

昆虫目标雷达散射截面特征辅助跟踪算法

方琳琳^{①②} 周超^{*①②} 王锐^{①②} 胡程^{①②}

^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(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: 害虫迁飞具有规模大、突发性强的特点,会导致病虫害异地大爆发,粮食产量下降,造成重大的经济损失。昆虫雷达是监测迁飞性害虫的一种有效手段。昆虫目标的雷达散射截面(RCS)较小,回波能量弱,在保证高检测率的同时会带来高虚警率问题,进而导致在目标跟踪的数据关联环节,易受虚假量测的影响出现关联错误。幅度特征辅助跟踪算法利用目标与噪声点迹的幅度差异,可以有效提高目标与噪声的识别度,改善跟踪性能,但是其需要已知目标的RCS起伏模型作为先验信息来计算幅度似然比。因此,该文基于Ku波段高分辨昆虫雷达外场实测昆虫回波数据,分析了昆虫目标的RCS起伏特性,得出Gamma分布可以较好地拟合昆虫目标的RCS统计分布,并将其作为先验信息,推导出Gamma起伏目标在高斯白噪声背景下的幅度似然比。通过在不同信噪比、不同量测噪声及不同起伏模型参数下的仿真结果及性能指标分析,验证了相比于概率数据互联滤波算法(PDAF)算法,目标RCS特征辅助的跟踪算法可以有效提高昆虫目标的跟踪精度。

关键词: 昆虫雷达; 目标跟踪; 雷达截面起伏; 特征辅助

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)05-0598-08

DOI: 10.12000/JR19067

引用格式: 方琳琳,周超,王锐,等. 昆虫目标雷达散射截面特征辅助跟踪算法[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 598-605. doi: 10.12000/JR19067.

Reference format: FANG Linlin, ZHOU Chao, WANG Rui, *et al.* RCS feature-aided insect target tracking algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 598-605. doi: 10.12000/JR19067.

RCS Feature-aided Insect Target Tracking Algorithm

FANG Linlin^{①②} ZHOU Chao^{*①②} WANG Rui^{①②} HU Cheng^{①②}

^①(Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Institute of Technology, Beijing 100081, China)

^②(Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China)

Abstract: Pest migration has the characteristics of large scale and strong suddenness, which will lead to the outbreaks of pests and diseases, the decline of grain yield, and considerable economic losses. Entomological radar is an effective means of monitoring migratory pests. However, the Radar Cross Section (RCS) of an insect target is small, whereas the echo power is weak. High detection probability will result in a high false alarm probability. In the data association step of target tracking, the association error occurs due to the influence of false measurement. By utilizing the amplitude difference between the target and noise, the amplitude information-assisted tracking algorithm can effectively improve the recognition degree toward the target and noise and improve the tracking performance. However, the RCS fluctuation model of the target is needed as prior information to calculate the amplitude likelihood ratio. Therefore, in this paper, the insect RCS fluctuating characteristics are analyzed based on Ku-band entomological radar experiment data. The results show that gamma distribution can fit well the RCS probability distribution of the insect target. On this basis,

收稿日期: 2019-07-12; 改回日期: 2019-09-23; 网络出版: 2019-10-11

*通信作者: 周超 7520180050@bit.edu.cn *Corresponding Author: ZHOU Chao, 7520180050@bit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(31727901)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (31727901)

责任主编: 王国宏 Corresponding Editor: WANG Guohong

we derive the amplitude likelihood ratio of the gamma fluctuation target in Gaussian white-noise background. By analyzing the simulation results and performance under different signal-to-noise ratios, measurement noises, and fluctuation model parameters, compared with probabilistic data association filter, the RCS feature-aided tracking algorithm can effectively improve the insect target tracking accuracy.

Key words: Entomological radar; Target tracking; Radar Cross Section fluctuating; Feature aided

1 引言

昆虫雷达可以实现对迁飞性害虫的迁飞轨迹进行监测和预警,是预防虫害灾异地爆发的有效工具^[1]。昆虫目标的体积小,飞行高度低,并且回波幅度微弱,当信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)较低时,为保证高检测率,通常设置较低的检测门限,但由此会带来大量的虚警点,进而导致在目标跟踪的数据关联环节,受虚假量测的影响,数据关联的准确度下降。基于幅度特征辅助的跟踪算法是一种提高数据关联准确度的有效方法^[2],其利用源自目标与噪声点迹的幅度差异来提高目标与噪声的识别度,改善跟踪性能,但是其需要目标的雷达截面(Radar Cross Section, RCS)起伏模型作为先验信息来计算幅度似然比。因此,对于不同种类目标在不同杂波背景下的跟踪,该方法的关键在于如何得到目标和杂波点迹的幅度分布信息以及相应的幅度似然比。

Bar-Shalom等人^[2]在1990年提出利用雷达回波中的幅度信息来辅助跟踪目标,研究了幅度信息在数据关联环节中的应用,推导了瑞利分布目标在高斯白噪声背景下的幅度似然比,来修正点迹与航迹的数据关联概率值,并进一步将其应用到交互多模型(Interacting Multiple Model, IMM)算法中^[3],通过不同的仿真场景验证了该方法的有效性。为适应更多复杂场景,2010年, Brekke 等人^[4]将该方法应用到非瑞利分布杂波背景下的弱目标跟踪,推导了K分布杂波背景下的幅度似然比,并分析了相应的跟踪性能。文献^[5]中推导了Swerling 1型目标在Weibull, Log-normal等杂波背景下的幅度似然比。为适应更多目标模型,文献^[6]中推导了Swerling 3型目标在高斯白噪声背景下的幅度似然比,并通过仿真实验评估了跟踪性能。

现有幅度辅助跟踪算法的应用场景均是针对Swerling型目标在高斯白噪声及不同杂波背景下的跟踪。对于昆虫目标,需首先建立相应的RCS起伏模型,为幅度似然比的推导提供先验信息,进而得出适用于昆虫目标的幅度辅助跟踪算法。但是昆虫目标的RCS较小,同时受极化方式、电磁频率、观测角度和自身的翅膀拍动等多种因素影响,通常表现出随机不规则的起伏,需基于统计理论分析其RCS特性,并建立相应的起伏模型^[7]。

因此,本文首先基于Ku波段昆虫雷达夜间观测到的昆虫目标实验数据,根据雷达方程等理论分析得出目标RCS随时间起伏变化的采样值,然后采用最小二乘拟合及Kolmogorov-Smirnov(K-S)拟合优度检验方法,得出Gamma分布可以较好地拟合昆虫目标的RCS概率分布。在此基础上,推导出Gamma起伏型目标在高斯白噪声背景下的幅度似然比,并将其融合到概率数据互联滤波器中,通过在不同SNR、不同量测噪声下的仿真分析得出,RCS特征辅助的跟踪算法可以有效地提高目标跟踪精度。

2 昆虫目标RCS起伏模型建模

RCS特征辅助跟踪算法需已知昆虫目标RCS起伏模型作为先验信息,由于昆虫目标的RCS受多种因素影响,并且是时变的,起伏表现出随机不规则的特性,在工程实践中很难快速、实时地获得目标在任意实验环境下的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^[7]。图1所示为建模过程。

2.1 昆虫目标RCS数据获取

本文基于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,对昆虫目标RCS起伏的统计特性进行了建模分析。雷达的中心频率为16.2 GHz,带宽为800 MHz。实验场景如图2所示,雷达放置在高空诱虫灯旁边,垂直对天观测。选择飞行高度为200~400 m范围内采集到的昆虫回波数据。由于雷达垂直对空观测,观测场景

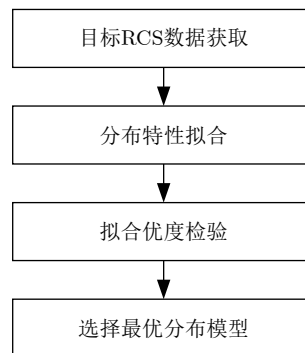


图1 昆虫目标RCS起伏建模流程图

Fig. 1 The flow chart of insect RCS fluctuation modeling



图 2 实验场景

Fig. 2 The experimental scene

干扰很少,完成目标检测之后,基于目标的运动特性和时频分析辨别出昆虫目标,并提取出回波信号。

由雷达方程可知,回波信号的瞬时功率与目标的RCS成正比^[8],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^[9]的影响。因此,在消除波束主瓣增益的影响后,得到随时间变化的RCS起伏值($\Delta\sigma$),进而分析RCS起伏的统计分布特性。

2.2 分布特性拟合及拟合优度检验

本文首先采用最小二乘拟合方法将实测昆虫目标RCS起伏分布与 χ^2 , Gamma, Log-normal, Weibull分布模型^[10]进行拟合分析,拟合误差表达式为

$$E = \sum_i [P_e(\sigma_i) - P_m(\sigma_i)]^2 \quad (1)$$

其中, $P_e(\sigma_i)$ 为RCS数据在不同区间的概率值, $P_m(\sigma_i)$ 为统计模型拟合得到的相同区间的概率值。图3所示为RCS起伏概率密度函数(Probability Density Function, PDF)拟合结果,实验中随机挑选的10只实测昆虫RCS起伏拟合误差如图4所示,每只昆虫目标的RCS采样点数在1300~1500之间。可以看出, χ^2 分布与实测数据差异较大, Log-normal分布和Gamma分布拟合结果最接近实际昆虫RCS起伏PDF,但Gamma分布拟合结果略优于Log-normal分布的拟合结果。

为进一步衡量曲线的拟合效果,本文采用K-S拟合优度检验方法^[10]对上述实验数据的拟合结果进行了验证, K-S检验公式为

$$D = \max |F'(x) - F(x)| \quad (2)$$

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。对应的累积分布函数(Cumulative Distribution

Function, CDF)拟合结果及K-S拟合优度检验参数如图5和图6所示。可以看出, 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PDF的分析结果一致。

从曲线吻合程度、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分布可以较好地拟合昆虫目标RCS起伏的统计特性,为昆虫目标RCS辅助跟踪算法幅度似然比的计算奠定了理论基础。

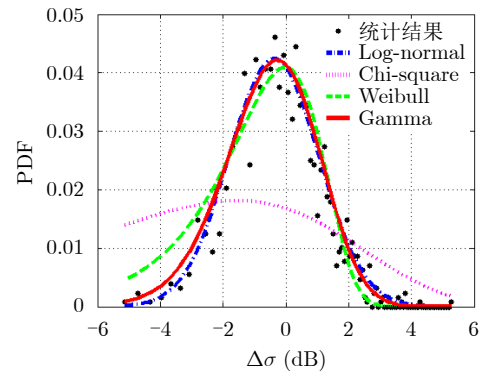


图 3 PDF拟合结果

Fig. 3 PDF fitting results

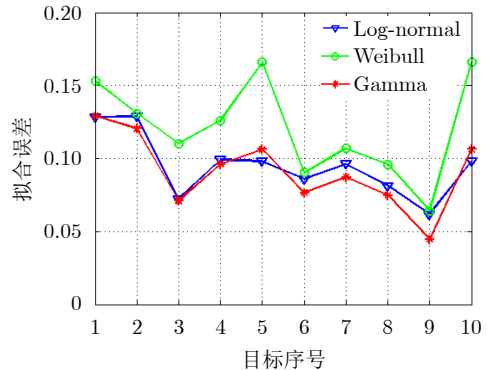


图 4 拟合误差

Fig. 4 Fitting error

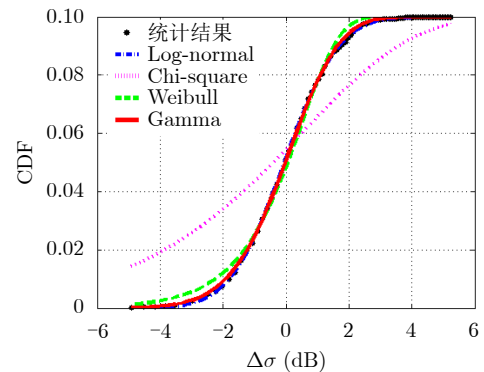


图 5 CDF拟合结果

Fig. 5 CDF fitting results

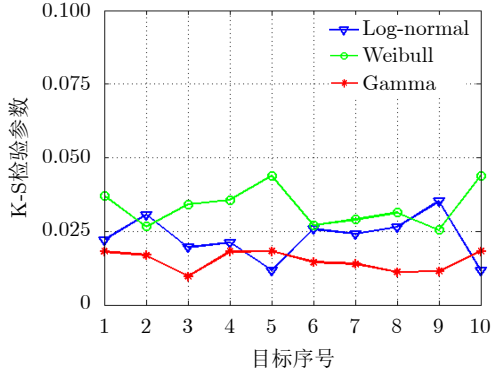


图6 S检验参数

Fig. 6 K-S test parameters

3 昆虫目标RCS特征辅助跟踪算法

基于昆虫目标RCS起伏模型, 本文推导了Gamma起伏目标在高斯白噪声背景下的幅度似然比, 将其作为加权因子修正了概率数据互联算法中的点迹与航迹的关联概率值, 有效地提高了数据关联环节目标与噪声的识别度, 改善了航迹精度。算法实现流程如图7所示。

传统的概率数据互联滤波(Probabilistic Data Association Filter, PDAF)算法^[1]通过计算相关波门内的确认量测来自目标的概率, 对相关波门内的不同回波进行加权, 利用各个候选回波的加权和来对目标的状态进行更新。

目标状态更新方程为

$$\beta_i(k) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}\mathbf{v}_i^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{v}_i(k)\right\}}{\lambda|2\pi\mathbf{S}(k)|^{\frac{1}{2}}(1-P_D P_G)/P_D + \sum_{j=1}^{m_k} \exp\left\{-\frac{1}{2}\mathbf{v}_j^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{v}_j(k)\right\}}, \quad i=1, 2, \dots, m_k \quad (6)$$

$$\beta_0(k) = \frac{\lambda|2\pi\mathbf{S}(k)|^{\frac{1}{2}}(1-P_D P_G)/P_D}{\lambda|2\pi\mathbf{S}(k)|^{\frac{1}{2}}(1-P_D P_G)/P_D + \sum_{j=1}^{m_k} \exp\left\{-\frac{1}{2}\mathbf{v}_j^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{v}_j(k)\right\}} \quad (7)$$

定义

$$e_i \triangleq \exp\left\{-\frac{1}{2}\mathbf{v}_i^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{v}_i(k)\right\}$$

$$b \triangleq \lambda|2\pi\mathbf{S}(k)|^{\frac{1}{2}}(1-P_D P_G)/P_D$$

$$= |2\pi|^{\frac{1}{2}} \gamma^{-\frac{n_z}{2}} \frac{\lambda V_k}{c_{n_z}} (1-P_D P_G)/P_D$$

则

$$\beta_0(k) = \frac{b}{b + \sum_{j=1}^{m_k} e_j} \quad (8)$$

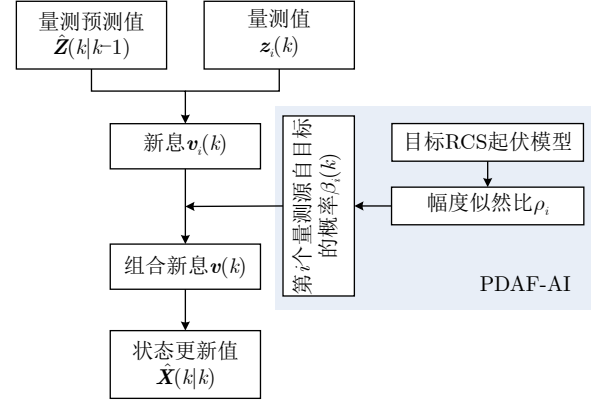


图7 目标RCS辅助跟踪算法实现框图

Fig. 7 RCS aided tracking algorithm implementation block diagram

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)\mathbf{v}(k) \quad (3)$$

其中, $\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$ 表示预测值, $\mathbf{K}(k)$ 为增益, $\mathbf{v}(k)$ 为组合新息, 其表达式为

$$\mathbf{v}(k) = \sum_{i=0}^{m_k} \beta_i(k)\mathbf{v}_i(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_i(k) = \mathbf{z}_i(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k|k-1) \quad (5)$$

其中, m_k 表示 k 时刻相关波门内的量测总数, $\mathbf{v}_i(k)$ 为与该量测值相对应的新息, $\mathbf{z}_i(k)$ 为量测值, $\hat{\mathbf{Z}}(k|k-1)$ 为量测预测值, $\beta_i (i=1, 2, \dots, m_k)$ 为第 i 个候选量测源于目标的条件概率, β_0 为候选量测中没有量测源于目标的概率。具有泊松杂波模型的概率^[1]为

$$\beta_i(k) = \frac{e_i}{m_k} \cdot \frac{1}{b + \sum_{j=1}^{m_k} e_j}, \quad i=1, 2, \dots, m_k \quad (9)$$

其中, P_D 为目标检测概率, P_G 为门概率, V_k 为相关波门的体积, λ 为虚假测量的空间密度, λV_k 为相关波门内的虚假量测数, $\mathbf{S}(k)$ 为 k 时刻的新息协方差, γ 为波门大小, n_z 为量测维数。

3.1 幅度辅助概率数据互联算法

幅度辅助概率数据互联算法(Probabilistic Data Association Filter with Amplitude Information, PDAF-AI)利用幅度似然比 ρ 来修正数据关联环

节中点迹数据与航迹的关联概率 β , 使得经过综合加权后的状态更新值更加准确, 幅度似然比^[2]表示为

$$\rho = \frac{p_1^T(a)}{p_0^T(a)} \quad (10)$$

$$p_1^T(a) = \frac{1}{P_D} p_T(a), a > \tau \quad (11)$$

$$p_0^T(a) = \frac{1}{P_{FA}} p_F(a), a > \tau \quad (12)$$

其中, a 表示幅度信息, τ 为检测门限, P_D 为目标的检测概率, P_{FA} 为虚警概率, $p_T(a)$ 和 $p_F(a)$ 分别表示在未经过门限检测时, 目标和噪声的幅度概率密度函数。

加权后的关联概率^[2] β 表示为

$$\beta_0(k) = \frac{b}{b + \sum_{j=1}^{m_k} e_j \rho_j} \quad (13)$$

$$\beta_i(k) = \frac{e_i \rho_i}{b + \sum_{j=1}^{m_k} e_j \rho_j}, i = 1, 2, \dots, m_k \quad (14)$$

3.2 昆虫目标幅度似然比计算

基于昆虫目标的RCS起伏模型, 本小节推导了在高斯白噪声背景下Gamma起伏目标的幅度似然比计算公式。

目标检测可以表示为二元假设检验问题

$$\left. \begin{array}{l} H_0: z = n \\ H_1: z = s + n \end{array} \right\} \quad (15)$$

其中, n 是均值为零, 方差为 σ_w^2 的高斯白噪声, s 表示幅度为 A , 相位为 θ 的目标信号, 表达式为 $s = A \exp(j\theta)$, 相位 θ 为在 $(0, 2\pi)$ 内均匀分布的随机变量。

在 H_0 假设下, 目标不存在, $|z|$ 的PDF为瑞利分布^[12], 表示为

$$p_z(z|H_0) = \frac{2z}{\sigma_w^2} e^{-z^2/\sigma_w^2} \quad (16)$$

在 H_1 假设下, 对于非起伏目标, 目标信号幅度 A 为恒定值, $|z|$ 的PDF为莱斯分布^[12], 表示为

$$p_z(z|H_1) = \frac{2z}{\sigma_w^2} e^{-(z^2+A^2)/\sigma_w^2} I_0\left(\frac{2Az}{\sigma_w^2}\right) \quad (17)$$

对于起伏目标, 目标幅度 A 的概率分布为 $p_A(A)$, 此时

$$\begin{aligned} p_z(z|H_1) &= \int_0^\infty p_z(z|H_1, A) p_A(A) dA \\ &= \int_0^\infty \frac{2z}{\sigma_w^2} e^{-(z^2+A^2)/\sigma_w^2} I_0\left(\frac{2Az}{\sigma_w^2}\right) p_A(A) dA \end{aligned} \quad (18)$$

设目标RCS值表示为 X , 那么目标幅度 $A = \sqrt{X}$, 对 X 的概率密度函数进行下面的变换可以得到幅度 A 的概率密度函数

$$p_A(A) = 2A \cdot p_X(A^2) \quad (19)$$

如果目标RCS值 X 服从尺度参数为 Ω , 形状参数为 v 的Gamma分布, 其PDF表示为

$$p_X(X) = \frac{\Omega^v}{\Gamma(v)} X^{v-1} \exp(-\Omega X) \quad (20)$$

则根据式(19)和式(20)得出, 目标幅度 A 的概率密度函数为

$$p_A(A) = \frac{2\Omega^v}{\Gamma(v)} A^{2v-1} \exp(-\Omega A^2) \quad (21)$$

将 $p_A(A)$ 的表达式带入式(18)中, 得

$$\begin{aligned} p_z(z|H_1) &= \frac{2z}{\sigma_w^2} \cdot \frac{2\Omega^v}{\Gamma(v)} \cdot e^{-z^2/\sigma_w^2} \int_0^\infty A^{2v-1} \\ &\quad \cdot e^{\left(-\frac{1}{\sigma_w^2} - \Omega\right) \cdot A^2} I_0\left(\frac{2Az}{\sigma_w^2}\right) dA \end{aligned} \quad (22)$$

根据第1类修正贝塞尔函数 $I_a(x)$ 与第1类贝塞尔函数 $J_a(x)$ 的关系^[13]

$$I_a(x) = j^{-a} J_a(jx) \quad (23)$$

并利用积分关系式^[13]

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty x^\mu e^{-\alpha x^2} J_m(\beta x) dx \\ &= \frac{\beta^m \Gamma\left(\frac{m+\mu+1}{2}\right)}{2^{m+1} \alpha^{(m+\mu+1)/2} \Gamma(m+1)} \\ &\quad \cdot {}_1F_1\left(\frac{m+\mu+1}{2}; m+1; -\frac{\beta^2}{4\alpha}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

得出

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty A^{2v-1} e^{\left(-\frac{1}{\sigma_w^2} - \Omega\right) \cdot A^2} I_0\left(\frac{2Az}{\sigma_w^2}\right) dA \\ &= \frac{\Gamma(v)}{2 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_w^2} + \Omega\right)^v} {}_1F_1\left(v; 1; \frac{z^2}{\sigma_w^2 + \Omega \cdot \sigma_w^4}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

即

$$\begin{aligned} p_z(z|H_1) &= \frac{2z}{\sigma_w^2} \cdot \left(\frac{\Omega \cdot \sigma_w^2}{1 + \Omega \cdot \sigma_w^2}\right)^v \cdot e^{-z^2/\sigma_w^2} \\ &\quad \cdot {}_1F_1\left(v; 1; \frac{z^2}{\sigma_w^2 + \Omega \cdot \sigma_w^4}\right) \end{aligned} \quad (26)$$

其中, ${}_1F_1(\bullet; \bullet; \bullet)$ 为合流超几何函数。

因此, 幅度似然比表达式为

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{\frac{1}{P_D} \cdot p_z(z|H_1)}{\frac{1}{P_{FA}} \cdot p_z(z|H_0)} = \frac{\frac{1}{P_D} \cdot \frac{2z}{\sigma_w^2} \cdot \left(\frac{\Omega \cdot \sigma_w^2}{1 + \Omega \cdot \sigma_w^2}\right)^v \cdot e^{-z^2/\sigma_w^2} \cdot {}_1F_1\left(v; 1; \frac{z^2}{\sigma_w^2 + \Omega \cdot \sigma_w^4}\right)}{\frac{1}{P_{FA}} \cdot \frac{2z}{\sigma_w^2} e^{-z^2/\sigma_w^2}} \\ &= \frac{P_{FA}}{P_D} \cdot \left(\frac{\Omega \cdot \sigma_w^2}{1 + \Omega \cdot \sigma_w^2}\right)^v \cdot {}_1F_1\left(v; 1; \frac{z^2}{\sigma_w^2 + \Omega \cdot \sigma_w^4}\right)\end{aligned}\quad (27)$$

当跟踪波门内有多量测点时, 需将每个量测点的幅度值 $|z_i|$ 带入到式(27)中, 得出对应于每个量测点的幅度似然比 ρ_i , 将其带入到式(13), (14)中即可得出每个量测点的修正关联概率值。

4 仿真实验

4.1 性能评价指标

为了更好地评估算法性能, 本文采用以下性能评价指标对跟踪结果进行性能分析。

(1) 均方根误差(RMSE)

$$\text{RMSE}(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((\hat{X}_{i,j} - X_{i,j})^2 + (\hat{Y}_{i,j} - Y_{i,j})^2 \right)} \quad (28)$$

其中, N 为蒙特卡洛仿真次数, (X, Y) 为直角坐标系下目标的无噪声真实测量值, (\hat{X}, \hat{Y}) 为滤波值, j 表示帧号。

(2) 有效航迹条数

如果在 k 时刻的位置误差 $\sqrt{(\hat{X}_{k|k} - X_k)^2 + (\hat{Y}_{k|k} - Y_k)^2}$ 超过了第1门限 T_1 , 且不能在 m 帧能够回到 T_1 之下, 则认为此条航迹在 k 时刻无效; 如果能够在 m 帧之内回到 T_1 之下, 则认为该航迹有效; 如果位置误差在 k 时刻超出了第2门限 $T_2 > T_1$, 则直接认为该条航迹无效。

(3) 有效航迹概率

$$\text{有效航迹概率} = \frac{\text{有效航迹条数}}{\text{总航迹条数}} \quad (29)$$

在本次仿真中, 总航迹条数为蒙特卡洛仿真次数。

4.2 仿真场景及参数

为设计符合昆虫目标运动特性的仿真场景, 基于本团队于河北廊坊实验基地用相控阵雷达采集的昆虫目标回波数据, 分析得出昆虫目标的运动轨迹大部分可近似为直线运动, 并且对100条昆虫轨迹的平均速度进行了直方图统计, 得出轨迹速度大小近似服从均值为4.9 m/s, 标准差为2.1 m/s的正态分布。

因此, 设计如图8所示的仿真场景, 目标做匀速直线运动, 初始位置为(10 m, 10 m), 速度为(5 m/s, 5 m/s)。虚假量测是在以正确量测为中心

的正方形内均匀产生的, 正方形的面积为 $S = n_c/\lambda$, 其中 n_c 为虚假量测总数, λ 为虚假测量的空间密度, 落入两维量测确认区域内的虚假量测数近似服从泊松分布^[4], 仿真参数如表1所示。

本文首先分析了不同SNR及不同量测噪声下的跟踪精度, 同时, 为了更好地评估该算法对于起伏目标的跟踪性能, 选取2组Gamma起伏模型参数, 分析了起伏模型参数对跟踪性能的影响。

4.3 跟踪性能分析

4.3.1 不同SNR下仿真结果分析

采用表1所示的仿真参数, 得出在不同SNR下两种算法有效航迹的均方根误差, 如图9所示, 可以看出, 随着SNR的增加, PDAF和PDAF-AI的跟踪误差均逐渐减小, 在相同SNR下, 相比于PDAF, PDAF-AI的跟踪性能有所改善。

为进一步分析算法性能, 本文对同一杂波密度, 不同量测噪声下的算法性能进行了对比分析, 分析指标为在剔除无效航迹后, 相比于PDAF算法, PDAF-AI算法在30~100帧的均方根误差均值的改善值, 如表2所示。可以看出, 随着量测噪声标准差的增大, 性能提升越明显。

4.3.2 不同起伏模型参数下仿真结果分析

由于在实际观测中, 不同目标的RCS起伏模型参数是波动的, 因此, 本文对表1中的两组典型目标起伏模型参数, 在SNR均值为9~15 dB情况下的有效航迹概率进行了对比, 结果如图10所示。表3所示为PDAF-AI算法在两种参数下的有效航迹改善率, 可以看出, 当SNR越弱时, 跟踪性能提升越

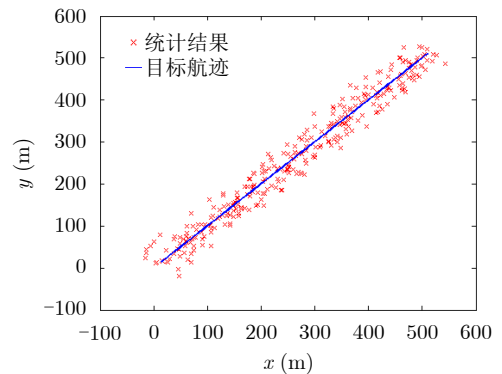


图8 仿真场景示意图

Fig. 8 Simulation scene

表 1 仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
目标RCS起伏模型	伽马分布	杂波点幅度模型	瑞利分布
起伏模型参数1	$\Omega=1.8, v=2.0$	起伏模型参数2	$\Omega=2.0, v=3.2$
杂波密度 λ	0.00004	SNR	9 dB, 13 dB
虚警概率	10^{-4}	扫描间隔 T	1 s
跟踪步数	100	波门尺寸	16
过程噪声方差 σ_p^2	0.01 m ²	量测噪声标准差 σ_R	1 m
蒙特卡洛仿真次数	500	航迹丢失判别 m	7帧
第1门限 T_1	1 m	第2门限 T_2	5 m

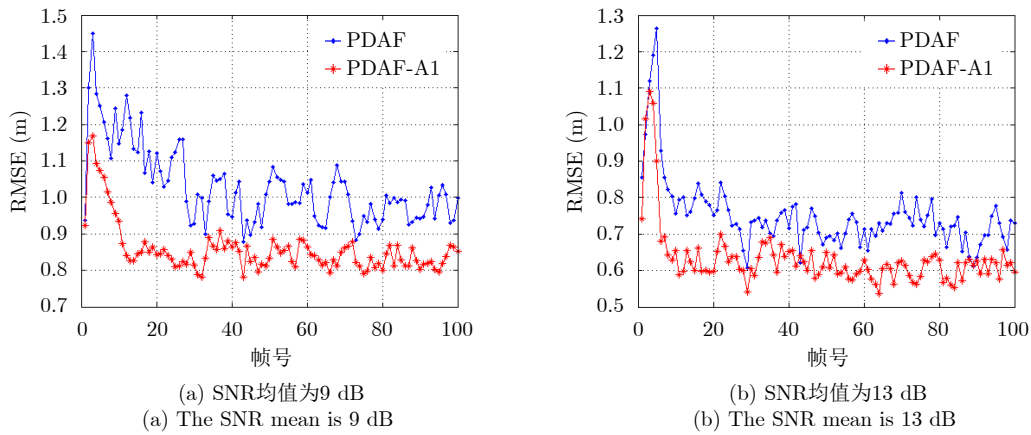


图 9 不同SNR下跟踪误差比较

Fig. 9 Comparison of tracking errors under different SNRs

表 2 不同量测噪声下方均根误差均值改善值

Tab. 2 The improvement of the root mean square error under different measurement noises

量测噪声标准差(m)	SNR(dB)	均方根误差均值改善(m)
1	9	0.14
	13	0.11
3	9	0.53
	13	0.42
5	9	1.17
	13	0.96

表 3 不同起伏参数下有效航迹改善率

Tab. 3 The improvement probability of effective track under different fluctuation parameters

SNR(dB)	参数1(%)	参数2(%)
9	7.1	8.3
10	6.7	7.4
11	5.9	6.5
12	4.3	5.0
13	2.5	3.1
14	1.9	2.1
15	1.6	1.8

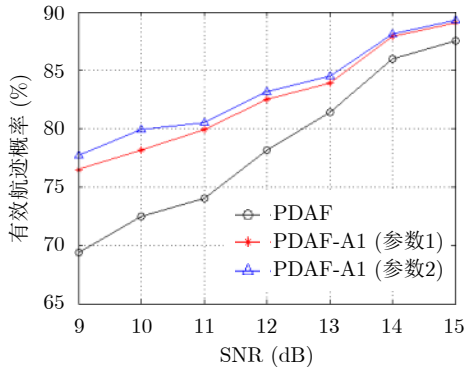


图 10 有效航迹概率

Fig. 10 The probability of effective track

显著，同时在不同起伏模型参数下，跟踪性能的提升幅度也略有不同。

5 结束语

本文首先基于Ku波段昆虫雷达采集的昆虫目标实验数据，建立了昆虫目标的RCS起伏模型，将其作为先验信息，推导出在高斯白噪声背景下Gamma起伏目标的幅度似然比，然后将其加权到概率数据互联滤波器的关联概率中。基于均方根误差和有效航迹概率对杂波中单目标的跟踪仿真结果进行性能

指标分析, 得出相比于PDAF算法, RCS特征辅助的目标跟踪算法可以有效地提高跟踪精度。

参考文献

- [1] CHAPMAN J W, DRAKE V A, and REYNOLDS D R. Recent insights from radar studies of insect flight[J]. *Annual Review of Entomology*, 2011, 56: 337–356. doi: [10.1146/annurev-ento-120709-144820](https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-144820).
- [2] LERRO D and BAR-SHALOM Y. Automated tracking with target amplitude information[C] Proceedings of 1990 American Control Conference, San Diego, USA, 1990: 2875–2880. doi: [10.23919/ACC.1990.4791244](https://doi.org/10.23919/ACC.1990.4791244).
- [3] LERRO D and BAR-SHALOM Y. Interacting multiple model tracking with target amplitude feature[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(2): 494–509. doi: [10.1109/7.210086](https://doi.org/10.1109/7.210086).
- [4] BREKKE E, HALLINGSTAD O, and GLATTETRE J. Tracking small targets in heavy-tailed clutter using amplitude information[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(2): 314–329. doi: [10.1109/joe.2010.2044670](https://doi.org/10.1109/joe.2010.2044670).
- [5] 陈振兴. 基于知识辅助的弱目标跟踪算法研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2013.
CHEN Zhenxing. Research of knowledge-aided dim target tracking algorithm[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [6] 夏玫. 基于雷达辅助知识的微弱目标跟踪算法研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2015.
XIA Mei. Research on radar auxiliary knowledge aided dim target tracking algorithm[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [7] 汪兵. 非独立同分布起伏目标建模与检测算法研究[D]. [博士论文], 电子科技大学, 2017.
WANG Bing. Research on modeling and the detection algorithm of non-IID fluctuating targets[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [8] 黄坦. 雷达目标动态RCS特性对探测的影响研究[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2014.
HUANG Tan. Research on the influence of target dynamic RCS characteristics on radar detection[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2014.
- [9] HOBBS S E, ALLSOPP K, and WOLF W. Signal analysis for an entomological radar with a vertical nutating beam[R]. College of Aeronautics Report 9919, 2003.
- [10] DOWDY P C. RCS probability distribution function modeling of a fluctuating target[C]. Proceedings of 1991 IEEE National Radar Conference, Los Angeles, USA, 1991. doi: [10.1109/NRC.1991.114752](https://doi.org/10.1109/NRC.1991.114752).
- [11] 何友, 修建娟, 关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 147–151.
HE You, XIU Jianjuan, and GUAN Xin. Radar Data Processing with Applications[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 147–151.
- [12] 理查兹, 邢孟道, 王彤, 李真芳, 译. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 253–254.
RICHARDS M A, XING Mengdao, WANG Tong, LI Zhenfang, translation. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 253–254.
- [13] GRADSHTEYN I S and RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th ed. San Diego: Academic Press, 2007: 1157–1160.

作者简介



方琳琳(1993–), 女, 北京理工大学雷达技术研究所博士生, 研究方向为雷达目标检测跟踪算法。

E-mail: fanglinlin_1@163.com



周超(1987–), 男, 博士后, 工作于北京理工大学雷达技术研究所, 研究方向为雷达抗干扰、雷达目标检测跟踪算法。

E-mail: 7520180050@bit.edu.cn



胡程(1981–), 男, 湖南岳阳人, 博士, 教授。2009年在北京理工大学信息与电子学院获得博士学位, 现担任北京理工大学信息与电子学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为地球同步轨道 SAR、双基地/前向散射雷达信号处理和昆虫雷达等。

E-mail: hucheng.bit@gmail.com