

Ku 波段全极化雷达昆虫体型参数反演

李卫东^{1,2,3}, 王 锐^{1,2,3}, 胡 程^{1,2,3}, 张天然^{1,3}, 梁文哲^{1,3}

(1. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所, 北京 100081;

2. 北京理工大学前沿技术研究院, 山东济南 250300;

3. 卫星导航电子信息技术教育部重点实验室(北京理工大学), 北京 100081)

摘 要: 为实现 Ku 波段昆虫雷达体型参数测量, 基于全极化测量装置在微波暗室测量的昆虫数据, 分析了 Ku 波段昆虫雷达散射截面积(Radar Cross-Section, RCS)特性. 发现大昆虫为谐振区散射, 无法基于 RCS 反演体型参数. 为保证雷达体型测量准确性, 必须将大昆虫识别并剔除; 为此, 提出相对特征相位和 RCS 参数联合的大昆虫辨别方法. 在此基础上, 分析了中小昆虫体型与特征参数的关系, 发现这些特征参数均能较好的反演昆虫体长/体重, 从而给出 Ku 波段昆虫体长、体重反演经验公式.

关键词: Ku 波段; 全极化昆虫雷达; 大昆虫辨别; 体型参数反演

中图分类号: TN959.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1241-08

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

DOI: 10.12263/DZXB.20200381

Insect Body Size Estimation for Ku-Band Fully Polarimetric Entomological Radar

LI Wei-dong^{1,2,3}, WANG Rui^{1,2,3}, HU Cheng^{1,2,3}, ZHANG Tian-ran^{1,2}, LIANG Wen-zhe^{1,2}

(1. Radar Research Lab, 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. Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China)

Abstract: To measure the insect body size parameters for Ku-band entomological radar, based on the insect data measured by a fully polarimetric measurement rig, the RCS (Radar Cross-Section) characteristic of insects in Ku-band is studied. It is found that the scattering of the large insects is in the resonance region. Thus, the body size parameters of the large insect cannot be estimated from the RCS. To ensure the accuracy of body size measurement, it is necessary to identify and get rid of large insects. For this reason, a large insect discrimination method based on the relative phase of scattering eigenvalues and one of the RCS parameters is proposed. The relationships between insect body length and mass and RCS parameters for the middle and small insects are analyzed. It is found that all parameters can be well used for estimating the insect body length and mass, and the empirical formulas for insect body length and mass estimation are obtained.

Key words: Ku-band; fully polarimetric entomological radar; large insect discrimination; body size estimation

1 引言

迁飞是昆虫离开不利的栖息环境、开拓新时空资源的行为. 自然界中, 很多昆虫物种都存在迁飞行为, 包括重要的农林和草原害虫(如粘虫、褐飞虱、小地老虎、草地螟等). 害虫的迁飞会造成严重的粮食损失, 威胁社会经济的发展. 例如, 2020年初开始, 数量庞大的沙漠蝗虫在东非、西南亚迁飞, 每天可飞行 100~150km,

严重破坏当地的粮食作物和草料, 使东非的粮食安全面临前所未有的威胁^[1]. 若能实现迁飞昆虫的有效监测, 辨别迁飞昆虫种类, 建立虫害早期精准预警体系, 则可以实现从“源头”治理虫害, 将虫害消灭在萌芽期, 防止大规模虫灾的形成.

雷达被广泛用于远距离空中目标探测^[2-8]. 可定量而又不会干扰目标运动的特性使得雷达成为监测迁飞昆虫最有效的工具^[9-12]. 当前应用最广泛的昆虫雷达

是 X 波段垂直观测雷达 (Vertical-Looking Radar, VLR)^[13]. 该型雷达为线性极化体制, 波束垂直对天照射, 通过波束快速圆锥旋转, 实现极化方向的旋转, 从而测量不同极化方向的目标回波 (即极化方向图). VLR 可用于观测中、大体型昆虫, 可测量个体昆虫的体重、振翅频率、朝向、速度等信息^[14-16]. 其中, 体重和振翅频率参数被认为有助于昆虫种类辨识^[17,18]. VLR 测量昆虫体重是基于在 X 波段昆虫处于瑞利区或谐振区起始阶段, 极化平均 RCS a_0 与体重成正比的特性, 通过极化平均 RCS 与体重的拟合经验公式反演体重^[19,20]. Drake 等人将 a_0 与表示目标极化方向图形状的参数 α_2 联合使用 (记为 a_0 & α_2), 通过二维线性回归得到拟合曲面, 用于反演昆虫体重. 与仅使用 a_0 相比, 提高了估计精度^[20]. 基于内场测量的 207 只 X 波段昆虫回波数据, 文献 [20] 提出, 目标散射矩阵 (Scattering Matrix, SM) 的 2 个极化不变量 v 和 d 均能用于反演昆虫的体重, 且比传统极化平均 RCS 方法精度更高; 此外, v 和 d 还能用于反演昆虫体长. v 表示当极化方向垂直于昆虫体轴时的目标 RCS, d 表示极化方向平行和垂直于昆虫体轴时的 RCS 乘积.

VLR 已成功用于迁飞昆虫观测超过二十年, 为迁飞昆虫研究做出了重要贡献. 然而, VLR 仅适用于中、大体型昆虫的观测. VLR 波长 3.2cm, 中、大体型的昆虫目标的散射处在瑞利区的顶部或谐振区的初始阶段, RCS 较大, 有利于雷达观测; 但是对于小体型的昆虫, 其散射为瑞利区散射, RCS 较小, 难以探测^[21]. 根据电磁散射理论, 在瑞利区, RCS 与波长的 4 次方成反比, 因此减小雷达波长有利于提高小昆虫的 RCS, 增强雷达对小昆虫的探测能力. 此外, 传统 VLR 为非相参体制, 距离分辨率低, 极化方式单一, 测量效率低. 为了增强小昆虫的探测能力, 解决传统 VLR 体制落后问题, 北京理工大学雷达技术研究所开发了一套 Ku 波段全极化相参体制昆虫雷达^[22,23]. 该雷达波长 1.85cm; 发射采用调频步进频波形, 距离分辨率高达 0.2m; 采用同时全极化体制, 可同时测量目标 HH、HV、VH、VV 极化回波 (H, Horizontal, 水平; V, Vertical, 垂直; HV 表示垂直极化发射、水平极化接收的目标回波, 其第一个字母表示雷达接收的极化方式, 第二个字母表示雷达发射的极化方式, 其他缩写类似). 基于全极化测量, 该雷达可直接测量目标的 SM. 文献 [22] 已经证明该雷达具有昆虫朝向和振翅频率测量能力. 然而, 由于当前昆虫雷达的体重、体长测量均是基于经验公式反演 (即首先在实验室内用与雷达相同波段的测量装置, 测量大量的昆虫 RCS 数据样本, 然后寻找昆虫 RCS 与体型的映射关系, 建立体型反演经验公式), 因此, 现有体型反演经验公式无法应用于 Ku 波段昆虫雷达.

这篇论文旨在解决 Ku 波段昆虫雷达体重、体长测量问题. 为实现 Ku 波段昆虫雷达的体重、体长测量能力, 我们首先在微波暗室基于 Ku 波段全极化实验装置测量了 150 只昆虫的 SM, 分析了 Ku 波段昆虫的 RCS 特性; 然后, 基于 X 波段体型参数反演所用的参数 a_0 & α_2 、 v 和 d , 分析了体重、体长与这些参数的关系, 最后提出 Ku 波段昆虫雷达的体重、体长测量经验公式.

2 特征参数计算

全极化雷达可直接测量目标 HH、HV、VH、VV 极化回波, 经数据预处理后^[22], 可得到 SM. 假设目标 SM 为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12}e^{j\beta} \\ s_{21}e^{j\beta'} & s_{22}e^{j\gamma} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, s_{11} 、 s_{12} 、 s_{21} 和 s_{22} 分别定义为 HH、HV、VH 和 VV 极化 RCS (单位: m^2) 的平方根; β 、 β' 和 γ 为对应的相位.

X 波段昆虫雷达体型反演所用的参数 a_0 、 α_2 、 v 和 d 均可由 SM 参数计算得到, 这里仅给出参数的表达式, 具体推导过程参见文献 [19, 20, 24].

a_0 和 α_2 可分别表示为:

$$a_0 = \frac{1}{8} (3s_{11}^2 + 3s_{22}^2 + 4s_{12}^2 + 2s_{11}s_{22}\cos\gamma) \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} \frac{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}}{a_0}, & \Delta\phi < 0 \\ -\frac{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}}{a_0}, & \Delta\phi > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{1}{2}(s_{11}^2 - s_{22}^2) \\ a_{12} = s_{12}[s_{11}\cos\beta + s_{22}\cos(\beta - \gamma)] \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta\phi$ 是相对特征相位, 定义为 SM 两个特征值的相位差:

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

其中, $\arg(\cdot)$ 表示取相位运算, μ_1 和 μ_2 是 SM 的两个特征值 ($|\mu_1| \geq |\mu_2|$):

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{1}{2}(s_{11} + s_{22}e^{j\gamma}) + \frac{1}{2}\sqrt{(s_{11} - s_{22}e^{j\gamma})^2 + 4s_{12}s_{21}e^{j(\beta+\beta')}} \\ \mu_2 = \frac{1}{2}(s_{11} + s_{22}e^{j\gamma}) - \frac{1}{2}\sqrt{(s_{11} - s_{22}e^{j\gamma})^2 + 4s_{12}s_{21}e^{j(\beta+\beta')}} \end{cases} \quad (6)$$

v 和 d 可分别表示为:

$$v = \begin{cases} \lambda_2, & \Delta\phi < 0 \\ \lambda_1, & \Delta\phi > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d = \sqrt{\lambda_1\lambda_2} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{(g_{11} + g_{22}) + \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}g_{21}}}{2} \\ \lambda_2 = \frac{(g_{11} + g_{22}) - \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}g_{21}}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} g_{11} = s_{11}^2 + s_{12}^2 \\ g_{12} = s_{11}s_{12}e^{j\beta} + s_{12}s_{22}e^{j(\gamma-\beta)} \\ g_{21} = s_{11}s_{12}e^{-j\beta} + s_{12}s_{22}e^{-j(\gamma-\beta)} \\ g_{22} = s_{12}^2 + s_{22}^2 \end{cases} \quad (10)$$

3 Ku 波段昆虫 RCS 特性

3.1 实验数据

本文将基于 Ku 波段实测昆虫数据分析昆虫体型与上述 4 个特征参数的关系。所用数据是在微波暗室中,基于 1 台 4 端口矢量网络分析仪和 2 个双极化天线搭建的全极化 RCS 测量设备测量的。这里将给出测量方法的简单介绍,详见文献[24]。双极化天线有 H 和 V 极化 2 个端口,可同时发射或接收 H 和 V 极化雷达波。2 个双极化天线一个作为发射天线,一个作为接收天线。将 2 个天线的 4 个端口分别连接到矢量网络分析仪的 4 个端口,可实现全极化测量。例如,将发射天线的 H 和 V 极化连接到矢量网络分析仪的 1 和 3 端口、接收天线的 H 和 V 极化连接到矢量网络分析仪的 2 和 4 端口,则 S 参数 S_{21} 、 S_{23} 、 S_{41} 、 S_{43} 分别对应于目标的 HH、HV、VH、VV 极化分量,从而实现全极化测量。测量设备如图 1 所示(未给出矢量网络分析仪)。主体是一个内壁贴满吸波材料的矩形喇叭腔,用来防止外部杂波干扰。两个天线在喇叭腔的下端口,垂直向上照射。昆虫通过回波可忽略的 PE 线固定在矩形喇叭腔的上端口的中心,即天线的正上方。实验中,雷达频率设置为 16.2GHz,天线的口径为 12cm,昆虫到天线的距离为 2m (满足远场条件)。

测量时,昆虫保持平飞姿态、雷达垂直向上照射,测量昆虫腹部全极化 RCS。在固定昆虫时,首先在 PE 线上沾少量的强力胶水,然后迅速按压在昆虫背部的正中线。大约 1 分钟后昆虫即可固定在 PE 线上。由于昆虫

的身体是左右对称的,将 PE 线拉直固定在喇叭腔上端口后,昆虫为平飞状态。为了防止昆虫拍翅膀和抖动影响测量,在测量前会用少量的风油精将昆虫杀死。由于风油精极易挥发,不会对测量造成影响。

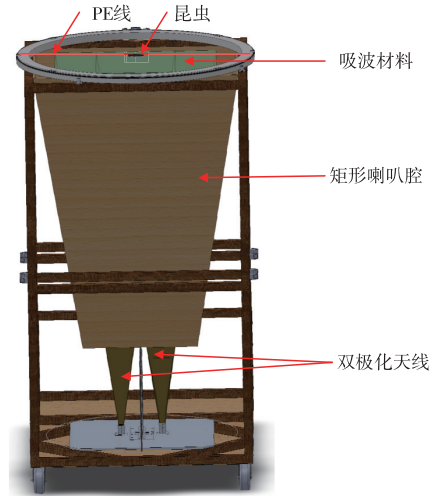


图1 实验测量装置

实验所测量昆虫样本是用探照灯在夜间诱捕得到。共测量了 23 个种类 150 只昆虫,主要包括棉铃虫(25)、粘虫(13)、小地老虎(11)、桃蛀螟(9)、枯叶夜蛾(9)、甘薯天蛾(8)、黄杨绢野螟蛾(6)、银锭夜蛾(4)、霜天蛾(4)、红天蛾(4)、柳毒蛾(3)、甘薯绮夜蛾(3)、玉米螟(1),以及其他未识别出种类的飞蛾(10 种 50 只)。体重范围 23.3 ~ 964mg,体长范围 10.3 ~ 47mm,体宽范围 2.2 ~ 14mm。

3.2 昆虫 RCS 特性

基于实测昆虫数据,下面将分析昆虫的 RCS 特性。在 4 个特征参数中, v 、 d 和 a_0 是与 RCS 相关的参数,因此,这里将分别分析体长 (L , 单位 mm)、体重 (M , 单位 mg) 与 v 、 d 和 a_0 的关系,分别如图 2 和图 3 所示,其中,为了得到清晰的对应关系,对体重取对数处理。可以看到,体重 220mg 以下或体长 25mm 以下的昆虫,三种特征参数与体重或体长有较好的单调变化的映射关系;而对于体型更大的昆虫,体长和体重与这三种参数不

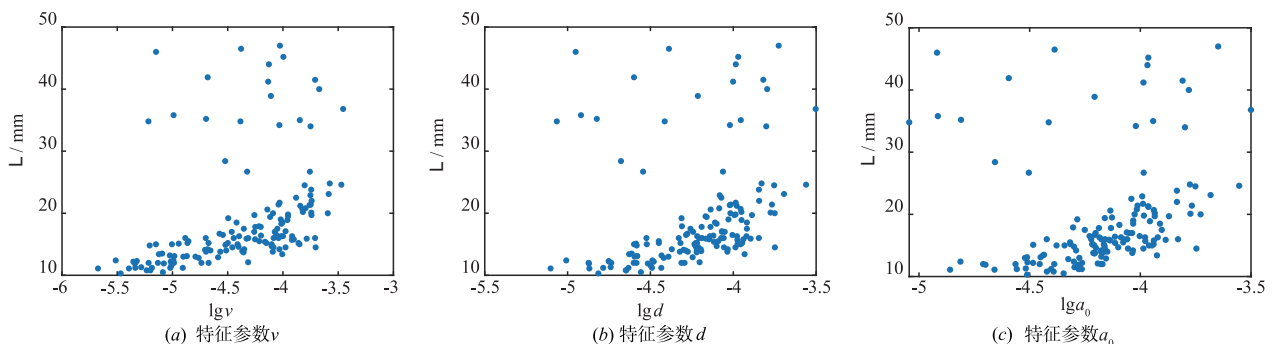


图2 体长与特征参数

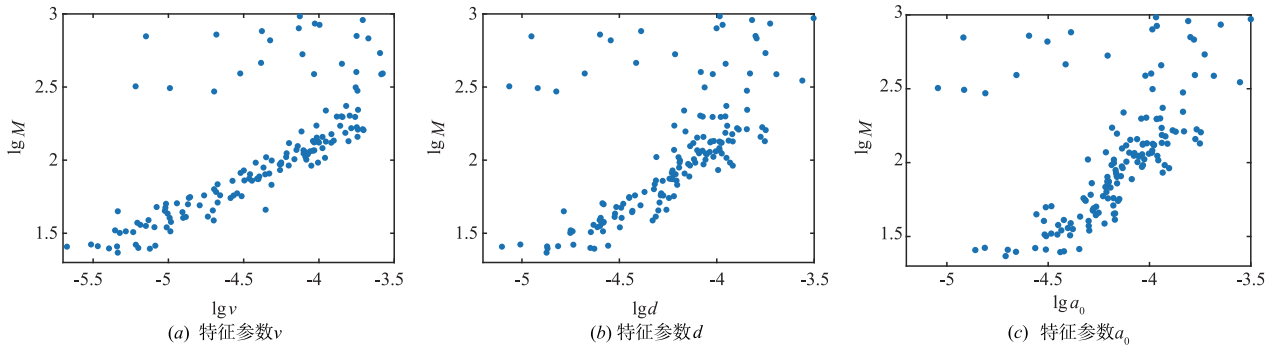


图3 体重与特征参数

再有明显的映射关系. 这说明在 Ku 波段, 体重小于 220mg、体长小于 25mm 的昆虫处在瑞利区或谐振区的起始阶段, RCS 随体型单调递增; 对于体型更大的昆虫, 则处在谐振区, 随着体型的变化, RCS 变化剧烈, 不再有明显的单调映射关系. 根据昆虫的散射特性, 我们将 RCS 随体型单调变化的昆虫定义为“中小昆虫”, 其体重小于 220mg 并且体长小于 25mm; 而 RCS 不随体型单调变化的昆虫定义为“大昆虫”, 其体重大于 220mg 或者体长大于 25mm. 在测量的 150 只昆虫样本中, 129 只为中小昆虫, 21 只为大昆虫. 因此, 在 Ku 波段, 基于 RCS 特征参数拟合的方法, 雷达仅能测量中小昆虫的体型参数.

另外, 从图 2 和图 3 中还可以看到, 对于处在谐振区的大体型昆虫, 其 RCS 可能小于小昆虫的 RCS. 然而在实际雷达测量时, 昆虫的体型不是先验信息. 若通过目标 RCS 估计目标的体型, 会导致估计的大昆虫体重/体长反而小于小昆虫的体重/体长, 导致严重的体重/体长估计误差.

4 昆虫体型参数反演

4.1 大昆虫剔除

为解决大昆虫 RCS 小于小昆虫 RCS 造成的严重体型测量误差, 最优的方法是找到可以反演大体型昆虫体长、体重的方法, 然而遗憾的是, 目前还没找到合适的方法; 妥协的方法是辨别出哪些昆虫是大体型昆虫, 在反演体长和体重时, 剔除大体型昆虫, 从而避免影响雷达测量体长、体重的精度.

由于大昆虫与小昆虫 RCS 重叠, 仅靠目标 RCS 是无法辨别大昆虫的. 我们研究发现, 联合使用相对特征相位 $\Delta\phi$ 和 d 可辨别大昆虫, 如图 4 所示. 图中, 红色圆圈表示体重 220mg 以上、体长 25mm 以上的所以大昆虫样本, 蓝色点表示小体型昆虫样本. 可以看到, 大体型昆虫和中小体型昆虫在 $|\Delta\phi|-d$ 平面上是可以分开的. 大体型昆虫分布在左上角和右下侧, 而中小体型昆虫则分布在对角线附近. 利用图 4 所示的红色线框可将

两种体型昆虫分离开, 其中仅 2 只大昆虫错分为中小体型昆虫, 没有中小昆虫错分为大昆虫, 错误率 1.33% (2/150). 大体型和中小体型昆虫辨别经验公式可表示为:

$$\text{类型} = \begin{cases} \text{大昆虫,} & (d \leq -4.78) \ \& \ (|\Delta\phi| \geq 1.3) \\ \text{或者} & (d > -4.8) \ \& \ (0 \leq |\Delta\phi| \leq 0.7) \\ \text{中小昆虫, 其他} & \end{cases} \quad (11)$$

4.2 体型反演

从图 2 和图 3 可以看到, 中、小体型昆虫的体长、体重与 3 种特征参数均有较好的映射关系. 将大体型昆虫剔除后, 下面将基于 129 只中小体型昆虫数据 (体长 10.3 ~ 24.8mm, 体重 23.3 ~ 218.4mg), 研究特征参数 v 、 d 、 a_0 和 $a_0 \ \& \ \alpha_2$ 与中小体型昆虫体长、体重的关系.

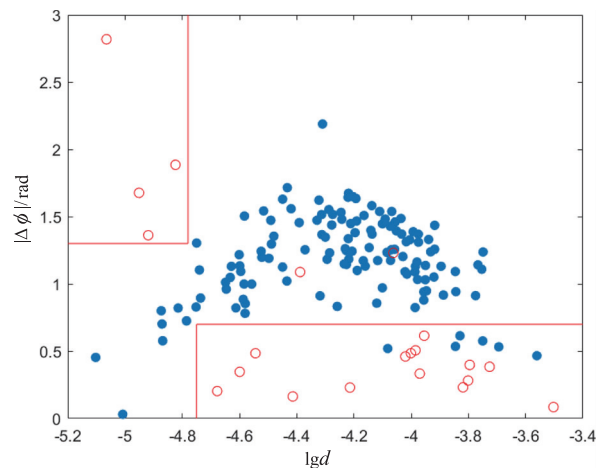


图4 昆虫 $\Delta\phi$ - d 分布图

(1) 体长反演

特征参数 v 、 d 、 a_0 和 $a_0 \ \& \ \alpha_2$ 与昆虫体长的关系分别如图 5(a) ~ (d) 所示. 图中蓝色圆点为昆虫样本, 红色曲线为拟合曲线 (图 5(a) ~ (c)), 网格曲面为拟合曲面 (图 5(d)). 可以看到, 剔除大昆虫后, 这几种特征参数与体长均有较强的相关性, 因此, 可以用

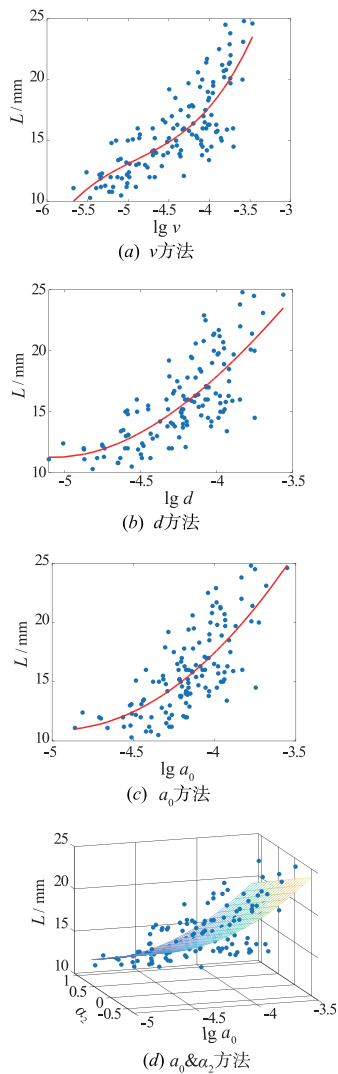


图5 昆虫体长反演

于体长反演. 我们采用多项式拟合和线性回归拟合的方式寻找体长与这些参数的表达式. 采用拟合优度评价拟合效果, 拟合优度的取值范围为 0 ~ 1, 值越靠近 1, 表示拟合效果越好. 拟合时需要选择最佳的阶数, 若拟合阶数过低, 会出现欠拟合, 拟合优度偏小; 阶数越高拟合优度越大, 但是容易出现过拟合. 因此, 最佳拟合阶数的选取原则是避免出现欠拟合和过拟合的前提下选取使拟合优度最大的阶数. 当出现不同的拟合阶数拟合优度相同时, 优先选择低阶的拟合. 对于特征参数 v 、 d 、 a_0 , 采用多项式拟合的方法, 其中 v 和 d 的最佳拟合阶数均为 3, a_0 的最佳拟合阶数为 2; 对于 a_0 & α_2 方法, 采用二元线性回归的方法, 其中 a_0 的最佳拟合阶数为 2, α_2 的最佳拟合阶数为 1. 4 种方法的拟合优度如表 1 所示. 可以看到, v 方法的拟合优度最大, 为 0.65; 其次为 a_0 & α_2 方法, 拟合优度为 0.63; d 和 a_0 方法的拟合优度分别为 0.58 和 0.55. 若利用拟

合的曲线或曲面反演昆虫的体长(即在特征量的每个取值下,以拟合值作为对昆虫体长的估计),则可计算昆虫样本体长反演的平均相对误差(Mean Relative Error, MRE),用于评价反演的误差,如表 1 所示. 可以看到,方法的拟合优度值与 MRE 基本为反比关系,即拟合优度越大, MRE 越小. 可以看到, v 方法和 a_0 & α_2 方法的 MRE 最小, 均为 10.3%; 其次为 d 方法, MRE 为 11.2%; a_0 方法的 MRE 为 11.7%. 因此, 对于 Ku 波段体长反演, v 方法和 a_0 & α_2 方法性能相当, 优于 d 和 a_0 方法. 性能最好的 v 和 a_0 & α_2 方法的拟合关系式(即拟合曲线)为:

$$L_v = 1.82 (\lg v)^3 + 26.72 (\lg v)^2 + 134.31 \cdot \lg v + 243.78, \quad \lg v \in [-5.7, -3.4] \quad (12)$$

$$L_{a_0 \& \alpha_2} = 5.33 (\lg a_0)^2 + 50.68 \cdot \lg a_0 - 3.01 \cdot \alpha_2 + 135.32 \quad \lg a_0 \in [-4.9, -3.5] \quad (13)$$

式(12)、(13)可作为经验公式,用于实际 Ku 波段昆虫雷达的体长反演,所反演的体长单位为 mm.

表 1 昆虫体长反演方法对比

方法	拟合阶数	拟合优度	平均相对误差
v 方法	3 阶	0.65	10.3%
d 方法	3 阶	0.58	11.2%
a_0 方法	2 阶	0.55	11.7%
a_0 & α_2 方法	a_0 -2 阶 α_2 -1 阶	0.63	10.3%

(2) 体重反演

与体长反演类似,我们将研究特征参数 v 、 d 、 a_0 和 a_0 & α_2 与昆虫体重的关系,如图 6(a) ~ (d)所示. 图中蓝色圆点为昆虫样本,红色曲线为多项式拟合曲线(图 6(a) ~ (c)),网格曲面为二元回归拟合曲面(图 6(d)). 体重反演所有参数的最佳拟合阶数均为 2 阶. 4 种方法的拟合优度和 MRE 见表 2. 可以看到, a_0 & α_2 方法的拟合优度最大, MRE 最小(拟合优度 0.92, MRE 12.2%), 拟合效果最好; 其次为 v 方法, 其拟合优度为 0.88, MRE 为 13.4%. 而 d 和 a_0 方法的表现则远差于以上 2 种方法, d 方法的拟合优度为 0.64, MRE 为 18.5%; a_0 方法的拟合优度为 0.57, MRE 为 24.4%. 从图 6 可以看到,对体重超过 100mg 的昆虫,参数 d 和 a_0 与体重的映射关系明显弱于参数 v . 因此,对于 Ku 波段体重反演, a_0 & α_2 方法效果最好, v 方法仅次之,二者性能较为接近. a_0 & α_2 和 v 方法的拟合关系式(即拟合曲线)为:

$$M_v = 10^{0.07(\lg v)^2 + 1.13 \cdot \lg v + 5.51}, \quad \lg v \in [-5.7, -3.4] \quad (14)$$

$$M_{a_0 \& \alpha_2} = 10^{-0.15(\lg a_0)^2 - 0.83 \cdot \lg a_0 - 0.09 \cdot \alpha_2 - 0.32 \cdot \alpha_2 + 1.15}, \quad \lg a_0 \in [-4.9, -3.5] \quad (15)$$

式(14)、(15)可作为经验公式,用于 Ku 波段昆虫雷达体重反演,所反演的体重单位为 mg.

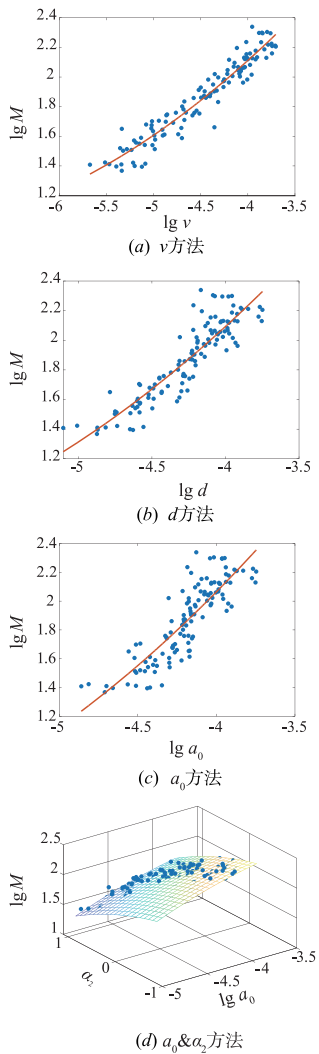


图6 昆虫体重反演

表2 昆虫体重反演方法对比

方法	拟合阶数	拟合优度	平均相对误差
v 方法	2阶	0.88	13.4%
d 方法	2阶	0.64	18.5%
a_0 方法	2阶	0.57	24.4%
a_0 & α_2 方法	a_0 -2阶 α_2 -2阶	0.92	12.2%

5 讨论

在 X 波段,所有昆虫散射均处在瑞利区或谐振区的起始阶段,RCS 随体型线性变化,因此,可以用 a_0 、 α_2 、 v 和 d 等与 RCS 相关的参数反演昆虫的体长、体重.在 Ku 波段,体重 220mg 以下、体长 25mm 以下的昆虫散射仍处在瑞利区或谐振区的起始阶段,RCS 随体型

线性变化;而体型更大的昆虫散射则为谐振区散射,RCS 复杂,不再随体型单调变化.因此,利用 RCS 参数,Ku 波段仅能反演体重 220mg 以下、体长 25mm 以下昆虫的体长、体重.鉴于 X 波段雷达可以很好地测量大昆虫,而 Ku 波段雷达的引入是为了弥补 X 波段雷达对小昆虫探测的不足,因此,无法反演大昆虫的体长、体重对 Ku 波段昆虫雷达是可以接受的.

然而,谐振区大昆虫的 RCS 与中小体型昆虫的 RCS 是重叠,也就是说,大昆虫的 RCS 可能小于中小体型的 RCS.在实际雷达测量时,昆虫的体型不是先验信息,我们不知道测量的昆虫是大昆虫还是中小体型昆虫,仅根据目标的 RCS 反演其体长、体重.因此,大昆虫会被作为中小昆虫进行体长、体重的反演,从而造成严重的测量误差.为了确保目标体型参数测量的准确性,必须辨别并剔除大昆虫.本文发现联合使用相对特征相位 $\Delta\phi$ 和特征参量 d 可辨别出大昆虫,基于测量的 150 只昆虫数据,证明该方法的正确率高达 98.67%,可以解决大昆虫无法剔除造成的测量误差的问题.然而,由于大昆虫数据有限,目前仅能基于 $\Delta\phi$ - d 分布图给出大昆虫与中、小昆虫简单的分界线,导致大昆虫分布的区域为矩形.一般来说,椭圆形可能更符合自然分布规律,但是需要测量更多的数据以支撑界限的划分.

本文建立的经验公式是基于 23 种 150 只昆虫(剔除大昆虫后为 129 只)建立的,因此,至少对于本文所涉及到的中小体型昆虫种类、以及体型与这些种类相近的昆虫是适用的.

当前所用样本最小的昆虫体长 10.3mm、体重 23.3mg,对于更小的昆虫,由于没有数据,尚不清楚体长、体重的反演性能,结果需谨慎使用.若要测量体型更小的昆虫的体型,需要测量体型更小的昆虫样本.

由于目标对电磁波的散射效应与目标的形状、结构、材质以及姿态等因素相关,因此,体型相同的不同昆虫的散射参数不同的现象是存在的.以图 6(a)为例,对于相同体重的不同昆虫,其对应的 lgv 往往是不同的;但是,我们也注意到,相同体重的不同昆虫的 lgv 虽然不同,但是它们都集中在一个很小的范围内波动.最终表现出的规律是:对于不同种类、不同体型的昆虫,其体重与 lgv 有很强的线性相关性.这表明,体型相同的不同昆虫个体的散射参数会有差异,但是这种差异不会太大(在一个小区间波动),不会对体型参数的反演造成颠覆性的影响.

全极化雷达可测量目标 4 种极化分量:HH、HV、VH 和 VV.目标的这 4 种极化回波 RCS 与目标面向雷达的面是有关的.然而,即使目标面向雷达的面不变,当目标以雷达视线为轴旋转时,4 种极化回波 RCS 也会随着变化.这对敏感于目标 RCS 的雷达测量(如本文

中依赖 RCS 反演昆虫体长/体重)是不利的. 本文所用的特征量均是极化不变量,其值仅与目标面向雷达的面有关,而不随目标沿雷达视线旋转而变化. 因此,本文所用特征量在需要精确测量目标 RCS 的极化雷达测量中有较大的应用前景.

6 结论

本文通过分析 Ku 波段实测昆虫样本数据,发现 X 波段昆虫雷达用于体长/体重反演的特征参数 v 、 d 、 a_0 和 a_0 & α_2 对 Ku 波段昆虫雷达同样适用,但是需要识别并剔除大体型昆虫. $\Delta\phi$ 和 d 联合的方法可用于大昆虫的识别和剔除,其正确率为 98.67%. 四种反演方法中, v 和 a_0 & α_2 方法的体长/体重反演性能最好,其中,体长反演误差 10.3%,体重反演误差 12.2%.

参考文献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Desert Locust Crisis | Appeal for Rapid Response and Anticipatory Action in the Greater Horn of Africa [R]. <http://www.fao.org/3/ca7614en/CA7614EN.pdf>, 2020-02-22.
- [2] Wang J, Zhu H, Lei P, et al. CNN based classification of rigid targets in space using radar micro-Doppler signatures [J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(4): 856-862.
- [3] 张浩为, 谢军伟, 师俊朋, 等. 动态优先级下防空相控阵雷达在线交错调度算法[J]. 电子学报, 2018, 46(01): 55-60.
Zhang H W, Xie J W, Shi J P, et al. Online interleaving scheduling algorithm over dynamic priority for the air defense phased array radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(01): 55-60. (in Chinese)
- [4] 张正言, 张剑云, 郑志东, 等. 低信噪比双基地 MIMO 雷达目标角度跟踪算法[J]. 电子学报, 2019, 47(12): 2480-2487.
Zhang Z Y, Zhang J Y, Zheng Z D, et al. Target angle tracking algorithm of bistatic MIMO radar with low signal-to-noise ratio [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(12): 2480-2487. (in Chinese)
- [5] 金旺, 杨玉峰, 李清亮, 等. 曲靖非相干散射雷达在空间碎片探测中的应用[J]. 电子学报, 2016, 46(1): 252-256.
Jin W, Yang Y F, Li Q L, et al. Application of Qujing incoherent scattering radar in space debris detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 46(1): 252-256. (in Chinese)
- [6] 李东, 占木杨, 粟嘉, 等. 一种基于相干积累 CPF 和 NUFFT 的机动目标 ISAR 成像新方法[J]. 电子学报, 2016, 45(9): 2225-2232.
Li D, Zhan M Y, Su J, et al. A novel ISAR imaging method based on coherent integration CPF and NUFFT for maneuvering target [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 45(9): 2225-2232. (in Chinese)
- [7] 张翔宇, 王国宏, 宋振宇, 等. LFM 雷达对临近空间高超声速目标的跟踪研究[J]. 电子学报, 2015, 44(4): 846-853.
Zhang X Y, Wang G H, Song Z Y, et al. Tracking of hypersonic target in near-space with LFM radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 44(4): 846-853. (in Chinese)
- [8] Hu C, Wang Y, Wang R, et al. An improved radar detection and tracking method for small UAV under clutter environment [J]. Science China Information Science, 2019, 62(2): 29306.
- [9] 胡程, 张天然, 王锐. 基于 Radon 变换的昆虫上升下降率提取算法及实验验证[J]. 信号处理, 2019, 35(6): 1072-1078.
Hu C, Zhang T R, Wang R. Ascent and descent rate extraction algorithm and experimental verification based on radon transform [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(6): 1072-1078. (in Chinese)
- [10] Cui K, Hu C, Wang R, et al. Deep-learning-based extraction of the animal migration patterns from weather radar images [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(4): 140304.
- [11] Hu C, Cui K, Wang R, et al. A retrieval method of vertical profiles of reflectivity for migratory animals using weather radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 1030-1040.
- [12] Li W, Hu C, Wang R, et al. Experimental validations of insect orientation extraction based on fully polarimetric measurement [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(21): 7954-7957.
- [13] Chapman J W, Reynolds DR, Smith A D. Vertical-looking radar: a new tool for monitoring high-altitude insect migration [J]. Bioscience, 2003, 53(5): 503-511.
- [14] Hu C, Li W, 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.
- [15] 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.
- [16] Wang R, Hu C, Fu X, et al. Micro-Doppler measurement of insect wing-beat frequencies with W-band coherent radar [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-8.
- [17] Hu C, Kong S, Wang R, et al. Identification of migratory insects from their physical features using a decision-tree support vector machine and its application to radar ento-

- mology[J]. Scientific Reports,2018,8(1):1-11.
- [18] Wang R, Hu C, Liu C, et al. Migratory insect multifrequency radar cross sections for morphological parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2018,57(6):3450-3461.
- [19] Aldhous A C. An Investigation of the Polarization Dependence of Insect Radar cross Sections at Constant Aspect[D]. Cranfield: Cranfield University,1989.
- [20] Hu C, Li W, 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.
- [21] Riley J R. A millimetric radar to study the flight of small insects[J]. Electronics and Communication Engineering Journal,1992,4(1):43-48.
- [22] 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)
- [23] Hu C, Li W, Wang R, et al. Insect flight speed estimation analysis based on a full-polarization radar [J]. Science China Information Sciences,2018,61(10):109306
- [24] Hu C, Li W, 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.

作者简介



李卫东 男,博士,北京理工大学信息与电子学院,主要研究方向:昆虫雷达极化信号处理
E-mail:lwd0539@163.com



王锐(通信作者) 男,北京理工大学信息与电子学院副教授,主要研究方向:昆虫雷达信号处理
E-mail:bit.wangrui@gmail.com

胡程 男,北京理工大学信息与电子学院研究员,主要研究方向:新体制合成孔径雷达系统与信号处理、生物探测雷达系统与信息处理技术

E-mail:hucheng.bit@gmail.com

张天然 男,博士,北京理工大学信息与电子学院,主要研究方向:昆虫雷达信号处理

E-mail:nature_bit@163.com

梁文哲 男,硕士,北京理工大学信息与电子学院,主要研究方向:昆虫雷达杂波抑制

E-mail:527734401@qq.com