

昆虫雷达散射截面特性分析

胡 程 方琳琳 王 锐* 周 超 李卫东
张 帆 郎添娇 龙 腾

(北京理工大学雷达技术研究所 北京 100081)

(北京理工大学卫星导航电子信息技术教育部重点实验室 北京 100081)

摘 要: 昆虫雷达是观测昆虫迁飞最有效的工具。研究昆虫的雷达散射截面(RCS)特性对于昆虫雷达目标识别有着重要意义。该文将分析昆虫的静态RCS特性和动态RCS特性。首先,基于实测的X波段全极化昆虫RCS数据,分析昆虫的静态RCS特性,包括水平和垂直极化RCS随体重变化规律以及昆虫极化方向图随体重的变化规律。其次,总结当前通过电磁仿真研究昆虫RCS特性所用到的介质和几何形状模型,并对比了水、脊髓、干皮肤和壳质与血淋巴混合物4种介质和等体型扁长椭球体、等质量扁长椭球体和三轴椭球体3种几何模型组成的12种介质模型,经过电磁仿真结果与实测数据相对比发现脊髓介质等质量扁长椭球体模型与实测昆虫RCS特性最接近。然后,基于Ku波段高分辨昆虫雷达外场实测昆虫回波数据,分析了昆虫动态RCS的起伏特性,将实测昆虫动态RCS起伏数据与4种经典的RCS起伏分布模型 χ^2 , Log-normal, Weibull和Gamma分布分别进行了拟合分析,从最小二乘拟合误差和拟合优度检验结果可以看出,相比于其他3种模型, Gamma分布可以较好地描述昆虫目标RCS起伏的统计特性。最后,综述了昆虫RCS特性在昆虫雷达测量昆虫朝向、体重等参数测量的应用。

关键词: 昆虫雷达; 昆虫雷达散射截面特性; 电磁仿真; 雷达散射截面起伏

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)01-0140-14

DOI: 10.11999/JEIT190611

Analysis of Insect RCS Characteristics

HU Cheng FANG Linlin WANG Rui ZHOU Chao LI Weidong
ZHANG Fan LANG Tianjiao LONG Teng

(Radar Research Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation
of Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Insect radar is the most effective tool for insect migration observation. In order to realize target recognition of insect radar, it is important to study the RCS characteristics of insects. This paper will analyze the static and dynamic Radar Cross Section (RCS) characteristics of insects. Firstly, based on the measured X-band fully-polarimetric RCS data, the static RCS characteristics of insects are analyzed, including the variations of horizontal and vertical polarization RCS with body weight respectively, and the variation of insect polarization pattern with body weight. Secondly, the dielectrics and geometric models currently used to study the RCS characteristics of insects are summarized by electromagnetic simulation. Twelve dielectric models consisting of four dielectrics (including water, spinal cord, dry skin, and chitin and hemolymph mixture) and three geometric models (including equivalent size prolate spheroid, equivalent mass prolate spheroid and triaxial prolate spheroid) are compared, and it be found that the RCS characteristics of equivalent mass prolate spheroid are closest to that of the real insects. Then, the fluctuation characteristics of insect dynamic RCS are analyzed based on the insect echo data measured in field by a Ku-band high-resolution insect radar. The measured insect dynamic RCS fluctuation data are fitted with four classical RCS fluctuation distribution

收稿日期: 2019-08-12; 改回日期: 2019-11-22; 网络出版: 2019-11-30

*通信作者: 王锐 bit.wangrui@gmail.com

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(31727901)

Foundation Item: The Special Fund for Research on National Major Research Instruments (31727901)

models (χ^2 , Log-normal, Weibull and Gamma distribution), respectively. It can be seen from the least square error of fitting and goodness of fit test that Gamma distribution gives the best description of the statistical characteristics of insect RCS fluctuations. Finally, the application of insect RCS characteristics to insect orientation, mass and body length measurements for insect radars is summarized.

Key words: Insect radar; Insect Radar Cross Section (RCS) characteristics; Electromagnetic simulation; RCS fluctuations

1 引言

昆虫是空中生态系统的重要组成部分, 大量昆虫远距离迁飞促进了生态系统的物质和能量交换^[1]。然而, 害虫的迁飞会对农业生产造成极大危害。例如, 世界重大迁飞性害虫草地贪夜蛾(*spodoptera frugiperda*)通过迁飞于2018年底从缅甸入侵中国西南地区, 并迅速在我国境内由南到北蔓延。草地贪夜蛾是具有远距离迁飞能力、杂食性、高繁殖力和抗药性的“超级害虫”, 严重威胁我国粮食安全^[2]。对迁飞害虫进行有效观测并预测其迁飞路径, 将非常有助于迁飞害虫的精准防治。

雷达在对空观测领域发挥着重要作用^[3,4]。昆虫雷达是观测昆虫迁飞最有效的工具。当前应用最广泛的X波段垂直波束昆虫雷达(Vertical-Looking Radar, VLR)采用“垂直波束-旋转线性极化-圆锥扫描”体制, 可测量迁飞昆虫的飞行速度、位移方向、头部朝向、体重、振翅频率等参数, 已成为迁飞昆虫研究和虫害爆发预警不可或缺的工具^[5]。雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是表征目标散射雷达回波能力的重要参数, 目标的RCS与雷达频率、极化方式、入射角度等因素相关, 本文将目标RCS与这些因素的关系称为目标的RCS特性。正是基于昆虫的RCS特性, VLR得以测量昆虫的朝向、体重等参数, 而这些参数是昆虫雷达目标识别的基础。因此, 研究昆虫的RCS特性对于昆虫雷达目标识别有着重要意义。

研究目标RCS特性的手段主要有实验测量和电磁仿真两种。早期的昆虫RCS特性研究主要是通过实验测量的手段。1966年, 为验证昆虫是雷达“仙波”的来源, Glover等人^[6]使用JAFNA多波段雷达对飞机放飞的自由飞行昆虫进行了观测。结果表明当雷达波长为3.2 cm和10 cm时, RCS随波长的 $-2.7 \sim -1.8$ 次方变化; 当波长范围在10.7~71.5 cm时, RCS随波长的 -4 次方变化。1973年, Riley^[7]利用X波段水平极化雷达测量了蝗虫和粘虫平飞状态下, 雷达从不同方位角观测RCS, 观测结果表明, 昆虫侧面RCS观测值最大, 但是对某些昆虫, 其侧面与头部RCS相差不大。昆虫RCS随雷达观测角度变化明显, 在某些角度具有很深的零点。1979年,

Riley等人^[8]利用X波段旋转极化雷达垂直向上照射, 测量了平飞状态下不同极化方向的昆虫腹部RCS(即昆虫极化方向图), 结果表明, 当极化方向平行于昆虫体轴时, RCS最大, 极化方向垂直于昆虫体轴时出现RCS的次峰值。1985年, Riley^[9]测量了不同体型昆虫的极化方向图, 发现昆虫极化方向图的形状与昆虫体型相关, 对于小昆虫, 当极化方向平行于昆虫体轴时RCS最大, 当极化方向垂直于昆虫体轴时RCS最小; 随着昆虫体型的增大, 极化方向垂直于体轴的方向会出现次峰值; 随着昆虫体型的继续增大, 次峰值逐渐变大并最终超过极化方向平行于昆虫体轴的RCS, 也就是说, 对于大体型昆虫, 当极化方向垂直于昆虫体轴时RCS最大。同时, Riley总结了X波段线极化雷达测量的不同体型昆虫RCS随体重的变化规律, 昆虫RCS的范围大概从 10 cm^2 (蝗虫)到 10^{-5} cm^2 (蚜虫)。另外, Riley^[9]发现昆虫平均RCS可以用等质量的水球RCS近似。1989年, Aldhous^[10]测量了54只不同体型昆虫的极化方向图, 验证了Riley得出的关于极化方向图随体型变化的结论, 并给出了利用昆虫RCS特性进行朝向和体重估计的应用。

除实验测量, 昆虫RCS电磁仿真研究也初步有了一些进展。Riley^[9]提出昆虫平均RCS可利用同等质量水球RCS近似, 然而, 水球模型RCS不能描述昆虫RCS随方位角和极化方向的变化规律, 因为水球RCS不随方位和极化变化^[10]。相对于水球模型, 椭球体模型是更合理的昆虫模型。文献[11]曾提出基于瑞利区椭球模型的鸟类RCS理论, 并应用到昆虫, 发现在瑞利区等体型的椭球模型可以较好地描述昆虫RCS, 但是在谐振区昆虫RCS太复杂而无法用椭球模型描述^[12]。文献[13]结合已有的昆虫RCS实测数据, 探究了水介质和壳质与血淋巴混合物介质与不同几何模型组合成的介质模型描述昆虫X波段RCS特性的能力, 结果表明, 相对于水介质模型, 壳质与血淋巴混合物组成的椭球模型仿真结果更接近实测昆虫RCS。文献[14]提出利用脊髓介质长椭球体模型仿真研究昆虫多频RCS特性, 并通过实测数据验证该模型可较好地描述昆虫多频RCS特性。

以上研究主要针对昆虫静态RCS, 即非运动状

态下昆虫RCS随极化、频率、方位角等因素的变化特性。然而,昆虫雷达在实际应用时,观测到的昆虫都是运动的^[15]。昆虫振翅运动给昆虫雷达目标识别带来了新特征^[16,17],但同时运动引起的RCS起伏也给雷达目标识别和后续体重等参数的测量带来了挑战。因此,很有必要研究昆虫动态RCS特性。受昆虫飞行造成的观测角度变化以及拍动翅膀等因素的影响,昆虫RCS随时间随机起伏变化,因此,在实际观测中很难快速、实时地获取目标在任意环境下的RCS真值。为了更加准确地描述目标动态RCS的起伏特性,通常将其当作随机变量,利用统计理论对其进行建模分析^[18],得到目标的RCS起伏模型,为目标的检测跟踪算法提供理论依据。

经典的Swerling目标起伏模型利用指数分布和4自由度 χ^2 分布来描述RCS统计特性^[19]。然而,大量的动态实测数据表明,对于一些复杂目标,Swerling模型很难对其进行准确描述,因此,许多文献将经典Swerling模型进行了扩展。1964年,Weinstock^[20]提出了具有可变自由度的 χ^2 分布模型。1983年,Lewinski^[21]提出用Gamma分布来描述具有非平稳或非均匀散射特性的目标或杂波,该分布包含指数分布和4自由度 χ^2 分布。2003年,Shnidman^[22]将Swerling分布模型做了进一步扩展,提出了非中心Gamma目标分布模型来适应具有恒定主散射体的目标。基于一些目标和杂波分布的经验拟合结果,Weibull分布^[23]和Log-normal分布^[24]模型被提出来描述具有长拖尾特性的目标RCS分布。Log-normal分布可以用来描述圆柱、平板和阵列目标^[25],Weibull分布模型可以较好地拟合飞机和双端锥目标的RCS统计特性^[26]。文献^[27]以歼击机和直升机为对象,基于Kolmogorov-Smirnov (K-S)拟合优度检验方法,分析了 χ^2 分布、Log-normal分布和瑞利分布3种模型对RCS动态测量数据统计分布的拟合效果,为目标回波的精确模拟和检测提供理论依据。现有关于RCS起伏研究的文献的研究对象多为飞机、舰船等大尺寸目标^[28,29],对于小尺寸昆虫目标RCS起伏特性鲜有研究。

本文将综述昆虫的RCS特性,包括静态RCS特性和动态RCS起伏特性。首先,基于在微波暗室内测量的昆虫全极化RCS数据分析昆虫RCS的极化特性,探究昆虫极化方向图随体型变化的原因;其次,将基于电磁仿真全面对比当前生物RCS研究中用到的4种介质(水、脊髓、干皮肤和壳质与血淋巴混合物)和3种椭球体模型(等体型扁长椭球体、等质量扁长椭球体和三轴椭球体),通过与实测数据对比,探索最适合昆虫RCS电磁仿真的介质模型;

然后,基于Ku波段昆虫全极化雷达采集到的昆虫目标回波数据,对昆虫目标RCS随时间的起伏特性进行了建模分析,将实际观测的动态RCS起伏数据的统计模型与4种经典分布模型 χ^2 , Log-normal, Weibull和Gamma分布进行了拟合分析,并采用最小二乘拟合准则及K-S拟合优度检验方法对拟合效果进行了评估,从拟合曲线的吻合程度,拟合误差和优度检验结果3个方面分析,研究描述昆虫目标的RCS起伏特性的最佳模型;最后,综述昆虫RCS特性在昆虫雷达朝向和体重等参数反演中的应用。

2 昆虫静态RCS特性

当电磁波照射至某一物体时,物体会将入射能量向各个方向散开,这种现象称作散射。返回到波源方向的散射能量即为后向散射,其强度用物体的RCS来描述。RCS定义为^[30]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_0|^2} \quad (1)$$

其中, E_0 表示目标处入射波的电场强度, E_s 是雷达处接收到的由目标散射的电磁波的电场强度, R 通常取为雷达到目标的距离。RCS的物理意义为雷达接收机处散射功率密度与目标处的入射功率密度之比。目标RCS的取值由目标特性和雷达入射波特性共同决定。

2.1 昆虫静态RCS实验测量

为了研究昆虫静态RCS特性,本文在微波暗室中开展了昆虫RCS全极化测量实验。实验采用4端口矢量网络分析仪(R&S ZVA40)、1对X波段双极化天线和空心喇叭腔搭建全极化RCS测量系统。两个天线中,一个作为发射天线,另外一个作为接收天线。每个天线各有水平(H)极化和垂直(V)极化两个馈口,连接到矢量网络分析仪的4个端口,可测量目标HH, HV, VH和VV 4种极化RCS。两个天线放置在内壁贴满吸波材料的喇叭腔的下端口,垂直向上照射,天线之间通过电磁屏蔽隔板隔离,避免发射天线泄露信号被接收天线直接接收。昆虫背部粘在回波可忽略的细PE线(直径0.1 mm)上,通过PE线固定在喇叭腔上端口的正中间,并使之保持水平飞行状态,昆虫体轴与H极化平行。昆虫距离天线约2 m。通过测量直径32.2 mm的金属球实现昆虫RCS定标。

矢量网络分析仪的测量中心频率设置为10 GHz。实验所测量的昆虫样本是利用诱虫灯在前一天夜间捕捉的,在昆虫身体水分流失开始前完成测量。所测量的昆虫共10只,体重范围25.6~935.3 mg,体长范围11.1~40 mm,体宽范围2.8~12.4 mm。昆虫样本的详细信息如表1所示。

表 1 实验昆虫样本信息

序号	昆虫名称	体长(mm)	体宽(mm)	体重(mg)
1	未辨识飞蛾1#1	11.1	2.8	25.6
2	未辨识飞蛾1#2	15.0	3.0	35.5
3	枯叶蛾#1	16.7	4.0	72.2
4	枯叶蛾#2	17.9	5.0	105.0
5	小地老虎	19.5	4.9	218.4
6	霜天蛾	34.8	9.1	319.7
7	未辨识飞蛾2	22.9	6.8	400.7
8	甘薯天蛾#1	38.9	9.0	530.1
9	甘薯天蛾#2	40.0	12.4	680.4
10	甘薯天蛾#3	36.8	10.2	935.3

昆虫RCS与体型的关系如图1所示。对于水平极化RCS(HH, 测量时水平极化平行于昆虫体轴, 因此这里HH表示极化方向平行于昆虫体轴时的RCS), 在100 mg以下, 昆虫RCS随体重的增大而快速增大, 表现为瑞利区RCS特性; 当体重大于100 mg, RCS随体重的增大而在高位波动, 表现为谐振区RCS特性。在所测量的25.6~935.3 mg昆虫体重范围内, 水平极化RCS的分布范围为-55~-32 dBsm。对于垂直极化RCS(VV, 这里表示极化方向垂直于昆虫体轴时的RCS), 在25.6~935.3 mg昆虫体重范围内, 昆虫RCS随体重的增大而增大, 表现出瑞利区RCS特性, 垂直极化RCS在当前体重范围下的分布范围为-66~-30 dBsm。相比之下, 昆虫垂直极化RCS的分布范围更广。

传统VLR波束垂直向上照射, 线极化方向360°旋转, 可测量昆虫腹部不同极化方向的RCS(即极化方向图)。极化方向图可由目标散射矩阵计算得到。假设目标散射矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12}e^{j\beta} \\ s_{21}e^{j\beta'} & s_{22}e^{j\gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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。对于单基地雷达, $s_{12}e^{j\beta} = s_{21}e^{j\beta'}$ 。

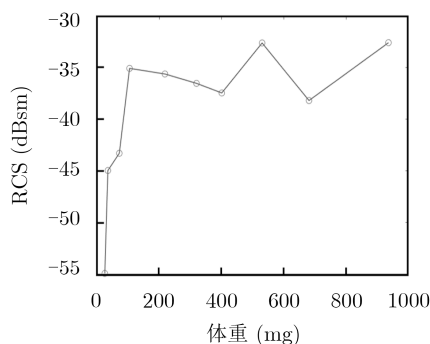
以H极化方向为参考方向, 对于单基地线极化雷达, 当极化方向为 α (逆时针为正)时, 对应的发射和接收的归一化有效天线长度均为

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

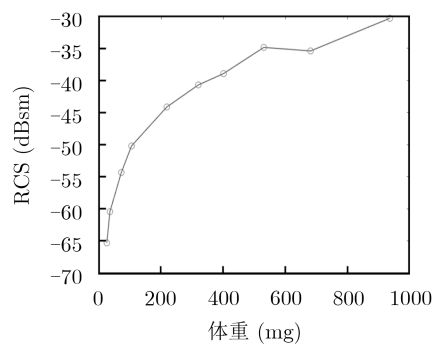
极化方向图可表示为

$$\sigma(\alpha) = |\mathbf{h} \mathbf{S} \mathbf{h}|^2 = \left| \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12}e^{j\beta} \\ s_{21}e^{j\beta'} & s_{22}e^{j\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \right|^2 \quad (4)$$

图2中给出了4只实测昆虫的极化方向图, 4只昆虫的体重是递增的, 体重分别为25.6 mg, 319.7 mg, 400.7 mg和935.3 mg。需要注意的是, 测量时昆虫的体轴方向平行于H极化, 因此0°对应昆虫体轴方向, 90°对应垂直于昆虫体轴的方向。可以看到, 极化方向图随着昆虫体重的增大而有规律的变化。具体而言, 小昆虫的极化方向图为“8”字形(图2(a)), RCS最大值出现在极化方向平行于昆虫体轴时, RCS最小值出现在极化方向垂直于昆虫体轴时; 随着昆虫体重的增大, 极化方向垂直于昆虫体轴的RCS逐渐变大, 极化方向图变为类似操场跑道的形状(图2(b)); 随着昆虫体重的继续增大, 极化方向图变为横长的“十”字形(图2(c)), 在平行和垂直于昆虫体轴方向均出现峰值; 对于体重最大的昆虫, 极化方向垂直于昆虫体轴的RCS超过极化方向平行于昆虫体轴的RCS, 因而最大RCS出现在极化方向垂直于昆虫体轴时。极化方向图的这种形状变化是由于极化方向平行和垂直于体轴的RCS的增速差异造成的。由图1可以看到, 对于体重小于200 mg的昆虫, 极化方向平行于昆虫体轴的RCS值及随体重的增速均大于极化方向垂直于昆虫体轴的RCS, 因此, 小于200 mg昆虫的极化方



(a) 水平极化RCS



(b) 垂直极化RCS

图 1 RCS与昆虫体重关系

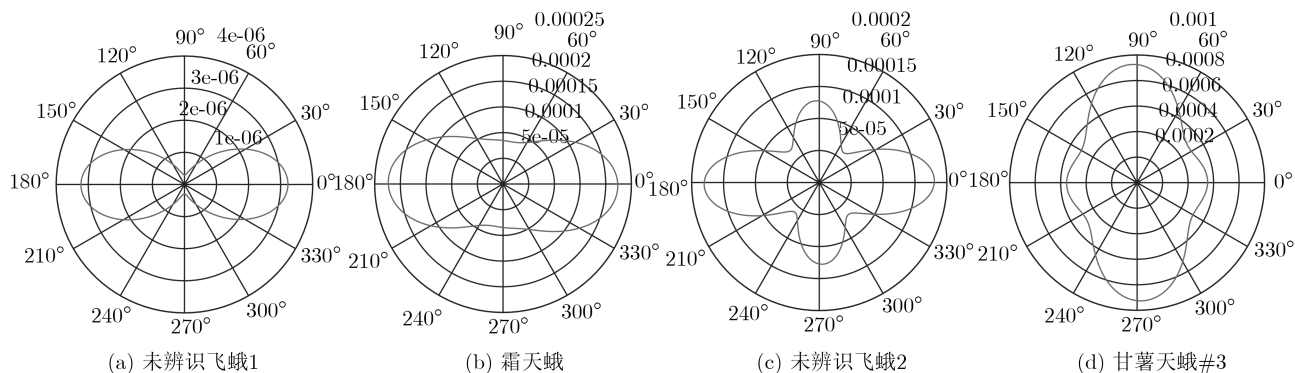


图2 实测昆虫RCS极化特性

向图形状都类似于图2(a); 昆虫体重大于200 mg以后, 极化方向平行于昆虫体轴的RCS进入谐振区, RCS随体重的增大而起伏, 整体平稳, 而极化方向垂直于昆虫体轴的RCS仍然随体重的增大而增大, 且在体重大于600 mg后超过极化方向平行于昆虫体轴的RCS, 因此, 大于200 mg昆虫的极化方向图经历了“8”字形、操场跑道形状、横长的“十”字形等形状变化, 并在体重大于600 mg后变为竖长的“十”字形。

2.2 昆虫静态RCS电磁仿真

通过实验测量研究昆虫的RCS特性是最直接的方法, 但是实验测量有很多局限性: (1)费时费力、成本高; (2)仅能测量昆虫简单的RCS特性, 难以研究更复杂RCS特性。例如可用于研究上文给出的昆虫腹部不同极化方向的RCS, 但是昆虫全空域RCS特性难以开展; (3)由于所用昆虫样本主要靠诱捕, 不同样本昆虫的体型差异较大, 难以控制变量研究昆虫某一体型参数与RCS的关系。例如, 难以研究相同体宽昆虫的RCS与体长的关系。

通过电磁仿真研究昆虫RCS特性则可以避免以上局限。电磁仿真首先利用相关建模软件或电磁仿真软件中自带的建模功能根据目标外形结构对研究目标进行3维建模, 然后设定仿真频段和目标介电常数等仿真参数, 最后根据目标尺寸与仿真波长的比值关系确定求解RCS的方法(时域求解法、频域求解法等)并利用电磁仿真软件对所建立的目标3维模型进行电磁仿真, 求解RCS。相对于实验测量, 电磁仿真具有易于操作、成本低、目标尺寸可控制、可研究复杂的目标RCS特性等优点。本文将利用FEKO电磁仿真软件探究描述昆虫RCS的最佳仿真介质模型。

2.2.1 建立介质模型

电磁仿真精度主要取决于目标几何模型和介电常数是否合理。早期研究认为, 昆虫体内的水是电磁散射的主要成分^[31], 因此以等质量水球的散射特性来近似昆虫的散射特性。球体模型是所有3维散

射模型中最简单的, 因为它具有纯径向对称性, 并且可以基于米氏理论精确计算其RCS特性^[30]。然而, 昆虫的RCS更为复杂, 因为电磁波能量可以进入昆虫体内, 并在离开前从昆虫体内的边界和不均匀处进行反射^[30]。Riley将昆虫的RCS变化与水滴的RCS变化进行了比较, 发现水球的RCS与相同质量的昆虫的平均RCS虽然十分接近, 但并不能给出任何关于昆虫RCS随方位角和极化参数方面的描述, 因为水球的RCS是独立于这些参数的^[9]。因此, 等质量水球模型只能作为昆虫RCS平均意义上的大概估计, 不能用于研究更精细的昆虫RCS特性。考虑到水球体模型的缺陷, 将昆虫建模为电介质椭球体更为合理^[32,33], 这样就可以从不同入射角度和极化参数等方面对昆虫进行建模和解释。因此, 本文采用形状更接近昆虫的椭球模型进行建模。椭球模型分为扁长球体模型和三轴椭球体模型两种。如图3所示, 扁长球体模型的高度 h 与短轴相同(即 $a \neq b = h$), 三轴椭球体模型的长轴 a 、短轴 b 及高度 h 各不相同(即 $a \neq b \neq h$)。

目标介电特性会对后向散射产生显著影响^[30]。昆虫的身体组成是复杂的, 不同的部位由不同的组织构成, 为了避免通过创建内部边界来增加模型的复杂性, 在模型中不能给昆虫身体的每个部位分配不同的介电特性^[34]。因此, 仿真中昆虫模型使用均一的介电常数, 用以表示这些差异的均值。为了探究介质对昆虫目标RCS的影响, 在两种椭球模型的

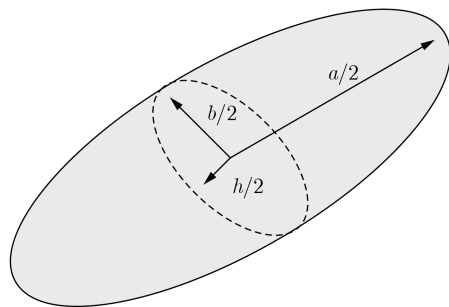


图3 昆虫目标几何模型

基础上,本文选取水、脊髓、干皮肤以及壳质与血淋巴混合物4种生物组织介质,以验证何种介质最接近昆虫真实介质,4种介质参数如表2所示。水是传统的用于研究昆虫RCS的介质;脊髓介质在文献[14]提出用于仿真研究昆虫多频RCS特性;干皮肤介电在文献[34]中用来研究蝙蝠的RCS特性;壳质与血淋巴混合物是文献[35]提出的用于研究壳质昆虫RCS的仿真介质。

表2 介质密度及相对介电常数

介质	密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	X波段相对介电常数
水	1.000	60.30-33.10j
脊髓	1.038	23.80-10.84j
干皮肤	1.045	31.30-14.41j
壳质与血淋巴混合物	1.260	34.30-18.60j

仿真将以表1中实测的10只昆虫的体型为原型,建立昆虫几何模型。然而,对于扁长球体模型,由于不同介质密度差异,若模型尺寸(体长和体宽)与实际昆虫相同,则质量会有较大差异;同样地,若模型质量与实际昆虫相同,则模型尺寸与实际昆虫会有较大差异。为了探究哪种模型更合理,本文将扁长球体模型分为等尺寸椭球体和等质量椭球体两种模型,其中,等尺寸椭球体模型长轴 a 和短轴 b (高 h)与实际昆虫体长 l 和体宽 w 相同,即满足

$$\left. \begin{array}{l} a = l \\ b = h = w \end{array} \right\} \quad (5)$$

等质量椭球体模型的质量和体轴比与实际昆虫相同,即满足

$$\left. \begin{array}{l} b = h \\ a/b = l/w \\ m = m_0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中, m_0 为实际昆虫的体重, m 为模型的体重,计算公式为

$$m = \pi abh\rho/6 \quad (7)$$

其中, ρ 为介质密度。

三轴椭球体模型的长轴 a 和短轴 b 与实际昆虫体长 l 和体宽 w 相同,通过调整高 h 使得模型体重与实际昆虫体重相同,即满足

$$\left. \begin{array}{l} a = l \\ b = w \\ h = 6m_0/(\pi ab\rho) \end{array} \right\} \quad (8)$$

但是实际昆虫的高 h 一般与体宽 b 相同,因此该模型的高 h 存在误差。

由以上建模过程可知,3种模型各有缺点,等尺寸椭球体模型存在质量误差,等质量椭球体模型存在体长和体宽误差,三轴椭球体模型存在高度误

差。表3、表4和表5分别给出了3种模型与实际昆虫体型的误差百分比(定义为: $100 \times (\text{实际值} - \text{仿真值}) / \text{实际值}$)。可以看到,4种介质的等尺寸椭球体模型的质量均大于昆虫的实际质量,百分比误差在-151%~

表3 等尺寸椭球体模型质量百分比误差(%)

昆虫序号	水	脊髓	干皮肤	壳质混合物
1	-77.99	-84.75	-86.00	-124.27
2	-99.12	-106.68	-108.08	-150.88
3	-93.78	-101.14	-102.49	-144.16
4	-123.15	-131.63	-133.19	-181.17
5	-12.25	-16.51	-17.30	-41.43
6	-371.97	-389.91	-393.21	-494.69
7	-38.37	-43.63	-44.59	-74.34
8	-211.23	-223.05	-225.23	-292.14
9	-373.30	-391.29	-394.60	-496.36
10	-114.34	-122.48	-123.98	-170.06
平均误差	-151.55	-161.11	-162.87	-216.95

表4 等质量椭球体模型体长百分比误差(%)

昆虫序号	水	脊髓	干皮肤	壳质混合物
1	17.48	18.50	18.69	23.60
2	20.51	21.49	21.67	26.41
3	19.79	20.78	20.96	25.74
4	23.48	24.42	24.59	29.15
5	3.78	4.97	5.18	10.91
6	40.38	41.12	41.25	44.80
7	10.26	11.37	11.57	16.91
8	31.51	32.35	32.51	36.59
9	40.44	41.18	41.31	44.86
10	22.44	23.40	23.57	28.19
平均误差	23.01	23.96	24.13	28.72

表5 三轴椭球体模型高度百分比误差(%)

昆虫序号	水	脊髓	干皮肤	壳质混合物
1	43.82	45.87	46.23	55.41
2	49.78	51.62	51.94	60.14
3	48.39	50.28	50.62	59.04
4	55.19	56.83	57.12	64.43
5	10.91	14.17	14.75	29.29
6	78.81	79.59	79.72	83.18
7	27.73	30.37	30.84	42.64
8	67.87	69.05	69.25	74.50
9	78.87	79.65	79.78	83.23
10	53.34	55.05	55.35	62.97
平均误差	51.47	53.25	53.56	61.49

-217%之间,其中,水介质模型的质量与实际质量最接近,壳质混合物介质模型的质量与实际质量差距最大;4种介质的等质量椭球体模型的体长均小于昆虫的实际体长,体长百分比误差在23%~29%之间,同样地,水介质模型的体长与实际体长最接近,壳质混合物介质模型的体长与实际体长差距最大;4种介质的三轴椭球体模型的高度均小于昆虫的实际高度,高度百分比误差在51%~62%之间,水介质模型的高度与实际高度最接近,壳质混合物介质模型的高度与实际高度差距最大。3种模型中,等质量模型的体型误差百分比最小。

2.2.2 最佳介质模型

对表1中每只昆虫均建立了12种介质椭球模型(3种几何模型,每种对应4种介电常数),通过FEKO电磁仿真软件仿真了每种模型在10 GHz频点下极化方向平行和垂直于体轴的RCS。因此,每种介质椭球模型均对应10只不同体型的昆虫。根据实测的昆虫RCS,可计算每种介质模型仿真RCS(单位 m^2)百分比误差的均值,如图4所示,其中横坐标为方便表示,将3种几何模型和4种介质进行了编号,“-”前的编号1-3分别表示:1等尺寸椭球体模型、2等质量椭球体模型、3三轴椭球体模型;“-”后的编号1-4分别表示:1水、2脊髓、3干皮肤、4壳质与血淋巴混合物。例如,2-3表示等质量椭球体模型干皮肤介质。从中可以看到,在3种几何模型中,等质量椭球体模型(2-X)的RCS百分比误差明显小于另外两种模型的误差,因此可认为等质量椭球体模型是3种模型中最合理的。表6列出了以等质量椭球体模型的4种介质仿真的极化方向平行和垂直于昆虫体轴的RCS百分比误差。可以看到,极化方向平行和垂直于昆虫体轴的RCS有较大差异。极化方向平行昆虫体轴时,脊髓介质的RCS误差最小,为65.9%;壳质与血淋巴混合物介质的RCS误差与脊髓介质接近,为68.8%;另外两种介质,误差均大于100%,其中水介质模型误差最大,达到224.3%。

极化方向垂直昆虫体轴时,4种介质的RCS误差均小于极化方向平行昆虫体轴时的RCS误差,壳质与血淋巴混合物介质的RCS误差最大(32.8%),但是仍远远小于极化方向平行昆虫体轴时最小的RCS误差(65.9%);干皮肤介质的RCS误差最小,为6.7%;其次是脊髓介质,为19.7%。综合以上分析可知,脊髓介质的综合RCS误差最小。因此,脊髓介质等质量椭球体模型是12种介质模型中RCS最接近实际昆虫的模型。

3 昆虫动态RCS特性分析

雷达在实际观测昆虫时,受观测角度变化、昆虫拍动翅膀等多种因素影响,昆虫RCS通常表现为不规则的随机起伏。因此,通常将动态RCS数值当作随机变量,利用统计理论来研究目标RCS起伏情况。本文将基于昆虫雷达实测昆虫数据,对昆虫动态RCS起伏特性进行分析,研究昆虫RCS起伏模型,研究流程如图5所示。

3.1 实测昆虫RCS数据

本文所用数据是基于Ku波段高分辨昆虫雷达采集的夜间高空自由飞行昆虫的动态RCS数据。雷达的中心频率为16.2 GHz,带宽为800 MHz。测量实验于2018年7月16日在内蒙古自治区锡林浩特市中国农科院植保所观测站开展,雷达放置在高空诱虫灯旁边,垂直对天观测。所用昆虫飞行高度为200~400 m范围,仅采用HH极化方式下采集到的昆虫回波数据。由于雷达垂直对空观测,观测场景干扰很少,目标检测之后,利用目标运动特性,基于时频分析即可辨别出昆虫目标,并提取出回波。消除天线方向图调制增益影响后,得到目标RCS随时间起伏变化的采样值。

由雷达方程可知,目标回波信号的瞬时功率与RCS成正比,并且与目标在雷达波束中的位置有关,受主瓣内天线方向图调制的影响。为分析RCS起伏规律,需首先消除波束主瓣天线方向图的影响。雷达波束增益通常可以用高斯函数近似为^[36]

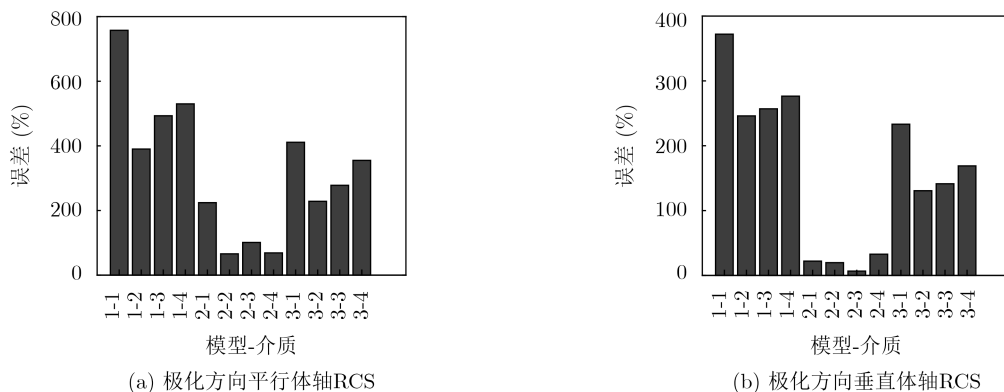


图4 不同模型-介质仿真RCS百分比误差

表 6 等质量椭球体模型RCS百分比误差(%)

介质	极化方向平行 体轴RCS	极化方向垂直 体轴RCS
水	224.3	22.1
脊髓	65.9	19.7
干皮肤	101.2	6.7
壳质与血淋巴混合物	68.8	32.8

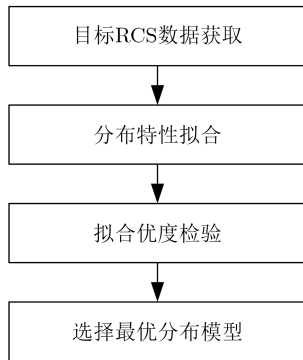


图 5 昆虫目标RCS起伏模型研究流程

$$G(\theta) = G_0 \exp\left(-\frac{1}{2}k\frac{\theta^2}{\theta_{0.5}^2}\right) \quad (9)$$

其中, G_0 为波束中心轴上的增益, $k = 8 \ln 2$ 为常数, $\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度, θ 为波束中心轴与目标到波束中心连线的夹角。

由于在主瓣范围内天线方向图的特性与2次函数相似, 因此, 本文对目标回波功率进行2阶拟合, 得到天线方向图调制后的目标平均回波功率, 如图6(a)所示。将目标回波功率与拟合平均功率做差后, 可消除极化方向图调制以及目标平均回波功率, 得到随时间变化的RCS相对起伏值($\Delta\sigma$), 如图6(b)所示。 $\Delta\sigma$ 是目标RCS相对于其平均RCS的起伏幅度, 其优点是不受目标绝对RCS的影响。

3.2 昆虫RCS起伏特性拟合

不同类型目标RCS的起伏通常符合不同的分布

类型, 因此采用不同类型的分布函数进行描述。目前广泛使用的雷达目标RCS统计模型包括 χ^2 分布、Log-normal分布、Weibull分布和Gamma分布等^[37]。本文采用这4种常用分布模型对昆虫目标的RCS起伏进行最小二乘拟合, 分析昆虫RCS起伏的分布类型。4种分布函数的表达式如表7所示。

最小二乘拟合误差^[28]定义为

$$E = \sum_i [P_\varepsilon(\sigma_i) - P_m(\sigma_i)]^2 \quad (10)$$

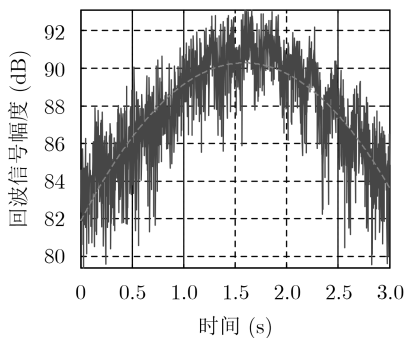
其中, $P_\varepsilon(\sigma_i)$ 为RCS起伏值在不同统计区间的概率值, $P_m(\sigma_i)$ 为分布模型拟合得到的在相同区间的概率值。基于4种PDF分布模型, 本文对5只随机挑选的实测昆虫RCS起伏值进行拟合, 图7所示的是其中一只昆虫RCS起伏概率密度函数(PDF)拟合结果, 拟合误差如表8所示。5只昆虫RCS起伏值的PDF拟合结果是一致的。从图7可以看到, Log-normal分布和Gamma分布拟合结果最接近实际昆虫RCS起伏PDF, χ^2 分布与实测数据差异较大。由表8可知, Gamma分布拟合结果略优于Log-normal分布的拟合结果。此外, 本文随机挑选了另外50只昆虫样分析RCS起伏PDF分布, 结果均与这5只昆虫一致(受限于篇幅, 不一一列出)。

3.3 拟合优度检验

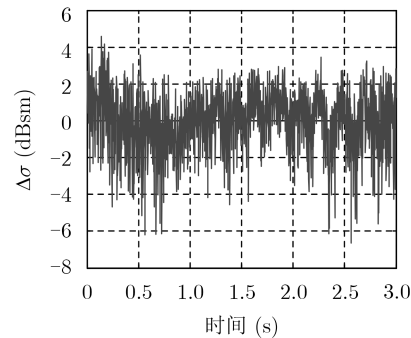
为了验证不同统计模型对于昆虫目标动态RCS数据分布的拟合是否准确(即昆虫RCS起伏分布是否符合假定的分布类型), 本文采用K-S(Kolmogorov-Smirnov)拟合优度检验方法^[37]来衡量昆虫RCS起伏的拟合效果, K-S检验公式为

$$D = \max |F'(x) - F(x)| \quad (11)$$

其中, $F'(x)$ 表示样本数据的累积概率函数, 即目标RCS起伏值的统计累积概率分布, $F(x)$ 为分布模型的拟合累积概率函数。 D 值表示K-S检验参数, 其原假设 H_0 : 两个数据分布一致或者数据符合理论



— 回波信号 --- 拟合数据
(a) 昆虫回波信号幅度及拟合值



(b) 昆虫RCS起伏幅度

图 6 昆虫RCS起伏

表 7 分布函数表达式

分布函数	表达式	参数
χ^2	$p(\sigma) = \frac{m}{\Gamma(m)\bar{\sigma}} \left[\frac{m\sigma}{\bar{\sigma}} \right]^{m-1} \exp \left[-\frac{m\sigma}{\bar{\sigma}} \right]$	$\bar{\sigma}$ 为平均值, $2m$ 为自由度
Log-normal	$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{4\pi\ln\rho}} \exp \left\{ -\frac{(\ln\sigma - \sigma_0)^2}{4\ln\rho} \right\}$	σ_0 为中值, ρ 为平均中值比
Gamma	$p(\sigma) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \sigma^{\alpha-1} \exp \left(-\frac{\sigma}{\beta} \right)$	α 是形状参数, β 是尺度参数
Weibull	$p(\sigma) = \frac{b}{a} \left(\frac{\sigma}{a} \right)^{b-1} \exp \left(-\left(\frac{\sigma}{a} \right)^b \right)$	a 是尺度参数, b 是形状参数

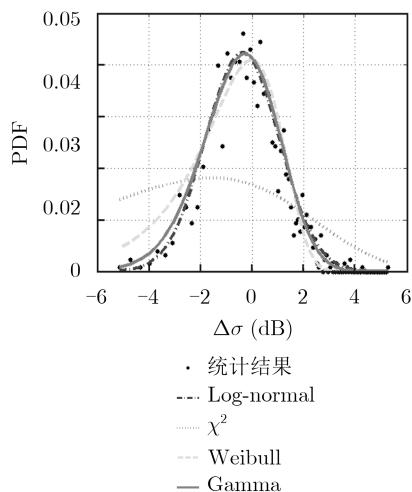


图 7 昆虫RCS起伏幅度PDF拟合

表 8 昆虫RCS起伏PDF分布拟合误差

昆虫序号	RCS起伏 样本点数	Log-normal	χ^2	Gamma	Weibull
1	1500	0.0812	0.3870	0.0747	0.0960
2	1250	0.1288	0.5774	0.1204	0.1307
3	1280	0.0724	0.7709	0.0710	0.1102
4	1340	0.0992	0.5652	0.0960	0.1262
5	1460	0.0861	0.3555	0.0765	0.0903
均值		0.0935	0.5312	0.0877	0.1107

分布。在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 当样本数目较大(远大于100时), 查表可知K-S检验的临界值为0.13403。因此, 当实际观测值 $D < 0.13403$, 则接受 H_0 , 否则拒绝 H_0 。4种统计模型下, 昆虫RCS起伏分布K-S检验结果如表9所示。可以看到, 仅 χ^2 分布的检验结果为拒绝 H_0 , 其他3种分布检验结果均为接受 H_0 。但是, Gamma分布的 D 值最小, 这说明昆虫RCS起伏分布最接近Gamma分布, 与前面的分析一致。因此, 可以得出结论, 昆虫RCS起伏符合Gamma分布。

4 昆虫RCS特性应用

研究昆虫的RCS特性对于昆虫雷达目标识别有

表 9 昆虫RCS起伏PDF分布K-S检验参数 D 值

昆虫序号	RCS起伏 样本点数	Log-normal	χ^2	Gamma	Weibull
1	1500	0.0221	0.2141	0.0181	0.0370
2	1250	0.0306	0.2045	0.0169	0.0266
3	1280	0.0195	0.2094	0.0096	0.0342
4	1340	0.0211	0.1831	0.0181	0.0356
5	1460	0.0258	0.1583	0.0145	0.0271
均值		0.0238	0.1939	0.0154	0.0321

着重要意义。基于对昆虫的RCS特性的研究结果, 昆虫雷达实现了对昆虫朝向、体重和体长等参数的测量。下面将介绍如何利用昆虫RCS特性测量这些参数。

4.1 昆虫朝向测量

昆虫朝向是指昆虫身体指向, 飞行时昆虫朝向通常与位移的方向是不同的, 这是因为昆虫飞行位移方向是昆虫朝向和风向矢量叠加的结果。基于扫描雷达的昆虫朝向测量, 人们发现了昆虫迁飞时的共同定向行为^[38]; 基于VLR的昆虫朝向测量, 人们发现昆虫可通过调整朝向控制位移方向, 以实现在最佳路线迁飞^[39]。研究昆虫朝向对于理解昆虫迁飞机理具有重要意义。

传统扫描体制昆虫雷达测量昆虫朝向是基于昆虫RCS的方位特性, 即昆虫身体侧面的RCS大于头部和尾部的RCS。当雷达扫描观测经过雷达上方的迁飞虫群时, 若虫群存在共同定向行为, 当观测角度对着身体侧面时, 回波强, 可观测的昆虫数量多、探测距离远; 当观测角度对着头和尾时, 回波弱, 可观测的昆虫数量少、探测距离近, 因此, 虫群回波PPI显示呈现出“哑铃”的形状。与哑铃延伸方向垂直的方向即为虫群的朝向^[38]。由以上测量方法可知, 传统扫描体制昆虫雷达仅能测量虫群的共同定向。

由于加入极化测量, VLR可测量昆虫个体的头部朝向。其测量原理是基于小昆虫腹部RCS极化特性, 即当极化方向平行于昆虫体轴时, RCS最大。

VLR是旋转线极化非相参体制雷达, 垂直向上照射, 可测量不同极化方向的昆虫腹部RCS(即式(4)表示的极化方向图)。式(4)可化简为^[10]

$$\sigma(\alpha) = a_0 + a_1 \cos 2(\alpha - \theta_1) + a_2 \cos 4(\alpha - \theta_2) \quad (12)$$

其中, a_0 , a_1 和 a_2 是与昆虫RCS有关的3个参数, 其中 a_0 表示平均极化RCS; θ_1 为最大RCS方向, 即昆虫朝向; θ_2 是没有实际物理意义的角度因子。基于式(12)的极化方向图数据模型, 通过线性最小二乘估计等方法, 可从测量的极化方向图数据中直接估计 θ_1 ^[10]。当VLR圆锥扫描时, 目标回波在式(12)的基础上要加入由于波束章动引起的天线增益的变化, 但是仍然可以根据数据估计方法估计昆虫朝向 θ_1 ^[5,36,40]。

若雷达为相参雷达, 可直接根据不同极化方向的目标回波数据估计目标的极化散射矩阵^[31], 目标回波信号不仅包含功率(幅度)信息, 也包含目标回波相位信息, 可建模为

$$e(\alpha) = \mathbf{h} \mathbf{S} \mathbf{h} = e^{j\delta} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12}e^{j\beta} \\ s_{12}e^{j\beta} & s_{22}e^{j\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, δ 表示目标回波的绝对相位。式中, 目标散射矩阵参数是未知的, 可用向量表示为

$$\mathbf{P} = [s_{11} \ s_{12} \ s_{22} \ \delta \ \beta \ \gamma]^T \quad (14)$$

代价函数可表示为

$$\mathbf{J} = [\mathbf{x} - \mathbf{e}]^H [\mathbf{x} - \mathbf{e}] \quad (15)$$

其中, $\mathbf{x}$ 表示在不同极化方向实测数据组成的向量, $\mathbf{e}$ 表示对应角度下由模型式(13)计算的回波数据组成的向量。则 $\mathbf{P}$ 可通过式(16)迭代估计得到

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k - \left[\begin{array}{c} \frac{\partial J}{\partial s_{11}} / \frac{\partial^2 J}{\partial s_{11}^2} \\ \frac{\partial J}{\partial s_{12}} / \frac{\partial^2 J}{\partial s_{12}^2} \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial \gamma} / \frac{\partial^2 J}{\partial \gamma^2} \end{array} \right]_{\mathbf{P}=\mathbf{P}^k} \quad (16)$$

由此可估计昆虫的极化散射矩阵。

基于雷达极化方式为极化散射矩阵主特征向量时回波功率最大的原理, 通过极化散射矩阵可直接计算得到昆虫朝向 $\hat{\varphi}$ ^[31]

$$\hat{\varphi} = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{Re} \left[1 / \sqrt{1 + \kappa^2} \right]}{\operatorname{Re} \left[\kappa / \sqrt{1 + \kappa^2} \right]} \right\} \quad (17)$$

其中

$$\kappa = s_{12}e^{j\beta} / \left(\frac{1}{2} (s_{22}e^{j\gamma} - s_{11}) + \frac{1}{2} \sqrt{(s_{11} - s_{22}e^{j\gamma})^2 + 4s_{12}^2e^{j2\beta}} \right) \quad (18)$$

由于同时利用了幅度和相位信息, 该方法在低信噪比下比传统方法精度更高。

然而, 由昆虫极化方向图形状与体型的关系可知, 以上几种提取昆虫朝向的原理仅对小昆虫有效, 对于大体型昆虫, 提取的昆虫朝向会存在90°的错误。文献[41]将极化方向图RCS最大值出现在极化方向平行于昆虫体轴的昆虫定义为“平行昆虫”, RCS最大值出现在极化方向垂直于昆虫体轴的昆虫定义为“垂直昆虫”。为解决大体型昆虫朝向的90°测量错误, 基于X波段昆虫RCS随体型递增的特性, 可利用昆虫Graves功率矩阵行列式辨别平行昆虫和垂直昆虫, 从而补偿垂直昆虫的90°朝向错误^[41]。Graves功率矩阵定义为

$$\mathbf{G} = \mathbf{S}^H \mathbf{S} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其行列式可表示为

$$\operatorname{Det} \mathbf{G} = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21} \quad (20)$$

$\operatorname{Det} \mathbf{G}$ 的量纲为功率的平方, 为了使量纲为功率, 通常取

$$d = \sqrt{\operatorname{Det} \mathbf{G}} \quad (21)$$

基于X波段雷达实测的207只昆虫, 文献[41]发现, $\lg(d) = -3.65$ 是区分平行昆虫和垂直昆虫的最佳界限, $\lg(d)$ 大于-3.65表示垂直昆虫, 反之表示平行昆虫, 因此, 补偿后的昆虫朝向可表示为

$$\varphi = \begin{cases} \hat{\varphi}, & \lg(d) \leq -3.65 \\ \hat{\varphi} - 90^\circ, & \lg(d) > -3.65 \end{cases} \quad (22)$$

4.2 昆虫体重、体长测量

当前, 昆虫雷达还无法独立实现种类辨识, 研究人员通常会根据雷达测量的昆虫体重, 结合诱虫灯等辅助工具捕捉的当天昆虫种类和对应体重, 估计雷达观测昆虫的种类^[42]。因此, 测量昆虫体重对于昆虫雷达种类辨识具有重要意义。

昆虫雷达测量昆虫体重主要是基于X波段昆虫RCS随体型递增的特性。Aldhous^[10,32]基于实测的54只昆虫极化方向图, 发现昆虫的极化平均RCS(即式(12)中 a_0)以及垂直极化RCS S_{yy} 与昆虫体重均有较强的拟合关系, 并由此得到体重测量经验公式

$$M(\text{mg}) = 10^{4.24 - \sqrt{4.17 - 3.82 \lg a_0}} \quad (23)$$

$$M(\text{mg}) = 10^{2.54 + 0.766 \lg S_{yy} + 0.179(\lg S_{yy})^2} \quad (24)$$

其中,

$$S_{yy} = a_0 - a_1 + a_2 \quad (25)$$

S_{yy} 是将昆虫散射矩阵对角化后对角线2个值中较小的一个,对于平行昆虫, S_{yy} 代表极化方向垂直于昆虫体轴时的RCS,而对于垂直昆虫, S_{yy} 代表极

$$M(\text{mg}) = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{xx} \times 10^5 / 6.4}, & \sigma_{xx} < 0.0032 \text{ cm}^2 \\ \sqrt{a_0 \times 10^5 / 6.4}, & \sigma_{xx} > 0.0032 \text{ cm}^2, a_0 < 0.25 \text{ cm}^2 \\ 10^{0.3323 \cdot [\lg(a_0)]^2 + 0.8729 \cdot [\lg(a_0)] + 2.205}, & a_0 \geq 0.25 \text{ cm}^2 \end{cases} \quad (26)$$

其中

$$\sigma_{xx} = a_0 + a_1 + a_2 \quad (27)$$

表示小昆虫极化方向平行于体轴时的RCS,该方法估计误差约为50%。

$$\lg[M(\text{mg})] = \begin{cases} 2.207 + 0.5 \cdot \lg(a_0), & a_0 < 0.25 \\ 2.331 + 0.9124 \cdot \lg(a_0) + 0.3425 \cdot [\lg(a_0)]^2, & 0.25 \leq a_0 < 7.21 \\ 2.079 + 1.5 \cdot \lg(a_0), & a_0 \geq 7.21 \end{cases} \quad (28)$$

$$\lg[M(\text{mg})] = 2.712 + 0.5068 \cdot \lg(a_0) - 0.4655\alpha_2 \quad (29)$$

该方法将体重估计误差降低到40%。

由以上方法可知,传统VLR主要利用昆虫平均极化RCS为变量估计昆虫体重。然而,由图1可知,极化方向平行于昆虫体轴时,对于体重大于100 mg昆虫,RCS随体重的增大是起伏的;极化方向垂直于昆虫体轴时,对所有体型的昆虫,RCS随体重增大一直单调递增,因此,极化方向垂直于昆虫体轴时的RCS更适于昆虫体重反演。实验测量时,通过控制昆虫体轴与天线极化方向垂直即可测量极化方向垂直于昆虫体轴的RCS,然而在实际应用中,昆虫的飞行方向是任意的,难以直接得到极化方向垂直于昆虫体轴的RCS。而基于昆虫Graves功率矩阵的两个特征值和行列式可提取极化方向垂直于昆虫体轴的RCS^[41]。Graves功率矩阵的两个特征值分别为

$$\lambda_1 = \frac{(g_{11} + g_{22}) + \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}g_{21}}}{2} \quad (30)$$

$$\lambda_2 = \frac{(g_{11} + g_{22}) - \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}g_{21}}}{2} \quad (31)$$

其中,对于平行昆虫, λ_1 和 λ_2 分别表示极化方向平行和垂直于昆虫体轴时的RCS,而对于垂直昆虫, λ_1 和 λ_2 分别表示极化方向垂直和平行于昆虫体轴时的RCS。也就是说,平行昆虫的 λ_2 和垂直昆虫的 λ_1 为极化方向垂直于昆虫体轴的RCS。而由4.2节可知, $\lg(d)$ 可用于辨别昆虫为平行还是垂直昆虫,因此,极化方向垂直于昆虫体轴的RCS v 可表示为

化方向平行于昆虫体轴时的RCS。该方法可反演体重45~3094 mg的昆虫体重。

基于112只昆虫样本数据,Chapman^[42]改进了Aldhous的基于 a_0 的体重反演方法,提出可反演低至1~2 mg昆虫体重的经验公式

Drake等人^[43]整合了233只昆虫样本数据,进一步提高了基于 a_0 的昆虫体重估计方法的精度,并另外提出精度更高的联合 a_0 和 α_2 (定义为 $\alpha_2 = a_1/a_0$)的体重估计方法,经验公式分别为

$$v = \begin{cases} \lambda_2, & \lg(d) \leq -3.65 \\ \lambda_1, & \lg(d) > -3.65 \end{cases} \quad (32)$$

进而通过拟合可得到体重反演经验公式为

$$\lg[M(\text{mg})] = 0.0118 \cdot [\lg(v)]^3 + 0.2117 \cdot [\lg(v)]^2 + 1.7519 \cdot [\lg(v)] + 6.9831 \quad (33)$$

与传统基于平均极化RCS的体重估计方法相比,该方法反演体重的误差达到34%,然而,由于需要辨别昆虫为平行还是垂直昆虫,当辨别错误时,可能会引入误差。为解决这个问题,文献[41]提出可直接利用昆虫极化功率矩阵的行列式参数 d 反演昆虫体重,经验公式为

$$\lg[M(\text{mg})] = 0.0412 \cdot [\lg(d)]^3 + 0.7184 \cdot [\lg(d)]^2 + 4.6193 [\lg(d)] + 12.0370 \quad (34)$$

昆虫极化功率矩阵的行列式表示极化方向平行和垂直于昆虫体轴RCS的乘积,因而用 d 反演昆虫体重没有辨别的环节。该方法反演误差为36%,略低于基于特征值的方法但是仍然高于传统基于平均极化RCS的方法。同时,由于昆虫的体长与体重是正相关的,昆虫Graves功率矩阵的特征值和行列式也可以用于昆虫体长反演^[41,44],反演的经验公式分别为

$$L(\text{mm}) = 1.0500 \cdot [\lg(v)]^3 + 19.4611 \cdot [\lg(v)]^2 + 121.9888 \cdot [\lg(v)] + 270.7600 \quad (35)$$

$$L(\text{mm}) = 2.2489 \cdot [\lg(d)]^3 + 39.0919 \cdot [\lg(d)]^2 + 225.9922 \cdot [\lg(d)] + 445.8781 \quad (36)$$

这两种方法估计体长的误差分别为20%和23%。

5 结束语

本文综述了昆虫的静态RCS特性和动态RCS特性。首先, 基于实测的X波段全极化昆虫RCS数据, 分析昆虫的静态RCS特性, 昆虫RCS随体重的增大而增大, 极化平行于昆虫体轴的RCS对于小于100 mg的昆虫单调递增, 而对于大于100 mg的昆虫则表现出谐振区的波动特性; 极化垂直于昆虫体轴的RCS则对所有昆虫均单调递增。昆虫的极化方向图的形状与昆虫体型有关, 小昆虫的极化方向图RCS最大值出现在极化方向平行于昆虫体轴时, RCS最小值出现在极化方向垂直于昆虫体轴时; 随着昆虫体重的增大, 极化方向垂直于昆虫体轴的RCS逐渐变大; 随着昆虫体重的继续增大, 极化方向垂直于昆虫体轴的RCS超过极化方向平行于昆虫体轴的RCS, 因而最大RCS出现在极化方向垂直于昆虫体轴时。其次, 本文总结了当前通过电磁仿真研究昆虫RCS特性所用到的介质和几何形状模型, 并对比了水、脊髓、干皮肤和壳质与血淋巴混合物4种介质和等体型扁长椭球体、等质量扁长椭球体和三轴椭球体3种几何模型组成的12种介质模型, 经过电磁仿真结果与实测数据相对比发现脊髓介质等质量扁长椭球体模型与实测昆虫RCS特性最接近。然后, 本文基于Ku波段高分辨昆虫雷达外场实测昆虫回波数据, 分析了昆虫动态RCS的起伏特性, 将实测昆虫动态RCS起伏数据与4种经典分布模型 χ^2 , Log-normal, Weibull和Gamma分布进行了拟合分析, 从最小二乘拟合误差和拟合优度检验结果可以看出, 相比于其他3种模型, Gamma分布可以较好地描述昆虫目标RCS起伏的统计特性。最后, 综述了昆虫RCS特性在昆虫雷达测量昆虫朝向、体重等参数的应用。

在下一步的研究工作中, 有以下需要改进的方向: 在昆虫RCS电磁仿真建模方面, 现阶段采用椭球体模型进行仿真, 需探索更精细的模型来更加准确地描述昆虫目标; 在动态RCS建模方面, 需考虑增大目标的样本量, 并基于雷达实测数据研究雷达工作频段、极化方式等因素对目标动态RCS特性的影响; 需对昆虫目标进行归类分析, 研究针对于不同种类昆虫的静态和动态RCS特性差异。

参 考 文 献

- [1] HU Gao, LIM K S, HORVITZ N, *et al.* Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants[J]. *Science*, 2016, 354(6319): 1584–1587. doi: 10.1126/science.aah4379.
- [2] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 中国热带和南亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 1–9.
- [3] WU Qiulin, JIANG Yuying, HU Gao, *et al.* Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(3): 1–9.
- [4] HU Cheng, WANG Yixuan, WANG Rui, *et al.* An improved radar detection and tracking method for small UAV under clutter environment[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(2): 29306. doi: 10.1007/s11432-018-9598-x.
- [5] ZHOU Chao, WANG Rui, and HU Cheng. Equivalent point estimation for small target groups tracking based on MLE[J]. *Science China Information Sciences*, 2019. doi: 10.1007/s11432-019-1518-x.
- [6] SMITH A D, RILEY J R, and 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 B: Biological Sciences*, 1993, 340(1294): 393–404. doi: 10.1098/rstb.1993.0081.
- [7] GLOVER K M, HARDY K R, LANDRY C R, *et al.* Radar characteristics of known insects in free flight[C]. The 12th Conference on Radar Meteorology, Oklahoma, USA, 1966: 254–258.
- [8] RILEY J R. Angular and temporal variations in the radar cross-sections of insects[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1973, 120(10): 1229–1232. doi: 10.1049/piee.1973.0251.
- [9] RILEY J R, VAUGHN C R, WOLF W, *et al.* Quantitative analysis of radar returns from insects[C]. A Workshop Held at NASA Wallops Flight Center, Wallops Island, USA, 1978: 131–158.
- [10] RILEY J R. Radar cross section of insects[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(2): 228–232. doi: 10.1109/PROC.1985.13135.
- [11] ALDHOUS A C. An investigation of the polarisation dependence of insect radar cross sections at constant aspect[D]. [Ph.D. dissertation], Cranfield University, 1989.
- [12] MURTON R K and WRIGHT E N. The Problems of Birds as Pests[M]. New York: Academic Press, 1968: 53–86.
- [13] SCHAEFER G W. Radar observations of insect flight[C]. Insect Flight Symposia of the Royal Entomological Society, London, UK, 1976: 157–197.
- [14] MIRKOVIC D, STEPANIAN P M, WAINWRIGHT C E, *et al.* Characterizing animal anatomy and internal composition for electromagnetic modelling in radar entomology[J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019, 5(2): 169–179. doi: 10.1002/rse2.94.
- [15] WANG Rui, HU Cheng, LIU Changjiang, *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. doi: 10.1109/TGRS.2018.2884926.
- [15] HU Cheng, LI Wenqing, WANG Rui, *et al.* Insect flight speed estimation analysis based on a full-polarization radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(10): 109306. doi: 10.1007/s11432-018-9484-2.
- [16] WANG Rui, HU Cheng, FU Xiaowei, *et al.* Micro-Doppler measurement of insect wing-beat frequencies with W-band coherent radar[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1396. doi: 10.1038/s41598-017-01616-4.
- [17] HU Cheng, KONG Shaoyang, WANG Rui, *et al.* Identification of migratory insects from their physical features using a decision-tree support vector machine and its application to radar entomology[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5449. doi: 10.1038/S41598-018-23825-1.
- [18] 汪兵. 非独立同分布起伏目标建模与检测算法研究[D].[博士学位文], 电子科技大学, 2017.
- WANG Bing. Research on modeling and the detection algorithm of non- IID fluctuation targets[D].[Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [19] SWERLING P. Probability of detection for fluctuating targets[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1960, 6(2): 269–308. doi: 10.1109/TIT.1960.1057561.
- [20] WEINSTOCK W. Target cross section models for radar system analysis[D]. [Ph.D. dissertation], University of Pennsylvania, 1964.
- [21] LEWINSKI D. Nonstationary probabilistic target and clutter scattering models[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, 31(3): 490–498. doi: 10.1109/TAP.1983.1143067.
- [22] SHNIDMAN D A. Expanded Swerling target models[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 1059–1069. doi: 10.1109/TAES.2003.1238757.
- [23] ROSE M, HAIMOV S, and MOORE R K. Optimum detection of Weibull-distributed targets[C]. OCEANS '93, Victoria, Canada, 1993: II /5- II /9. doi: 10.1109/OCEANS.1993.326056.
- [24] SHNIDMAN D A. Calculation of probability of detection for log-normal target fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(1): 172–174. doi: 10.1109/7.68161.
- [25] SLOCUMB B J and KLUSMAN III M E. A multiple model SNR/RCS likelihood ratio score for radar-based feature-aided tracking[J]. *SPIE*, 2005, 5913: 540–551. doi: 10.1117/12.615288.
- [26] SHI Weiqiang, SHI Xiaowei, and XU Le. Radar Cross Section (RCS) statistical characterization using Weibull distribution[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(6): 1355–1358. doi: 10.1002/mop.27557.
- [27] 林刚, 许家栋. 目标RCS动态数据的分布特征研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 18–20. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.006.
- LIN Gang and XU Jiadong. Study of the statistical characterization of targets' RCS dynamic data[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(2): 18–20. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2006.02.006.
- [28] 史伟强, 徐乐, 史小卫, 等. 基于完备对数正态分布模型的隐形飞行器动态RCS统计特性研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2121–2125. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01161.
- SHI Weiqiang, XU Le, SHI Xiaowei, *et al.* Dynamic RCS statistic characterization of stealth aircraft using complete lognormal distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2121–2125. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01161.
- [29] 沈鹏. 海面舰船RCS起伏分布模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(4): 37–39. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2019.04.008.
- SHEN Peng. RCS fluctuation distribution models research of Ship Target on Sea[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(4): 37–39. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2019.04.008.
- [30] SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [31] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, *et al.* Accurate insect orientation extraction based on polarization scattering matrix estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10): 1755–1759. doi: 10.1109/LGRS.2017.2733719.
- [32] HOBBS S E and ALDHOUS A C. Insect ventral radar cross-section polarisation dependence measurements for radar entomology[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(6): 502–508. doi: 10.1049/ip-rsn:20060019.
- [33] VAUGHN C R. Birds and insects as radar targets: A review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(2): 205–227. doi: 10.1109/proc.1985.13134.
- [34] MIRKOVIC D, STEPANIAN P M, KELLY J F, *et al.* Electromagnetic model reliably predicts radar scattering characteristics of airborne organisms[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35637. doi: 10.1038/srep35637.
- [35] NELSON S O, BARTLEY P G Jr, and LAWRENCE K C. RF and microwave dielectric properties of stored-grain insects and their implications for potential insect control[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(3): 685–692. doi: 10.13031/2013.17194.
- [36] HOBBS S, ALLSOPP K, and WOLF W. Signal analysis for

- an entomological radar with a vertical Nutating beam[R]. College of Aeronautics Report 9919, 2003.
- [37] DOWDY P C. RCS probability distribution function modeling of a fluctuating target[C]. The 1991 IEEE National Radar Conference, Los Angeles, USA, 1991: 164–168. doi: 10.1109/NRC.1991.114752.
- [38] RILEY J R. Collective orientation in night-flying insects[J]. *Nature*, 1975, 253(5487): 113–114. doi: 10.1038/253113a0.
- [39] 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. doi: 10.1126/science.1182990.
- [40] HARMAN I T and DRAKE V A. Insect monitoring radar: Analytical time-domain algorithm for retrieving trajectory and target parameters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 43(1): 23–41. doi: 10.1016/j.compag.2003.08.005.
- [41] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, *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. doi: 10.1109/TGRS.2019.2904869.
- [42] CHAPMAN J W, SMITH A D, WOIWOD I P, *et al.* Development of vertical-looking radar technology for monitoring insect migration[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 35(2/3): 95–110. doi: 10.1016/S0168-1699(02)00013-3.
- [43] 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. doi: 10.1080/01431161.2017.1320453.
- [44] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, *et al.* Accurate insect body length extraction based on the invariant target parameters[C]. 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, Chengdu, China, 2018: 1–3. doi: 10.1109/COMPEN.2018.8496592.
- 胡 程: 男, 1981年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为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等。
- 方琳琳: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为雷达目标检测跟踪算法。
- 王 锐: 男, 1985年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为昆虫雷达信号处理等。
- 周 超: 男, 1987年生, 博士后, 研究方向为雷达目标检测跟踪算法。
- 李卫东: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为昆虫雷达极化信号处理。
- 张 帆: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为空中生物目标电磁仿真。
- 郎添娇: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为空中生物目标电磁仿真。
- 龙 腾: 男, 1968年生, 教授, 研究方向为实时信号与信息处理。