轴 RCS
3	$\sigma_d$	体轴 RCS 比
4	$a_0$	不同极化方向(360°)RCS 均值
5	$a_1$	极化方向图一次谐波分量幅度
6	$a_2$	极化方向图二次谐波分量幅度
7	$\alpha_2$	控制极化方向图沿体轴方向伸长参数
8	$\alpha_4$	控制极化方向图沿垂直体轴方向(即体宽方向)伸长参数
9	$d$	Graves 功率矩阵的行列式
10	$t$	Graves 功率矩阵的行列式的迹
11	$f$	Graves 功率矩阵的 Frobenius 范数

在实际应用中,将多频段全极化雷达在多个频点获取的实测特征与数据库匹配,即可实现昆虫体长与体宽反演. 为适应谐振区 RCS 与目标尺寸间高度复杂的非线性关系,建立从高维极化不变量特征空间到昆虫尺寸的精确映射,引入了随机森林回归方法<sup>[36,37]</sup>. 随机森林是一种基于 Bootstrap 自助采样与特征子集随机选择的集成学习方法,其基本结构由多个回归决策树构成. 设训练数据集为

$$\mathcal{D} = \left\{ (z_i, y_i) \right\}_{i=1}^N \quad (10)$$

其中, $z_i$  表示第  $i$  只昆虫的极化不变量向量; $y_i$  表示第  $i$  只昆虫的尺寸参数(体长或体宽); $N$  表示昆虫数量. 模型通过对原始训练集进行多次随机采样,构造若干子样本集,并训练多个回归决策树  $h_m(z)$  组成集成模型,最终预测值通过对各决策树输出结果取均值获得:

$$f(z) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M h_m(z) \quad (11)$$

其中, $M$  为决策树的数量.

团队基于 159 头昆虫在 9.5、11.5、15.5、17.5 GHz 四个频点提取的极化不变量特征(共  $4 \times 11$  维),分别训练了昆虫体长和体宽的反演模型. 采用平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)来评估模型尺寸反演精度:

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (12)$$

其中, $y_i$  是真实值; $\hat{y}_i$  是预测值. 结果显示,预测值与实际值高度一致(图 4),体长和体宽的 MRE 分别为 7.62% 和 8.74%.

## 2.3 极弱微动回波增强的昆虫振翅频率测量

昆虫在飞行过程中,翅膀的周期性振动会对雷达回波产生调制,使得回波幅度呈现周期性起伏. 传统非相参昆虫雷达基于这一特性,通过分析回波强度的起

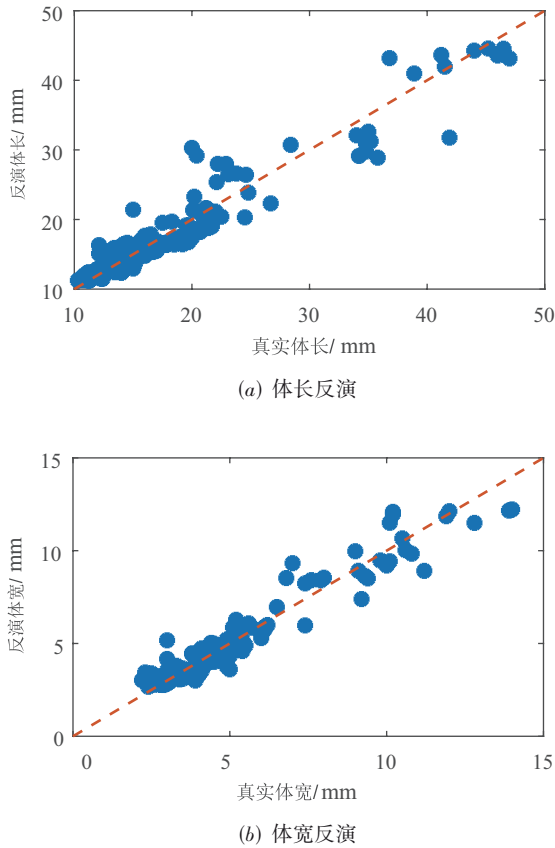


图4 模型预测尺寸与真实尺寸对比

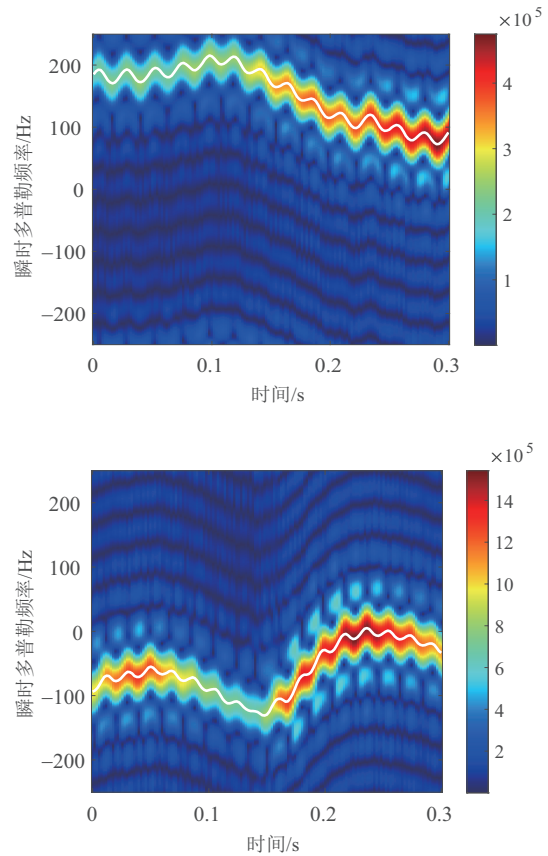


图5 实测昆虫回波时频分析结果

伏频率来提取振翅频率<sup>[20,21]</sup>。然而,昆虫个体RCS可小至-70 dBsm,其回波信噪比通常较低,基于幅度提取的方法仅适用于回波强度较高的大体型昆虫,对于小型昆虫则难以提取。

翅膀振动不仅会对回波幅度产生调制,同时还会引起回波相位的周期性起伏,表现为微多普勒效应<sup>[39]</sup>。尽管微多普勒分析已广泛应用于雷达目标振动测量<sup>[43]</sup>,但应用于昆虫振翅频率提取时仍存在显著挑战。具体而言,昆虫振翅微多普勒与虫体主多普勒耦合,而昆虫飞行过程中极易受气流扰动影响,造成运动轨迹随机且复杂,主多普勒波动剧烈。图5展示了迁飞昆虫实测回波的时频分析结果,可以看到高阶径向运动使主多普勒波动,这使得振翅微多普勒回波在虫体主多普勒强干扰下的提取难度极大。此外,昆虫本身回波极弱,而振翅信号强度比虫体回波还要低1~2个数量级,进一步增加了振翅频率提取难度。

针对上述问题,高分辨多维协同雷达测量仪采用一种极弱微动回波增强的昆虫振翅频率测量方法。该方法建立了虫体与微弱振翅联合的回波模型,利用微动自相关特性自适应滤除主多普勒起伏信号,实现振翅微动信号提取。在此基础上,基于相参积累能量聚合

最大的思路,构建了时频域昆虫振翅微动能量聚合模型,通过对振翅幅度与振翅频率匹配寻优,实现了微弱振翅信号长时相参积累,从而在低信噪比下实现振翅频率的高精度测量。

首先,建立昆虫虫体与振翅联合信号模型如下:

$$s_0(t) = k\sigma_0 \left[ 1 + \eta \sin(2\pi f_w t) \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ R_0 - v(t)t - A_w \sin(2\pi f_w t) \right] \right\} \quad (13)$$

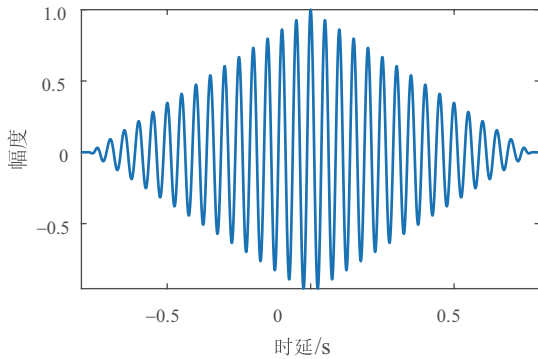
其中, $t$ 为时间; $k$ 为与雷达系统相关的常数; $\sigma_0$ 是昆虫静止时的RCS; $\lambda$ 为雷达波长; $A_w$ 和 $f_w$ 为振翅幅度和振翅频率; $\eta$ 是振翅幅度调制系数; $R_0$ 为昆虫到雷达的初始距离; $v(t)$ 为目标多普勒速度。

要实现振翅频率的有效提取,必须首先滤除主多普勒分量,提取微动信号。为此,团队采用短时滑动平均法估计昆虫主多普勒分量,然后对主多普勒分量进行补偿滤除。该方法的关键在于选择合适的滑动窗长,以实现主多普勒分量的最优滤除。

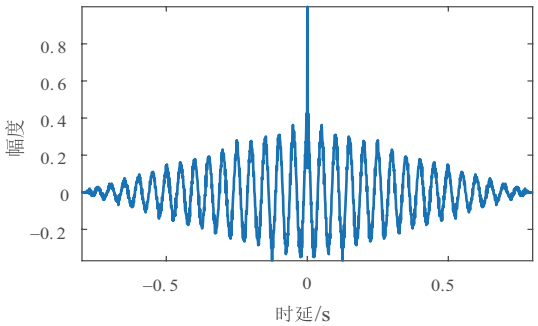
假设完全滤除了虫体主多普勒分量,那么昆虫振翅微多普勒信号可表示为

$$s(t) = k\sigma_0 \left[ 1 + \eta \sin(2\pi f_w t) \right] \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} A_w \sin(2\pi f_w t) \right\} \quad (14)$$

对其相位的自相关函数分析发现,当虫体主多普勒完全滤除时,自相关函数的主次峰差值最小[图6(a)],而虫体回波残留则会破坏振翅回波的自相关特性[图6(b)].因此,可以“自相关函数主次峰差值最小”为准则,自适应确定最优窗长.



(a) 完全滤除主多普勒



(b) 未完全滤除主多普勒

图6 残差信号归一化自相关函数

在滤除主多普勒后,对昆虫振翅回波(式(14))进行时频分析并简化后得到如下形式:

$$\text{STFT}(\tau, f) = k\sigma_0 T_w \left\{ 1 + \eta \sin \left[ 2\pi f_w \left( \tau + \frac{T_w}{2} \right) \right] \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi A_w}{\lambda} \sin \left[ 2\pi f_w \left( \tau + \frac{T_w}{2} \right) \right] - j\pi T_w f \right\} \quad (15)$$

其中,  $\tau$  表示时频域的时间;  $T_w$  为窗长;  $f$  为频率.

在时频图中,昆虫振翅微多普勒能量主要集中在瞬时微多普勒处.瞬时微多普勒可通过对振翅回波信号(式(14))相位求导获得:

$$f_d(\tau) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{4\pi A_w f_w}{\lambda} \cdot \cos(2\pi f_w \tau) \quad (16)$$

令式(15)中的频率取  $f=f_d(\tau)$  即可得到瞬时多普勒谱:

$$\begin{aligned} \text{IDS}(\tau) &= \text{STFT}(\tau, f=f_d(\tau)) \\ &= k\sigma_0 T_w \cdot \left\{ 1 + \eta \sin \left[ 2\pi f_w \left( \tau + \frac{T_w}{2} \right) \right] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi A_w}{\lambda} \sin \left[ 2\pi f_w \left( \tau + \frac{T_w}{2} \right) \right] - j\pi T_w f_d(\tau) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

若对式(17)中的相位项进行补偿并沿时间轴积分,即可实现昆虫振翅微多普勒能量最大化积累.对式(17)中相位取负即可得到相位补偿因子:

$$H_{\text{Af}}(\tau) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi A_w}{\lambda} \sin \left[ 2\pi f_w \left( \tau + \frac{T_w}{2} \right) \right] + j\pi T_w f_d(\tau) \right\} \quad (18)$$

在实际测量中,昆虫真实振翅频率和振翅幅度未知,由雷达测量仅能获取式(15)所示的时频分析结果.为此,团队采用搜索匹配的方式求解振翅频率  $f_w$  和振翅幅度  $A_w$ .设置振翅频率和振翅幅度的搜索范围为  $\hat{f}_w \in (0, f_{\text{max}}]$  和  $\hat{A}_w \in (0, A_{\text{max}}]$ ,其中  $\hat{f}_w$  和  $\hat{A}_w$  为搜索假设的振翅频率和振翅幅度;利用式(16),以  $\hat{f}_w$  和  $\hat{A}_w$  构造假设的瞬时多普勒  $\hat{f}_d(\tau, \hat{f}_w, \hat{A}_w)$ ,并将其代入式(15)中提取假设的瞬时多普勒谱;再利用式(18),基于  $\hat{f}_w$  和  $\hat{A}_w$  构造相位补偿因子  $\hat{H}_{\text{Af}}(\tau, \hat{f}_w, \hat{A}_w)$ ,对瞬时多普勒谱补偿相位并进行积分,计算积累能量.当且仅当振翅幅度  $\hat{A}_w$  和振翅频率  $\hat{f}_w$  均取正确时( $\hat{A}_w = A_w, \hat{f}_w = f_w$ ),瞬时多普勒谱中的相位项可被完全补偿,实现最大能量积累.因此,通过遍历搜索  $\hat{A}_w$  和  $\hat{f}_w$  并判断何时积累能量最大,即可实现振翅频率提取.

### 3 系统研制与验证

#### 3.1 高分辨多维协同雷达测量仪

团队在提出昆虫个体精细测量系列方法的基础上,研制新一代昆虫个体精细监测雷达系统.昆虫个体监测的核心需求对昆虫监测雷达提出了全新的要求:为从密集迁飞群体中分离昆虫个体,雷达需具备高距离分辨能力<sup>[20]</sup>;为测量昆虫二维朝向,需具备全极化测量能力<sup>[29,32]</sup>;为测量昆虫三维朝向,需要对多部雷达测量的二维朝向进行多角度融合<sup>[30]</sup>;为测量昆虫体型尺寸,需发射多频段电磁波<sup>[33]</sup>;此外,为提取昆虫振翅频率,雷达还需具备相参多普勒测量能力<sup>[39]</sup>.针对上述需求,团队研制了高分辨多维协同雷达测量仪(图7),该系统主要包括1部高分辨相控阵雷达与3部多频段全极化雷达,主要系统参数见表2.

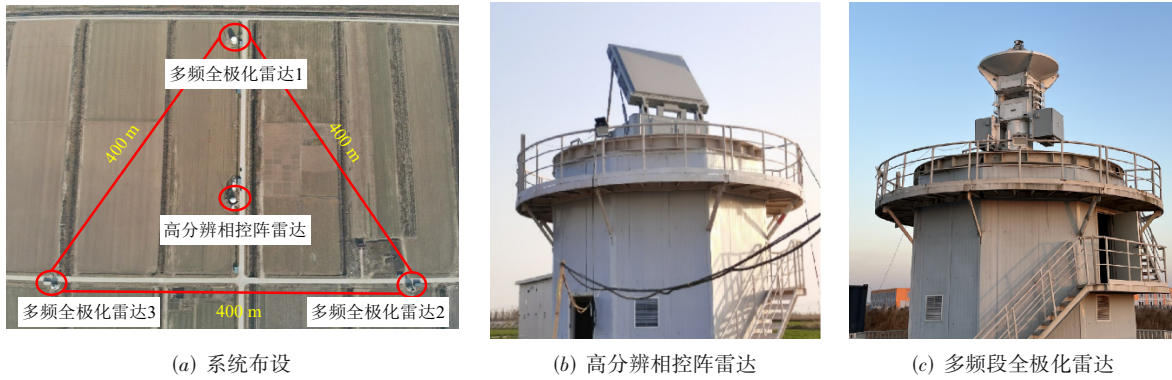


图7 高分辨多维协同雷达测量仪

表2 描述昆虫椭圆形态的极化不变量特征

雷达	参数	参数值
高分辨相控阵雷达	TR 组件数	96
	阵面发射峰值功率	12 kW
	阵面大小	2.3 m × 2.1 m × 0.46 m(长 × 宽 × 厚)
	半功率波束宽度	0.5°
	信号波形	调频步进频
	载波频率	16.5 GHz ± 500 MHz
	距离分辨率	0.2 m
	极化方式	单极化(HH)
	探测威力	≥1.8 km @ -65 dBsm
多频段全极化雷达	信号波形	调频步进频
	载波频率	9.5/11.5/15.5/17.5/35.0 GHz ± 500 MHz
	距离分辨率	0.2 m
	峰值功率	580W@X、100W@Ku、20W@Ka
	半功率波束宽度	0.85°@X、0.55°@Ku、0.25°@Ka
	天线	抛物面天线,直径2.4 m
	极化方式	全极化(HH、HV、VH、VV)
	探测威力	X: ≥1.5 km @ -63 dBsm;Ku: ≥1.5 km @ -51 dBsm;Ka: ≥1.5 km @ -56 dBsm
测角精度	0.1°@Ka	

高分辨相控阵雷达为 Ku 波段单极化系统,采用方位机械、俯仰电扫的扫描方式,主要用于快速探测空中动物群体迁飞状态.该雷达通过步进频合成 1 GHz 宽带波形,实现 0.2 m 的距离分辨率,并结合单脉冲测角技术实现高精度测量,从而能够在密集迁飞群体中分离个体昆虫,并对其位置与轨迹进行精细测量<sup>[20,44]</sup>.

每部多频段全极化雷达均采用 X/Ku/Ka 三波段共口径全极化抛物面天线,可在 9.5、11.5、15.5、17.5 和 35.0 GHz 五个频点下进行全极化测量,获取目标的极化 SM.该型雷达在各频点同样利用步进频合成 1 GHz 宽带波形,实现 0.2 m 的高距离分辨率;其中,Ka 波段还集成了单脉冲测角功能,可提供高精度角度测量.其主要任务是针对迁飞个体开展精细测量,提取包括昆虫

行为学参数(如位置、速度、航迹、升降速率等)及生物学参数(如朝向、体长、体宽、振翅频率等)<sup>[20,32,35,45]</sup>.

仪器整体采用等边三角形布局,高分辨相控阵雷达位于中心,三部多频段全极化雷达分别部署在三角形的三个顶点.各雷达既可独立运行,也可协同工作.在协同模式下,相控阵雷达可快速探测半径 2 km 范围内的群体目标,并选取感兴趣的个体目标,提供位置引导信息给三部多频段全极化雷达;全极化雷达则基于该引导信息,对目标进行搜索、截获与协同跟踪,从而实现个体参数的精细化测量,尤其能够获取目标多角度散射信息,为三维参数反演提供支持.该仪器部署于山东省东营市黄河三角洲现代农业示范基地,自 2021 年 9 月起对迁飞昆虫开展业务化监测.

融合利用高分辨、多视角协同、多频段(X/Ku/Ka)、全极化和全相参测能力,高分辨多维协同雷达测量仪突破了传统昆虫监测雷达在个体参数测量中的诸多局限,首次实现了昆虫三维朝向、体长、体宽测量,并大幅提高了振翅频率测量成功率与精度.

### 3.2 系统测量验证

#### 3.2.1 三维朝向测量

为验证仪器系统三维朝向测量有效性,团队在仪器部署地点开展了基于双无人机吊飞昆虫的三维朝向测量实验.

实验开始前,首先将待测昆虫利用胶水固定于一根长度 100 m、直径 0.3 mm 的鱼线中心[见图 8(a)]. 经过预实验验证,鱼线对雷达测量无干扰. 鱼线两端分别系于两架大疆经纬 300 RTK (Real-Time Kinematic) 无人机上,每架无人机均搭载 RTK 设备,可提供厘米级精度的三维坐标信息,这些坐标数据可用于计算昆虫的真实三维朝向. 然后,根据设定的昆虫真实姿态在地面调整两架无人机的相对位置. 例如,当设定姿态为平飞时,两架无人机保持相同高度并同时起飞;当设定姿态为斜飞时,一架无人机先上升至特定高度,使得昆虫体轴存在一定仰角,随后两架无人机再同步升空. 通过这

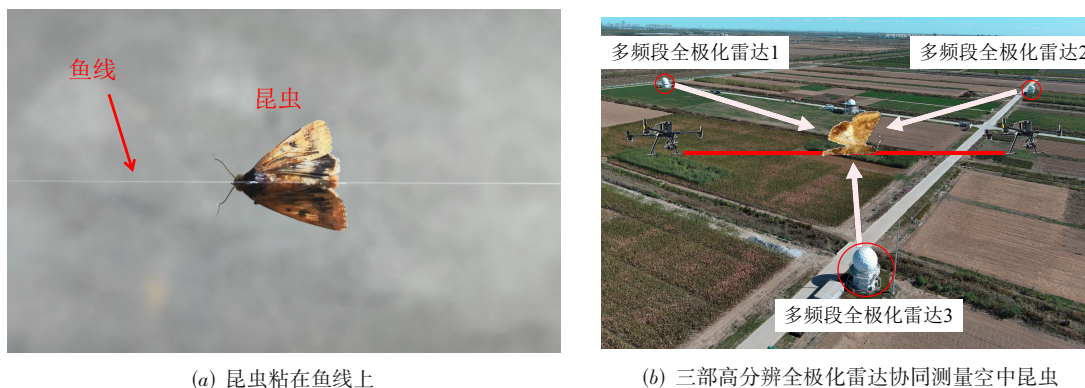
种方式,可实现对昆虫不同飞行姿态的模拟. 无人机携带昆虫升至空中指定位置后,三部多频段全极化雷达协同对目标进行跟踪与测量[如图 8(b)]. 在整个实验过程中,雷达实时采集昆虫回波信号,同时 RTK 设备同步记录无人机三维坐标,以计算昆虫三维朝向真值.

实验共对三只夜蛾科昆虫进行了测量,表 3 给出了三维朝向的真值与估计结果对比. 其中,单位矢量表示三维朝向的单位方向向量;方位角为体轴在水平面投影相对于正北方向的角度(正北为  $0^\circ$ ,顺时针为正方向);俯仰角为体轴相对于水平面的夹角(向上为正). 朝向误差定义为真实三维朝向与测量三维朝向的夹角:

$$\Delta = \arccos(\mathbf{x}_{\text{true}} \cdot \hat{\mathbf{x}}^T) \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{x}_{\text{true}}$  为昆虫真实三维朝向,由 RTK 记录的无人机坐标位置计算得到;  $\hat{\mathbf{x}}$  为测量三维朝向,由第 2.1 节所示的昆虫三维朝向测量方法得到. 由于高分辨多维协同雷达测量仪包含三部多频段全极化雷达,其中任意两部雷达组合均可得到一个三维朝向估计,最终的三维朝向估计为所有估计的均值.

结果表明,三只昆虫的三维朝向测量平均误差为  $2.58^\circ$ ,验证了所提方法在实际应用中的有效性与高精度.



(a) 昆虫粘在鱼线上

(b) 三部高分辨全极化雷达协同测量空中昆虫

图 8 昆虫三维朝向测量实验场景

表 3 昆虫三维朝向测量实验结果

昆虫编号	真实三维朝向		测量三维朝向		测量误差/( $^\circ$ )
	单位矢量	(方位角,俯仰角)/( $^\circ$ )	单位矢量	(方位角,俯仰角)/( $^\circ$ )	
1	[0.013 7, 0.999 5, 0.030 2]	(89.214 7, 1.730 5)	[-0.033 2, 0.999 2, 0.022 7]	(91.90, 1.30)	2.66
2	[-0.016 7, 0.999 9, 0.002 2]	(90.956 8, 0.126 0)	[-0.038 2, 0.999 3, 0.004 3]	(1.23, 0.12)	1.24
3	[-0.008 6, 0.975 9, 0.218 2]	(90.504 9, 12.602 9)	[-0.061 2, 0.982 4, 0.176 6]	(3.06, -2.43)	3.85
平均误差/( $^\circ$ )			2.58		

#### 3.2.2 尺寸测量

为验证研制仪器系统测量昆虫尺寸的有效性,团队在仪器部署地点开展了基于双无人机吊飞的昆虫体长与体宽测量实验. 与三维朝向测量不同,昆虫尺寸参数测量仅需一部多频段全极化雷达即可完成,因此对

实验配置进行了优化,仅采用单部多频段全极化雷达开展实验,实验场景如图 9 所示. 在实验过程中,同样将待测昆虫固定于一根长度 100 m、直径 0.3 mm 的鱼线中央,鱼线两端分别系于两架大疆经纬 300 RTK 无人机. 随后两架无人机同步起飞至约 200 m 高度,调整雷

达波束捕获目标并对其进行跟踪测量,采集昆虫回波数据,昆虫真实尺寸通过游标卡尺测量获得.基于前文提出的昆虫尺寸反演模型,对体长与体宽进行估计.

体长精度验证实验共测量了8头昆虫,测量结果如

表 4 所示,平均相对误差 5.54%;体宽精度测量实验共测量了3头昆虫,测量结果如表 5 所示,平均相对误差 4.58%.实验结果验证了所提方法及研制仪器测量昆虫尺寸的有效性.

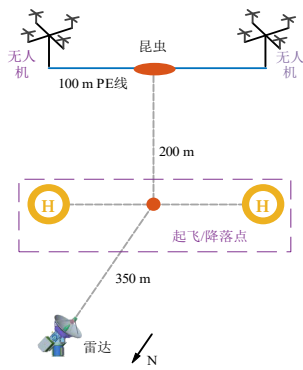


图9 昆虫尺寸测量实验场景

表 4 昆虫体长测量实验结果

序号	体长真值/mm	体长估计值/mm	相对误差/%	序号	体长真值/mm	体长估计值/mm	相对误差/%
1	11.84	12.32	4.08	5	20.22	19.22	-4.95
2	12.54	12.74	1.58	6	21.78	23.39	7.39
3	17.06	18.35	7.58	7	22.56	21.81	-3.34
4	19.82	18.63	-5.98	8	22.86	20.70	-9.43
平均相对误差/%				5.54			

表 5 昆虫体宽测量实验结果

序号	体宽真值/mm	体宽估计值/mm	估计相对误差/%	平均相对误差/%
1	5.62	5.48	-2.49	4.58
2	5.06	5.16	1.98	
3	6.90	6.26	-9.28	

### 3.2.3 振翅频率测量

与昆虫朝向和体型尺寸不同,昆虫的振翅频率受环境等外部因素影响较大,且其真值在自然环境中难以准确获取,因此无法通过外场吊飞实验直接评估雷达对昆虫振翅频率的测量性能.针对这一问题,团队分别设计了微波暗室昆虫测量与外场标准振动仪测量,以系统验证所提方法及仪器系统对振动测量的有效性与精度.

#### (1)微波暗室测量

首先在微波暗室内对真实昆虫开展测量实验,实验场景如图 10 所示.为降低昆虫身体运动对振翅提取的干扰,在昆虫背部粘贴聚苯乙烯泡沫进行固定,使其能够自由振翅同时保持身体稳定.昆虫随后悬挂于直径 0.1 mm 的鱼线上,鱼线两端固定在支撑杆上.实验中采用一个 W 波段相参雷达系统对昆虫进行回波采集,雷达采用调频连续波,工作频率 92.32~93.52 GHz.

同步利用频闪仪测量昆虫振翅频率,当闪光频率与振翅频率同步时,昆虫在视觉上呈静止状态,从而获得精确的振翅频率真值.

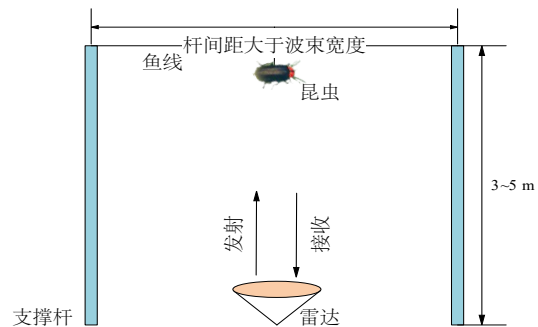


图 10 微波暗室振翅频率测量实验场景

实验共成功测得 12 只昆虫的振翅频率.以一只粘虫为例,其回波幅度、相位、时频分析及基于所提方法得到的测量结果如图 11 所示,所提方法测量振翅频率为 32.78 Hz,与频闪仪测量仅差 0.21 Hz.整体结果见表 6,所提方法的均方误差为 0.727 4 Hz,相较于传统幅度法(均方误差 1.595 1 Hz)精度显著提升,误差降低 0.867 7 Hz,验证了该方法在真实昆虫测量中的有效性与性能提升.所提方法相对于传统幅度法性能提升的原因在于,传

统幅度法仅利用了昆虫振翅微动对回波幅度的调制信息,而所提方法同时利用了振翅微动对回波幅度和相位的调制信息,信息维度更多,并且利用模型匹配的思

想,将传统频谱分析的方法转化为通过参数搜索匹配进行能量长时间积累的过程,因此对低信噪比的回波性能也较好.

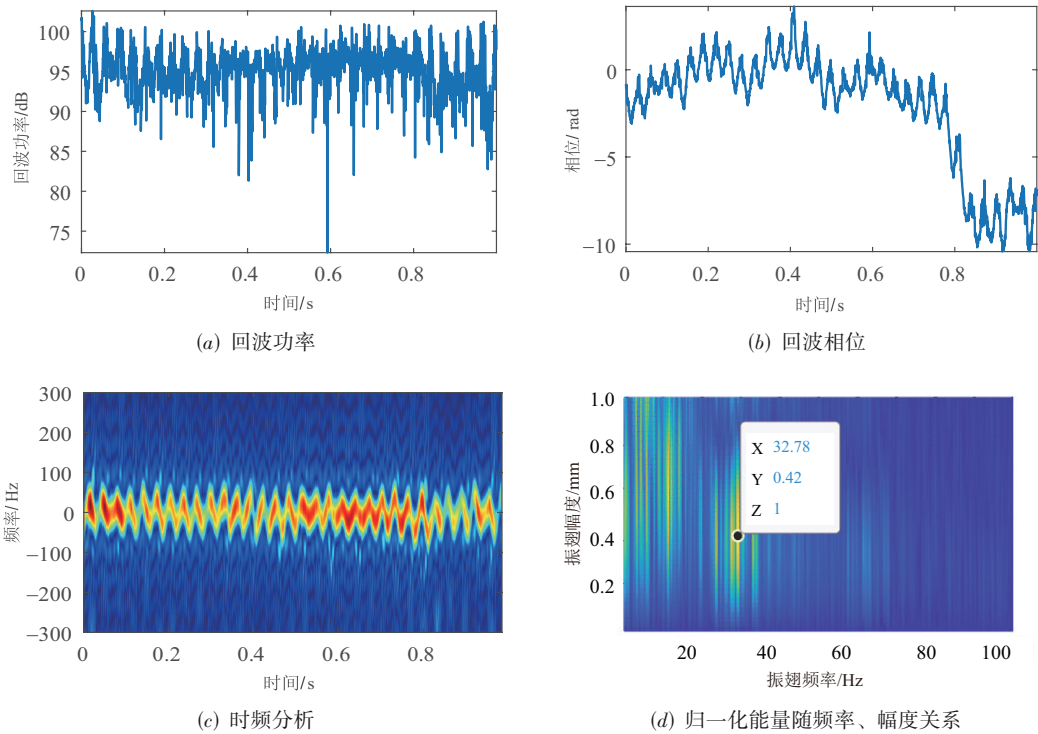


图 11 暗室测量粘虫回波与振翅频率测量结果

表 6 昆虫振翅频率测量结果

昆虫信息		误差/Hz	
种类	体长/mm	传统幅度法	所提方法
黄杨绢野螟	21	0.048	0.13
三角璃尺蛾	20	0.020	0.62
小地老虎	19	1.940	1.82
红棕灰夜蛾	18	0.124	0.04
粘虫	20	2.823	0.21
银纹夜蛾	16	0.057	0.45
二点委夜蛾	10	1.518	1.63
苹果枯叶蛾	23	2.210	0.54
枯叶夜蛾	23	0.800	0.84
红天蛾	39	0.915	0.10
甘蓝夜蛾	18	1.473	0
长喙天蛾	31	0.390	1.05
均方误差		1.595 1	0.727 4

## (2) 外场测量

为了进一步验证仪器在外场条件下对振翅频率测量的性能,团队定制了一台可产生特定频率的标准振动仪,并将其固定在 2 m 高的三脚架上[图 12(a)]. 振动端为一个小型金属角反,三脚架置于距离雷达约 680 m

的地面位置,面向雷达一侧覆盖吸波材料以降低杂波干扰[图 12(b)]. 振动仪上位机界面可设置振动频率与振幅[图 12(c)],实验中雷达对准角反进行测量.

外场实验共测量了 10、20、30、40、50、60 和 120 Hz 七个频率,每个频率采集 10 组数据. 以 30 Hz 为例,某组回波功率、相位、时频分析及基于所提方法得到的测量结果如图 13 所示. 结果表明,雷达测振精度极高,7 组频率测量的均方根误差仅为 0.006 9 Hz,有效验证了仪器与所提方法在外场条件下的稳定性和可靠性.

## 4 结束语

雷达是昆虫迁飞监测最有效的工具之一. 然而,当前已有的扫描昆虫雷达和垂直昆虫雷达均受制于 20 世纪 90 年代及以前,低分辨、非相参等体制仅适用于群体昆虫的粗略测量,越来越难以满足当前对迁飞昆虫监测预警和研究对迁飞昆虫个体精细测量的需求. 迁飞昆虫个体精细测量的主要难点在于昆虫尺寸小,且散射特性覆盖瑞利区至谐振区,电磁散射回波复杂. 为此,团队开展了昆虫监测雷达精细测量技术研究,提出了昆虫头部朝向、体长、体宽、振翅频率等个体参数系列反演方法和谐振区全极化多视角昆虫三维朝向测量

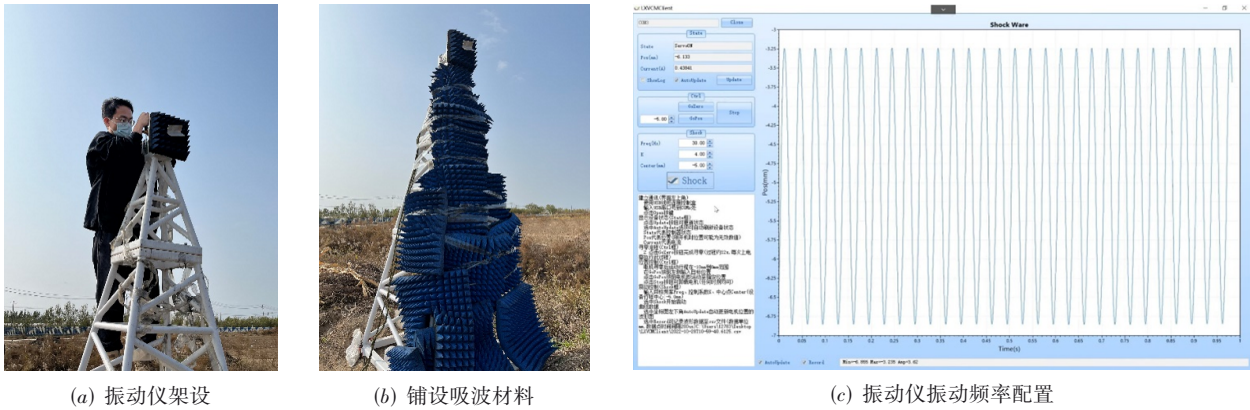


图12 雷达振动测量场景

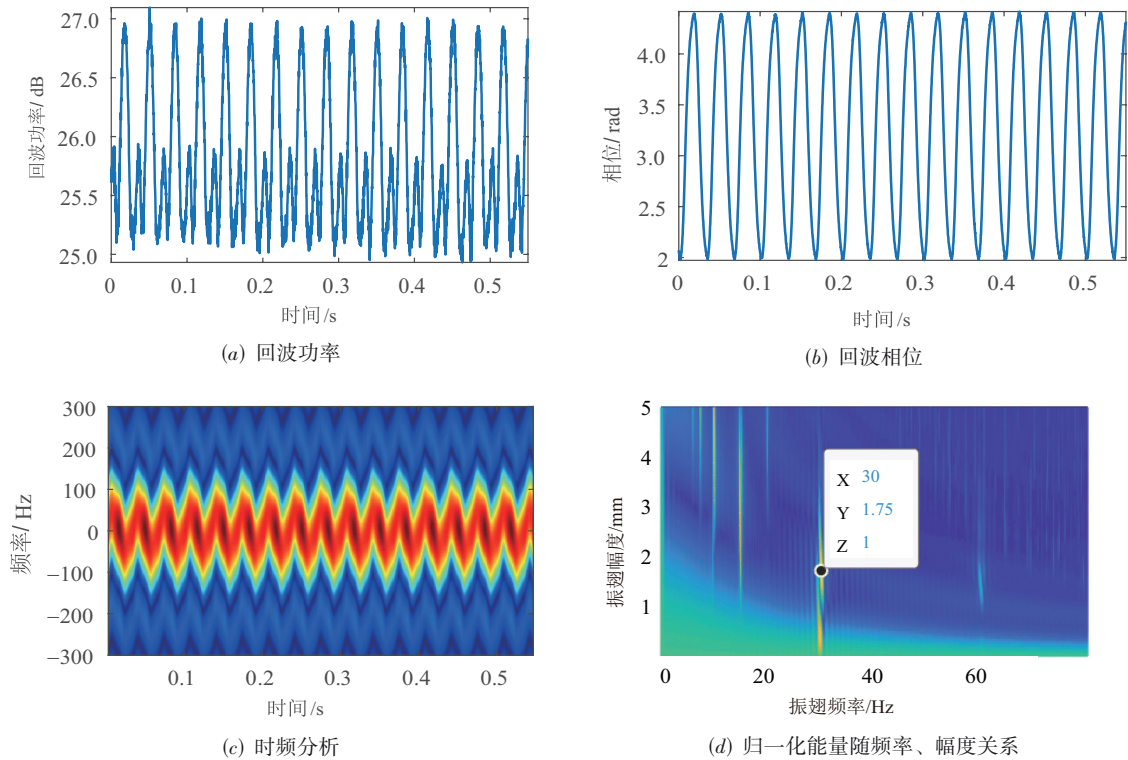


图13 雷达振动仪测量结果(30 Hz)

方法,解决了昆虫雷达领域一直存在的谐振区昆虫二维朝向测量 $90^\circ$ 跳变及三维朝向测量难题,首次实现了昆虫三维朝向测量,实测平均误差为 $2.58^\circ$ . 提出了谐振区多频点全极化特征映射的昆虫尺寸测量方法,结合多频点全极化测量与机器学习解决了跨瑞利—谐振区复杂散射昆虫尺寸测量难题,首次实现了昆虫体长与体宽测量,实测平均相对误差分别为 $5.54\%$ 和 $4.58\%$ . 提出了极弱微动回波增强的昆虫振翅频率测量方法,通过主多普勒短时自适应滤除与微多普勒能量长时积累增强,显著提升了低信噪比下昆虫振翅频率测量性能,实测误差优于 $1\text{ Hz}$ . 基于以上技术突破,研发了新一代昆虫个体监测雷达系统,实现了昆虫目标

三维头部朝向、体长、体宽、振翅频率参数精细测量,已部署在山东东营开展迁飞昆虫业务监测运行.

未来,团队将进一步推动相关技术体系向更广泛的低空目标精细测量领域拓展. 将在昆虫个体精细测量中形成的一系列关键技术延伸应用至鸟类、无人机等典型低空目标的监测、识别与行为分析,实现多类型低空微弱目标的精细测量与智能分类<sup>[46,47]</sup>. 通过构建覆盖昆虫、鸟类、无人机等多类型目标的低空精细测量技术体系,有望为我国低空目标监测预警与空域管控体系的建设提供有力支持,为维护国家低空空域安全与秩序提供关键技术支撑.

## 参考文献

- [1] CHAPMAN J W, DRAKE V A, REYNOLDS D R. Recent insights from radar studies of insect flight[J]. *Annual Review of Entomology*, 2011, 56: 337-356.
- [2] ALISTAIR DRAKE D R R V. *Radar Entomology: Observing Insect Flight and Migration*[M]. Wallingford, Oxfordshire: CABI, 2012.
- [3] OERKE E C. Crop losses to pests[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2006, 144(1): 31-43.
- [4] BEBBER D P, HOLMES T, GURR S J. The global spread of crop pests and pathogens[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(12): 1398-1407.
- [5] HU G, LU M H, REYNOLDS D R, et al. Long-term seasonal forecasting of a major migrant insect pest: The brown planthopper in the Lower Yangtze River Valley[J]. *Journal of Pest Science*, 2019, 92(2): 417-428.
- [6] LV H, ZHAI M Y, ZENG J, et al. Changing patterns of the East Asian monsoon drive shifts in migration and abundance of a globally important rice pest[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(10): 2655-2668.
- [7] ZHOU Y, ZHANG H W, LIU D Z, et al. Long-term insect censuses capture progressive loss of ecosystem functioning in East Asia[J]. *Science Advances*, 2023, 9(5): eade9341.
- [8] HUANG J R, FENG H Q, DRAKE V A, et al. Massive seasonal high-altitude migrations of nocturnal insects above the agricultural Plains of East China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(18): e2317646121.
- [9] HU G, FENG H Q, OTUKA A, et al. The East Asian insect flyway: Geographical and climatic factors driving migration among diverse crop pests[J]. *Annual Review of Entomology*, 2025, 70(1): 1-22.
- [10] FAN M S, SHEN J B, YUAN L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(1): 13-24.
- [11] 胡高, 高博雅, 封洪强, 等. 迁飞昆虫的个体行为、种群动态及生态效应[J]. *中国科学基金*, 2020, 34(4): 456-463.  
HU G, GAO B Y, FENG H Q, et al. Insect migration: Individual behaviour, population dynamics and ecological consequences[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34(4): 456-463. (in Chinese)
- [12] KENNEDY D, NORMAN C. What don't we know?[J]. *Science*, 2005, 309(5731): 75.
- [13] LEVINE A G, FRENCH B, SANDERS S. 125 questions: Exploration and Discovery[M]. New York: Science/AAAS Custom Publishing Office, 2021: 7-18.
- [14] HOLLAND R A, WIKELSKI M, WILCOVE D S. How and why do insects migrate?[J]. *Science*, 2006, 313(5788): 794-796.
- [15] LEWIS M A, MAINI P K, PETROVSKII S V. *Dispersal, Individual Movement and Spatial Ecology: A Mathematical Perspective*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [16] 罗忠涛, 龚彦如, 黎霁萱, 等. 天波超视距雷达地海杂波图像增强与检测器设计[J]. *电子学报*, 2024, 52(12): 4037-4047.  
LUO Z T, GONG Y R, LI J X, et al. Land-sea clutter image enhancement and detector design for sky-wave over-the-horizon radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(12): 4037-4047. (in Chinese)
- [17] 雷文太, 隋浩, 姜和俊, 等. DABP: 一种基于深度学习的探地雷达自聚焦后向投影成像方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(12): 4023-4036.  
LEI W T, SUI H, JIANG H J, et al. DABP: A deep learning based auto focusing back projection imaging method for ground penetrating radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(12): 4023-4036. (in Chinese)
- [18] 王江涛, 王锐, 李卫东, 等. 基于最小极化 RCS 的昆虫雷达目标体型参数反演[J]. *信号处理*, 2023, 39(9): 1651-1663.  
WANG J T, WANG R, LI W D, et al. Estimation of insect morphological parameters based on the minimum polarization RCS for entomological radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2023, 39(9): 1651-1663. (in Chinese)
- [19] 胡程, 李卫东, 王锐. 基于全极化的相参雷达迁飞昆虫观测[J]. *信号处理*, 2019, 35(6): 951-957.  
HU C, LI W D, WANG R. Fully polarimetric coherent radar for migratory insect observation[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(6): 951-957. (in Chinese)
- [20] LONG T, HU C, WANG R, et al. Entomological radar overview: System and signal processing[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(1): 20-32.
- [21] CHAPMAN J W, REYNOLDS D R, SMITH A D. Vertical-looking radar: A new tool for monitoring high-altitude insect migration[J]. *BioScience*, 2003, 53(5): 503-511.
- [22] DRAKE V A, WANG H K. Ascent and descent rates of high-flying insect migrants determined with a non-coherent vertical-beam entomological radar[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(3): 883-904.
- [23] CHAPMAN J W, NESBIT R L, BURGIN L E, et al. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects[J]. *Science*, 2010, 327(5966): 682-685.

- [24] KOUYOUJIAN R, PETERS L, THOMAS D. A modified geometrical optics method for scattering by dielectric bodies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, 11(6): 690-703.
- [25] DRAKE V A, CHAPMAN J W, LIM K S, et al. Ventral-aspect radar cross sections and polarization patterns of insects at X band and their relation to size and form[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(18): 5022-5044.
- [26] KONG S Y, HU C, WANG R, et al. Insect multifrequency polarimetric radar cross section: Experimental results and analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(8): 6573-6585.
- [27] WANG J T, WANG R, LI W D, et al. High-precision classification of parallel and perpendicular insects based on relative eigenvalues of dual-frequency scattering matrices in the X-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5105716.
- [28] WANG R, ZHANG T R, HU C, et al. Digital detection and tracking of tiny migratory insects using vertical-looking radar and ascent and descent rate observation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5101615.
- [29] HU C, LI W D, WANG R, et al. Accurate insect orientation extraction based on polarization scattering matrix estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10): 1755-1759.
- [30] LI W Q, WANG R, ZHANG F, et al. Insect 3-D orientation estimation based on cooperative observation from two views of entomological radars[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4026705.
- [31] HU C, LI W D, WANG R, et al. Discrimination of parallel and perpendicular insects based on relative phase of scattering matrix eigenvalues[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 3927-3940.
- [32] WANG J T, WANG R, LI W D, et al. Insect symmetry-driven orientation estimation for entomological radar using multifrequency scattering matrices[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5102113.
- [33] WANG R, HU C, LIU C J, et al. Migratory insect multifrequency radar cross sections for morphological parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3450-3461.
- [34] HU C, LI W D, WANG R, et al. Insect biological parameter estimation based on the invariant target parameters of the scattering matrix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 6212-6225.
- [35] LI M Y, WANG R, LI W D, et al. Robust insect mass estimation with co-polarization estimators for entomological radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5106714.
- [36] HU C, ZHANG F, LI W D, et al. Estimating insect body size from radar observations using feature selection and machine learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5120511.
- [37] WANG R, WANG J T, LI W D, et al. Robust estimation of insect morphological parameters for entomological radar using multifrequency echo intensity-independent estimators[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5109115.
- [38] LI W D, HU C, WANG R, et al. Comprehensive analysis of polarimetric radar cross-section parameters for insect body width and length estimation[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(2): 122302.
- [39] WANG R, HU C, FU X W, et al. Micro-Doppler measurement of insect wing-beat frequencies with W-band coherent radar[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1396.
- [40] HU C, YAN Y J, WANG R, et al. High-resolution, multifrequency and full-polarization radar database of small and group targets in clutter environment[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(12): 227301.
- [41] XU Z M, AI X F, ZHAO F, et al. Attitude estimation for linear-type targets based on bistatic full-polarization information[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4023005.
- [42] GHIO S, MARTORELLA M. Size estimation of space debris models from their RCS measured in anechoic chamber[C]//2020 17th European Radar Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 421-424.
- [43] WANG J H, CHEN X L, GUAN J, et al. A time-frequency representation method based on ETF-MDNet for radar target micro-motion features[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2025, 34(4): 1199-1208.
- [44] 蔡炯, 王锐, 胡程, 等. 基于新型扫描昆虫雷达的迁飞昆虫目标检测及密度反演[J]. *信号处理*, 2022, 38(7): 1333-1352.
- CAI J, WANG R, HU C, et al. Target detection and density inversion of migrating insects based on a novel scanning insect radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(7): 1333-1352. (in Chinese)
- [45] ZHANG F, LI W D, WANG R, et al. Radar-based identification of insect species with ensemble learning algo-

rhythms utilizing multiple electromagnetic scattering parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5109214.

- [46] 陈小龙, 袁旺, 杜晓林, 等. 多波段多角度 FMCW 雷达低慢小探测数据集(LSS-FMCWR-2.0)及特征融合分类方法[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(5): 1276-1293.  
CHEN X L, YUAN W, DU X L, et al. Multi-band multi-angle FMCW radar low-slow-small target detection dataset(LSS-FMCWR-2.0) and feature fusion classification methods[J].

Journal of Radars, 2025, 14(5): 1276-1293. (in Chinese)

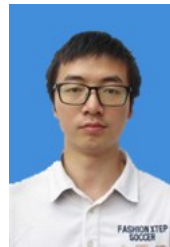
- [47] 邓振华, 陈小龙, 薛伟, 等. 海空背景下低慢小目标泛探雷达多域多维特征建模与分析[J]. 信号处理, 2024, 40(5): 801-814.

DENG Z H, CHEN X L, XUE W, et al. Multi-domain and multi-dimensional feature modeling and analysis of low, slow, and small targets via ubiquitous radar under sea and air background[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(5): 801-814. (in Chinese)

## 作者简介



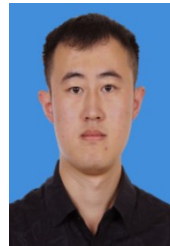
胡程男, 1981年出生于湖南省岳阳市. 2009年获北京理工大学博士学位, 现为北京理工大学教授、博士生导师, 国家杰青. 主要研究方向为测量雷达精细信号处理, 发表SCI/EI论文200余篇, 授权发明专利80余项. 中国电子学会会员编号: E190011302F.  
E-mail: cchchb@163.com



蔡炯男, 1997年出生于江西省宜春市. 2017年获北京理工大学学士学位, 2025年获北京理工大学博士学位, 现为北京理工大学博士后. 主要研究方向为雷达杂波抑制、雷达检测与跟踪及昆虫雷达信号处理.  
E-mail: az123jiong@foxmail.com



王锐男, 1985年出生于山西省太原市. 2015年获北京理工大学博士学位, 现为北京理工大学教授、博士生导师, 国家级青年人才. 主要研究方向为空中微小、集群飞行器/生物目标的雷达探测技术. 中国电子学会会员编号: E190021771S.  
E-mail: wangrui.bit@bit.edu.cn



姜琦男, 1994年出生于山东省临沂市. 2019年获电子科技大学硕士学位, 2024年获北京理工大学博士学位, 现为北京理工大学博士后. 主要研究方向为群目标跟踪及多源信息融合.  
E-mail: tedjq@126.com



李卫东男, 1991年出生于山东省临沂市. 分别于2015、2021年获北京理工大学工学学士、博士学位, 现为北京理工大学副教授、博士生导师. 主要研究方向为低空微弱目标雷达信号与信息处理.  
E-mail: lwd0539@163.com



张济川男, 1998年出生于河南省驻马店市. 2020年获西安电子科技大学学士学位, 现为北京理工大学信息与电子学院博士研究生. 主要研究方向为群目标跟踪、随机有限集滤波、变分推断等. 中国电子学会会员编号: E190161863A.  
E-mail: zhangjichuan98@163.com



王江涛男, 1998年出生于河南省济源市. 2020年获西安电子科技大学工学学士学位, 现为北京理工大学博士研究生. 主要研究方向为昆虫监测雷达极化信号与信息处理. 中国电子学会会员编号: E190184873M.  
E-mail: bit\_wjt@foxmail.com



谭荔嘉男, 2000年出生于河北省保定市. 2022年于哈尔滨工程大学获电子与信息工程专业学士学位, 目前在北京理工大学攻读信息与通信工程的博士学位. 研究方向为极化校准和极化信息处理. 中国电子学会会员编号: E190186800A.  
E-mail: tanlijia2000@163.com



叶子涵女, 2000年出生于甘肃省天水市. 2022年获北京理工大学学士学位, 现为北京理工大学博士研究生. 主要研究方向为昆虫雷达信号处理. 中国电子学会会员编号: E190186853A.  
E-mail: yezihan\_2000@163.com