

机载预警雷达目标跟踪方法研究与应用

陈睿

西安电子工程研究所 陕西 西安 710010

摘要: 随着现代空中作战的复杂性和对抗强度不断提升,机载预警雷达作为重要的战略和战术信息获取手段,其目标跟踪能力成为了决定战场态势感知和决策优势的关键因素。机载预警雷达能够在复杂的电磁环境中,远距离探测并持续跟踪敌方目标,为指挥中心提供实时、准确的目标位置、速度和姿态信息,从而增强防御和攻击的有效性。然而,由于机载预警雷达面临的杂波环境、多目标干扰以及高速运动目标的动态特性,如何实现精确、稳定的目标跟踪仍然是一个具有挑战性的课题。本研究旨在深入探讨和分析适用于机载预警雷达的目标跟踪方法,以期提高雷达系统的整体效能,为未来的空战提供强有力的技术支持。

关键词: 机载预警雷达;目标跟踪;卡尔曼滤波;数据融合

引言: 进入21世纪,随着软件定义雷达和射频集成技术的发展,机载预警雷达变得更加灵活且功能强大,例如E-8联合星战斗管理与指挥、控制、情报、监视和侦察飞机的雷达系统,能够同时执行战场管理和战术指挥任务。近年来,随着量子计算和人工智能的引入,机载预警雷达正朝着更高灵敏度、更强抗干扰能力和智能化方向发展,为现代战争提供了不可或缺的远程感知和指挥支持。

1 预警雷达的作用与特点

预警雷达作为现代战争中重要的信息获取工具,其主要作用在于早期发现、识别和跟踪敌方目标,提供战场态势感知,为指挥决策提供关键数据支持。其特点包括:(1)长探测距离。预警雷达具备远距离探测能力,能在敌方进入射程之前发现并预警,提高防御方的战略反应时间。(2)大覆盖范围。机载预警雷达尤其如此,能够在三维空间内覆盖广阔的区域,提供全方位的监视。(3)高分辨率。通过先进的信号处理技术,预警雷达能区分近距离的多个目标,提高目标识别的准确性。(4)抗干扰能力。预警雷达设计有多种抗干扰措施,如频率分集、空间分集和数字信号处理技术,以在复杂电磁环境中保持稳定工作。(5)动态机动性。机载预警雷达搭载于飞行平台,可实现大范围机动,提供更灵活的战场监控。(6)实时数据更新。预警雷达能够实时更新目标位置信息,为战术决策提供及时、准确的数据支持。(7)系统集成性强。预警雷达通常与其他情报、监视和侦察系统集成,形成综合的战场感知网络,增强整

体作战效能。

2 机载预警雷达目标跟踪方法

2.1 基于卡尔曼滤波的目标跟踪

基于卡尔曼滤波的目标跟踪是机载预警雷达目标跟踪领域中的经典方法。卡尔曼滤波是一种最优估计理论,适用于线性高斯系统的状态估计,能够有效地处理噪声和不确定性。在机载预警雷达系统中,目标的运动通常被建模为线性动态过程,而观测数据则包含随机噪声。

(1) 卡尔曼滤波的基本原理

卡尔曼滤波通过结合预测和更新两个步骤来不断优化对目标状态的估计。预测阶段利用上一时刻的目标状态和动态模型来预测下一时刻的状态;更新阶段则结合实际观测数据,通过最小化均方误差来校正预测结果,从而得到更精确的目标状态估计。

(2) 目标跟踪过程

在机载预警雷达目标跟踪中,卡尔曼滤波首先设定一个初始状态估计和协方差矩阵,然后每接收到一次新的雷达回波数据,就执行一次滤波迭代。动态模型描述了目标的运动,例如加速度模型或匀速模型,用于预测目标的未来位置。观测模型则将预测的位置与雷达实际探测到的目标位置进行比较,调整状态估计。

(3) 性能优势与局限性

卡尔曼滤波在处理线性系统和高斯噪声时表现出高效和稳定性,尤其在目标运动状态相对简单的情况下。然而,对于非线性或非高斯噪声环境,其性能下降。此外,当目标行为变得复杂,如机动飞行或存在遮挡时,卡尔曼滤波无法提供最佳跟踪效果。

(4) 改进与扩展

为了克服局限性,研究者提出了扩展卡尔曼滤波

作者简介: 陈睿(1990年8月-),汉,男,陕西西安人,硕士在读。研究方向:机载雷达、地面动目标跟踪、数据处理、多模型算法方面。

(EKF) 和无迹卡尔曼滤波 (UKF), 分别通过线性化非线性函数和采用辛变换来处理非线性问题。此外, 通过与其他滤波算法结合, 如粒子滤波, 可以进一步提高跟踪性能, 适应更复杂的战场环境。

2.2 基于粒子滤波的目标跟踪

基于粒子滤波的目标跟踪是现代雷达目标跟踪领域中的一个重要方法, 尤其在处理非线性、非高斯噪声环境下的问题时展现出优越性能。粒子滤波的基本思想是利用一系列随机选取的样本 (粒子) 来表示和更新目标状态的概率分布。在每个时间步, 首先, 根据上一时刻的粒子和预测模型, 生成新的粒子位置; 然后, 利用观测数据和重采样步骤, 对粒子进行权重分配和更新, 以适应目标状态的变化。能够有效处理复杂的动态模型和观测模型, 比如非线性的运动模型和模糊的观测条件。

在机载预警雷达系统中, 由于目标的机动性和环境的复杂性, 粒子滤波的优势尤为突出。例如, 对于高速机动目标, 其运动轨迹无法用简单的线性模型描述, 粒子滤波可以灵活地适应非线性变化。同时, 粒子滤波还可以处理多模态问题, 当目标出现多种行为模式时, 能捕捉到所有状态并进行跟踪。在具体实现中, 可以采用均匀重采样、系统重要性采样等策略来防止粒子退化, 保证样本多样性。

2.3 多模态融合跟踪方法

在机载预警雷达目标跟踪中, 单一的跟踪方法往往无法应对复杂的战场环境和多样化的目标特性, 是一种通过整合不同传感器信息来提升跟踪性能的技术。利用了各种传感器如光学、红外、雷达等的互补优势, 以提高目标识别的准确性和鲁棒性。首先, 多模态融合能够增强目标的特征表示, 尤其是在目标信号弱或者受到严重干扰的情况下。例如, 当雷达回波信号受到遮挡或模糊时, 红外传感器可以提供额外的热辐射信息, 帮助维持目标跟踪。其次, 通过联合处理不同模态的数据, 可以降低单一模态的不确定性, 提高跟踪精度。比如, 卡尔曼滤波与粒子滤波的融合, 可以在保留卡尔曼滤波实时性的同时, 利用粒子滤波处理非线性问题的能力, 实现对复杂运动模型的高效跟踪。同时, 多模态融合还能提高系统的抗干扰能力。在面对敌方的电子战策略时, 依赖单一模态导致跟踪失效, 而多模态融合则能降低风险, 确保在多种干扰环境下稳定跟踪。

3 机载预警雷达目标跟踪方法的具体应用

3.1 基于机载广域监视系统的目标跟踪

基于机载广域监视系统的雷达目标跟踪方法是通过整合机载预警雷达和其他传感器数据, 实现对广阔空域

内的目标高效、精确的定位和跟踪, 通常结合了先进的数据融合技术和高分辨率的雷达信息, 以克服单个传感器的局限性, 提高目标识别和跟踪的准确性。

在广域监视系统中, 目标跟踪的关键在于如何有效地处理大量数据并实时更新目标状态估计。例如, 通过采用概率数据关联技术, 如多假设跟踪 (MHT) 或联合概率数据关联 (JPDA), 可以解决多目标跟踪中的数据关联问题, 即使在存在大量虚假目标和杂波的情况下也能保持跟踪性能。此外, 利用空间和时间上的目标运动模型, 可以预测目标的未来位置, 进一步优化跟踪算法。例如, 机载预警雷达与卫星通信系统相结合, 可以实现对远离飞机的远程目标的跟踪。雷达提供实时的位置和速度信息, 而卫星通信则负责传输数据到中央处理中心, 进行综合分析和决策, 不仅扩大了跟踪范围, 还增强了对隐形或高速目标的探测能力。

3.2 基于跟踪系数的机载雷达目标跟踪能力评估

在机载预警雷达目标跟踪中, 准确评估跟踪性能。常用的评估方法是基于跟踪系数 (Tracking Performance Metrics, TPM), 能够量化雷达系统对目标跟踪的精度和稳定性。跟踪系数通常包括位置误差、速度误差、跟踪滤波器的收敛速度以及在特定干扰环境下的跟踪保持能力等多个方面。首先, 位置误差是衡量跟踪性能的关键指标, 反映了雷达系统预测目标位置与实际位置之间的偏差。通过计算均方根 (Root Mean Square, RMS) 误差, 可以得到位置估计的精度。速度误差则关注雷达对目标运动速度估计的准确性, 同样可以通过RMS误差来评估。其次, 跟踪滤波器的收敛速度是指系统从初始状态快速达到稳定跟踪状态的能力。在新目标出现或者环境变化时, 快速的收敛速度能确保系统迅速适应新的跟踪任务。通过观察滤波器的收敛时间或收敛曲线来评估。同时, 针对不同的干扰环境, 如多径效应、杂波和噪声, 评估跟踪保持能力是必要的。

3.3 基于Transformer网络的机载雷达多目标跟踪

随着深度学习技术在信号处理领域的广泛应用, Transformer网络作为一种新型的序列建模工具, 已经在多个领域展现出卓越性能。在机载预警雷达多目标跟踪中, Transformer网络能够有效地处理复杂的时空关联信息, 尤其适用于捕捉目标间的相互影响和动态关系。传统的多目标跟踪方法, 如基于卡尔曼滤波和粒子滤波的方法, 通常侧重于单个目标的独立跟踪, 难以处理大量目标之间的相互作用。而Transformer网络通过自注意力机制, 并行处理所有目标, 同时考虑全局信息, 从而实现了对多目标的高效跟踪。具体实现上, 构建一个包含编

码器和解码器的Transformer模型。编码器负责从原始雷达回波数据中提取特征,同时考虑每个目标与其他目标的关系。解码器则利用编码器的输出,预测每个目标的未来状态,如位置、速度和加速度等。通过训练模型以最小化预测状态与实际状态之间的误差,可以得到优化的跟踪策略。在实际应用中,Transformer网络的并行性使其在处理大规模目标集时表现出高效率。同时,其强大的表示学习能力使得模型能够适应环境变化和目标行为的不确定性。

3.4 机载预警雷达杂波抑制与目标跟踪方法

在第五章第五节中,我们探讨了机载预警雷达杂波抑制与目标跟踪方法。机载预警雷达在执行任务时,常常受到各种类型的杂波干扰,如大气散射、地物反射以及人为干扰等,杂波会极大地影响目标检测和跟踪的精度。因此,有效的杂波抑制技术是确保雷达系统性能的关键。常见的杂波抑制策略是采用空间滤波,通过利用雷达接收信号的空间多样性来区分目标信号和杂波。例如,可以利用多个天线元件的接收信号进行空间谱估计,从而实现对杂波的抑制。同时,自适应滤波器如最小均方误差(LMS)滤波器和卡尔曼滤波器的结合,能够在不断变化的环境中动态调整滤波参数,进一步提高杂波抑制效果。在目标跟踪方面,结合杂波抑制的结果,可以采用联合探测和跟踪的方法。例如,可以先利用杂波抑制后的数据进行目标检测,然后将检测到的目标候选进行跟踪。在该过程中,可以运用概率数据关联(PDA)或者联合概率数据关联(JPDA)算法,以处理多目标跟踪问题,同时考虑杂波环境的影响,降低虚警率和丢失真实目标的风险。此外,现代机载预警雷达系统还引入了先进的数字信号处理技术,如基于稀疏表示的杂波抑制方法,利用信号的稀疏特性有效地从杂波中提取目标信息。同时,深度学习技术也被应用于杂波模型的学习和目标特征的提取,以提升跟踪的稳健性和准确性。

3.5 机载预警雷达空中多目标跟踪

机载预警雷达在空中多目标跟踪方面面临着独特的挑战,如目标数量大、动态范围广、杂波环境复杂以及实时性要求高等。为了解决这些问题,一系列先进的跟踪技术被应用于机载预警雷达系统。采用基于数据关联的多目标跟踪算法,如联合概率数据关联(JPDA)和扩

展的多假设跟踪(E-MHT)。JPDA通过建立目标与测量之间的概率关联,有效地处理了目标间的混淆问题。E-MHT则通过维持多个目标轨迹假设,提高了在高杂波环境下的跟踪精度。

此外,随着计算能力的提升,基于贝叶斯框架的多目标跟踪算法,如随机集方法(如CPHD滤波)和门限检测方法(如卡方门限检测),在机载预警雷达中也得到了广泛应用,能够处理目标出生、死亡及分裂合并等动态变化,提高了系统的适应性和鲁棒性。为了进一步提高跟踪性能,可以结合机器学习和深度学习技术。例如,利用深度神经网络对雷达回波特征进行学习,以增强目标识别和跟踪能力。同时,通过在线学习和自适应调整,使跟踪算法能动态优化参数,以应对不断变化的环境条件。空中多目标跟踪技术的应用不仅限于军事领域,也在民用航空监控、灾害响应和搜救行动中展现出巨大潜力。例如,在防务领域,机载预警雷达通过精确的多目标跟踪,可实现对敌方飞行器的早期预警和战术指挥;在民用航空中,有助于空管中心实时掌握飞行状态,提高飞行安全。

4 结束语

综上所述,机载预警雷达目标跟踪技术在多个领域展现出其强大的实用性和灵活性,不仅提升了作战效率,也对公共安全和民用服务提供了有力保障。随着技术的不断发展,未来的机载预警雷达系统将在目标跟踪性能、抗干扰能力和智能化水平上进一步提升,以应对更为复杂多变的挑战。

参考文献

- [1]李杰.机载预警雷达目标跟踪方法研究与应用[D].陕西:西安电子科技大学,2018.
- [2]王瑛琪.机载预警雷达无意干扰抑制与目标跟踪方法研究[D].陕西:西安电子科技大学,2020.
- [3]戴瑜,龙文佳.基于多机载预警雷达的机动目标融合跟踪方法[J].火力与指挥控制,2021,46(4):136-140.
- [4]张俊飞.机载预警雷达杂波抑制与目标跟踪方法研究[D].陕西:西安电子科技大学,2017.
- [5]中国人民解放军空军预警学院.一种机载预警雷达海面机动舰船目标自适应跟踪方法:CN202011128438.X[P].2021-10-22.