(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 122131607 A
(43)申请公布日 2026.06.02

(21)申请号 202610562493.0

(22)申请日 2026.04.27

(71)申请人 吉林航空维修有限责任公司
地址 132102 吉林省吉林市经济技术开发区双吉街20号

(72)发明人 于智永 郑英鹏 赵倩

(74)专利代理机构 合肥四阅专利代理事务所(普通合伙) 34182
专利代理师 张健

(51)Int.Cl.
G05B 13/04(2006.01)

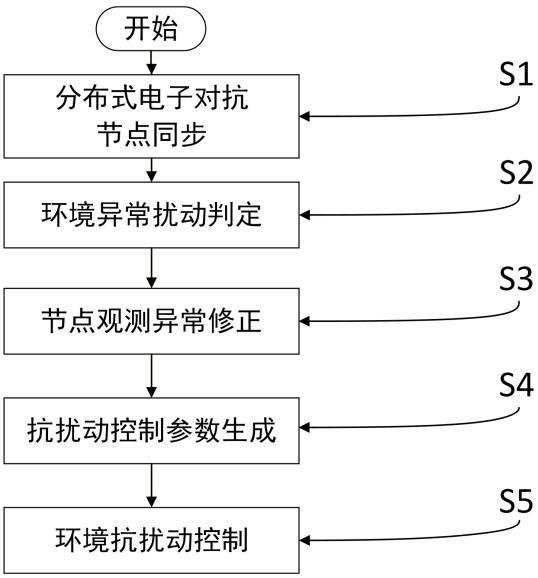
权利要求书3页 说明书17页 附图4页

(54)发明名称

一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,涉及机载信息系统控制技术领域,该方法包括:分布式电子对抗节点同步、环境异常扰动判定、节点观测异常修正、抗扰动控制参数生成以及环境抗扰动控制;对受增益压缩或限幅影响的观测数据进行可逆修正,生成节点有效观测数据;进一步依据有效观测数据及节点运行约束条件生成协同抗扰动控制参数,并通过控制执行状态回采及一致性校核实现抗扰动控制闭环管理。本发明能够有效区分外部压制扰动、本机互扰及节点异常扰动,提高观测数据真实性及抗扰动控制针对性,实现机载分布式电子对抗系统在复杂电磁环境下的稳定运行及协同抗扰能力。



CN 122131607 A

1.一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

步骤S1:分布式电子对抗节点同步,得到分布式节点运行状态对齐数据;

步骤S2:环境异常扰动判定,基于所述分布式节点运行状态对齐数据,对各节点接收信号变化情况与节点自身发射状态进行关联比对,并结合节点方向接收差异信息及节点运行健康状态数据,对异常变化进行来源分类,得到电磁环境扰动判定数据;

步骤S3:节点观测异常修正,基于所述电磁环境扰动判定数据,对存在异常扰动的节点接收数据进行状态关联分析,结合节点增益状态信息及信号限幅状态信息,对受影响观测结果进行修正处理,得到节点有效观测数据;

步骤S4:抗扰动控制参数生成,基于所述节点有效观测数据,结合各电子对抗节点当前工作模式与设备运行边界条件,对发射功率、发射频率、波形参数及工作时序进行计算生成,得到节点抗扰动控制参数数据;

步骤S5:环境抗扰动控制,将所述节点抗扰动控制参数数据下发至对应节点执行,并对执行后的节点运行状态及接收信号变化情况进行回采与一致性校核,得到节点抗扰动执行状态数据。

2.根据权利要求1所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S1中,所述分布式电子对抗节点同步,采集各电子对抗节点的本地时间信息、工作状态信息及发射接收参数信息,基于机载统一时间源对各节点时间信息进行对齐处理,并对节点运行状态进行一致性校核处理,得到分布式节点运行状态对齐数据;

所述分布式节点运行状态对齐数据,具体包括:节点时间对齐标识数据、节点本振锁定状态数据、节点发射工作参数数据、节点接收链路状态数据和节点运行健康状态数据。

3.根据权利要求2所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S2中,所述环境异常扰动判定,具体采用多证据一致归因方法,包括以下步骤:

步骤S21:观测特征规整处理,在预设时间窗口内,提取各节点的接收功率变化量、频段占用变化情况及谱形变化情况,并生成节点接收变化特征数据,同时提取对应节点的发射频率、发射功率、占空比、接收增益状态及限幅状态信息,形成节点运行关联特征数据;

步骤S22:异常候选检测,对各节点接收变化特征数据进行聚合处理,计算整体异常变化程度,并与预设基线阈值进行比较,当整体异常变化程度超过预设阈值时,生成扰动存在标志数据,并依据异常变化程度划分扰动强度等级数据;

步骤S23:计划一致性分析,将各节点的接收变化特征数据与对应时间窗口内的发射工作参数进行关联比对,当异常频段与发射频率存在重叠关系,且接收变化程度与发射功率或占空比变化具有同步性时,生成计划一致性证据数据;

步骤S24:空间一致性分析,对多个节点的接收变化程度进行一致性比对,当多个节点在同一时间窗口内呈现同步上升或同步下降趋势时,生成空间一致性证据数据;

步骤S25:健康一致性分析,对节点本振锁定状态、接收链路限幅状态、溢出状态以及温度、电流及通信链路质量状态进行综合判断,当异常变化集中于运行状态异常的节点时,生成健康一致性证据数据;

步骤S26:多证据归因判定,按照预设权重对计划一致性证据数据、空间一致性证据数

据和健康一致性证据数据进行综合比较,生成扰动来源类型数据,包括外部异常辐射来源、本机互扰来源和节点运行异常来源;

步骤S27:扰动频段分布生成,对各节点接收变化频段进行汇总处理,生成扰动频段分布数据并汇总为电磁环境扰动判定数据。

4.根据权利要求3所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S2中,所述电磁环境扰动判定数据,具体包括:扰动存在标志数据、扰动强度等级数据、扰动来源类型数据和扰动频段分布数据。

5.根据权利要求4所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S3中,所述节点观测异常修正,采用观测可逆修正改进方法,包括以下步骤:

步骤S31:异常观测定位,在统一时间窗口内,读取节点接收增益状态信息、限幅触发标志及溢出标志,对存在限幅或溢出的时间段进行标记处理,得到受影响观测区间数据;

步骤S32:增益反演处理,根据节点当前接收增益档位对应的预设增益标定值,对观测接收功率数据进行反向换算,得到等效输入功率数据;

步骤S33:限幅补偿处理,在同一时间窗口内选取未发生限幅的参考观测样本,计算参考功率统计值,并依据参考功率统计值与限幅观测功率之间的比例关系确定恢复因子,对限幅观测数据进行补偿修正,得到修正后接收功率数据;

步骤S34:频谱占用修正,对各频点观测能量进行增益反演及限幅补偿处理,并依据预设频谱判定门限重新生成频段占用标识,得到修正后频谱占用数据;

步骤S35:可信度评估,根据限幅触发情况、增益变化幅度、节点链路质量状态以及跨节点观测一致性情况,生成观测可信度等级数据;

步骤S36:有效区间生成,根据溢出标志、持续限幅时间比例及观测可信度等级,对低可信时间段或频段进行剔除处理,生成观测有效区间数据。

6.根据权利要求5所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S3中,所述节点有效观测数据,具体包括修正后接收功率数据、修正后频谱占用数据、观测可信度等级数据和观测有效区间数据。

7.根据权利要求6所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S4中,所述抗扰动控制参数生成采用一种协同控制参数生成改进方法,包括以下步骤:

步骤S41:可用观测筛选,根据节点有效观测数据中的观测可信度等级数据及观测有效区间数据,筛选可用于控制决策的观测信息,同时结合各节点本振锁定状态数据、运行健康状态数据及通信链路质量状态数据,生成节点参与协同的权重数据;

步骤S42:控制可行域构建,依据各节点当前工作模式、功率上限、频段许可范围、波形配置范围以及收发时隙约束条件,构建发射功率、发射频率、波形参数及工作时序的可行参数集合;

步骤S43:候选参数组合生成,根据主要受扰频段信息及可用观测结果,在各节点可行参数集合中选择避开受扰频段且满足运行约束的候选发射功率、频率、波形及工作时序组合,并生成候选控制参数集合;

步骤S44:多节点一致性判定,根据节点权重数据及候选控制参数组合之间的冲突关

系,对各节点候选组合进行一致性比对,当候选组合满足预设一致性条件时生成协同节点集合,当存在冲突时按照节点权重进行优先级筛选或缩减协同范围,生成协同控制标识数据;

步骤S45:控制参数封装输出,根据最终确定的控制参数组合,生成节点抗扰动控制参数数据。

8.根据权利要求7所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S4中,所述节点抗扰动控制参数数据,具体包括:发射功率调整参数数据、发射频率调整参数数据、波形参数调整数据、工作时序调整数据和协同控制标识数据。

9.根据权利要求8所述的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,其特征在于:在步骤S5中,所述节点抗扰动执行状态数据,具体包括:实际执行参数反馈数据、执行一致性校核结果数据、抗扰动效果变化数据和执行异常标志数据。

一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及机载信息系统控制技术领域,具体是指一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法。

背景技术

[0002] 机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,是指在机载分布式电子对抗系统运行过程中,通过对各电子对抗节点运行状态及电磁环境变化情况进行采集、分析及控制,实现电子对抗节点在复杂电磁环境下稳定运行及抗扰动控制的处理方法。

[0003] 在实际应用过程中,机载电子对抗系统通常工作于复杂电磁环境中,环境中不仅存在外部压制干扰信号,还存在本机各电子对抗节点之间的互扰现象,同时电子对抗节点自身设备状态异常也可能引起接收信号异常变化;现有技术中,电子对抗系统通常直接基于节点接收信号强度变化生成抗扰动控制参数,但由于缺乏统一时间基准下的节点状态对齐机制,导致各节点观测数据存在时间偏差;同时,现有方法难以准确区分外部压制干扰、本机互扰及节点设备异常引起的观测变化,容易导致扰动来源误判。

[0004] 此外,在强干扰环境下,电子对抗节点接收链路可能发生增益压缩或限幅,使接收观测结果失真,而现有方法缺乏对失真观测结果的有效修正机制,导致控制参数生成依据不准确;同时,在控制参数下发执行后,现有技术通常缺乏执行状态回采及抗扰动效果校核机制,使控制执行效果不可验证;

[0005] 因此,亟需一种能够实现节点状态同步、扰动来源准确判定、观测数据修正及控制执行闭环校核的机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法。

发明内容

[0006] 针对上述情况,为克服现有技术的缺陷,本发明提供了一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,本发明采取的技术方案如下:本发明提供的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,该方法包括以下步骤:

[0007] 步骤S1:分布式电子对抗节点同步;

[0008] 步骤S2:环境异常扰动判定;

[0009] 步骤S3:节点观测异常修正;

[0010] 步骤S4:抗扰动控制参数生成;

[0011] 步骤S5:环境抗扰动控制。

[0012] 进一步地,在步骤S1中,所述分布式电子对抗节点同步,用于在统一时间基准下消除各电子对抗节点之间的时间漂移及状态偏差,确保各节点运行状态在同一工作周期内具备可比性与一致性,具体为采集各电子对抗节点的本地时间信息、工作状态信息及发射接收参数信息,基于机载统一时间源对各节点时间信息进行对齐处理,并对节点运行状态进行一致性校核处理,得到分布式节点运行状态对齐数据;

[0013] 所述分布式节点运行状态对齐数据,具体包括:节点时间对齐标识数据、节点本振

锁定状态数据、节点发射工作参数数据、节点接收链路状态数据和节点运行健康状态数据。

[0014] 进一步地,在步骤S2中,所述环境异常扰动判定,用于识别当前电磁环境中是否存在异常扰动,并区分扰动来源类型,以避免误将本机互扰或节点异常误判为外部压制干扰,具体为基于所述分布式节点运行状态对齐数据,对各节点接收信号变化情况与节点自身发射状态进行关联比对,并结合节点方向接收差异信息及节点运行健康状态数据,对异常变化进行来源分类,得到电磁环境扰动判定数据;

[0015] 所述环境异常扰动判定,具体采用多证据一致归因方法,包括以下步骤:

[0016] 步骤S21:观测特征规整处理,用于在统一时间基准下对各电子对抗节点的接收信号变化情况进行同周期规整,消除采样差异对判定结果的影响,具体为在预设时间窗口内,提取各节点的接收功率变化量、频段占用变化情况及谱形变化情况,并生成节点接收变化特征数据,同时提取对应节点的发射频率、发射功率、占空比、接收增益状态及限幅状态信息,形成节点运行关联特征数据;

[0017] 步骤S22:异常候选检测,用于判断当前时间窗口内是否存在异常扰动,具体为对各节点接收变化特征数据进行聚合处理,计算整体异常变化程度,并与预设基线阈值进行比较,当整体异常变化程度超过预设阈值时,生成扰动存在标志数据,并依据异常变化程度划分扰动强度等级数据;

[0018] 步骤S23:计划一致性分析,用于判定异常变化是否与本机发射行为存在关联,具体为将各节点的接收变化特征数据与对应时间窗口内的发射工作参数进行关联比对,当异常频段与发射频率存在重叠关系,且接收变化程度与发射功率或占空比变化具有同步性时,生成计划一致性证据数据;

[0019] 步骤S24:空间一致性分析,用于判定异常变化是否在多个节点之间具有一致趋势,具体为对多个节点的接收变化程度进行一致性比对,当多个节点在同一时间窗口内呈现同步上升或同步下降趋势时,生成空间一致性证据数据;

[0020] 步骤S25:健康一致性分析,用于判定异常变化是否由节点自身运行异常引起,具体为对节点本振锁定状态、接收链路限幅状态、溢出状态以及温度、电流及通信链路质量状态进行综合判断,当异常变化集中于运行状态异常的节点时,生成健康一致性证据数据;

[0021] 步骤S26:多证据归因判定,用于根据计划一致性证据数据、空间一致性证据数据及健康一致性证据数据对扰动来源进行分类,具体为按照预设权重对计划一致性证据数据、空间一致性证据数据和健康一致性证据数据进行综合比较,生成扰动来源类型数据,包括外部异常辐射来源、本机互扰来源和节点运行异常来源;

[0022] 步骤S27:扰动频段分布生成,用于明确异常扰动主要集中频段,具体为对各节点接收变化频段进行汇总处理,生成扰动频段分布数据并汇总为电磁环境扰动判定数据;

[0023] 所述电磁环境扰动判定数据,具体包括:扰动存在标志数据、扰动强度等级数据、扰动来源类型数据和扰动频段分布数据。

[0024] 进一步地,在步骤S3中,所述节点观测异常修正,用于消除强干扰或链路异常对接收观测结果造成的失真影响,提高观测数据的真实性与稳定性,具体为基于所述电磁环境扰动判定数据,对存在异常扰动的节点接收数据进行状态关联分析,结合节点增益状态信息及信号限幅状态信息,对受影响观测结果进行修正处理,得到节点有效观测数据;

[0025] 所述节点观测异常修正,采用观测可逆修正改进方法,包括以下步骤:

[0026] 步骤S31:异常观测定位,用于识别受增益压缩、限幅或溢出影响的观测样本,具体为在统一时间窗口内,读取节点接收增益状态信息、限幅触发标志及溢出标志,对存在限幅或溢出的时间段进行标记处理,得到受影响观测区间数据;

[0027] 步骤S32:增益反演处理,用于消除接收链路增益对观测功率的影响,具体为根据节点当前接收增益档位对应的预设增益标定值,对观测接收功率数据进行反向换算,得到等效输入功率数据;

[0028] 步骤S33:限幅补偿处理,用于对发生限幅的观测结果进行可逆修正,具体为在同一时间窗口内选取未发生限幅的参考观测样本,计算参考功率统计值,并依据参考功率统计值与限幅观测功率之间的比例关系确定恢复因子,对限幅观测数据进行补偿修正,得到修正后接收功率数据;

[0029] 步骤S34:频谱占用修正,用于恢复因增益压缩或限幅导致的频谱能量失真,具体为对各频点观测能量进行增益反演及限幅补偿处理,并依据预设频谱判定门限重新生成频段占用标识,得到修正后频谱占用数据;

[0030] 步骤S35:可信度评估,用于评估修正后观测结果的可靠程度,具体为根据限幅触发情况、增益变化幅度、节点链路质量状态以及跨节点观测一致性情况,生成观测可信度等级数据;

[0031] 步骤S36:有效区间生成,用于确定可用于后续控制决策的观测时间段及频段范围,具体为根据溢出标志、持续限幅时间比例及观测可信度等级,对低可信时间段或频段进行剔除处理,生成观测有效区间数据;

[0032] 所述节点有效观测数据,具体包括修正后接收功率数据、修正后频谱占用数据、观测可信度等级数据和观测有效区间数据。

[0033] 进一步地,在步骤S4中,所述抗扰动控制参数生成,用于根据当前有效观测结果及各节点运行状态生成适配的抗扰动控制参数,保证各节点在满足运行约束条件下实施协同抗扰动动作,具体为基于所述节点有效观测数据,结合各电子对抗节点当前工作模式与设备运行边界条件,对发射功率、发射频率、波形参数及工作时序进行计算生成,得到节点抗扰动控制参数数据;

[0034] 所述抗扰动控制参数生成采用一种协同控制参数生成改进方法,其特征在于包括以下步骤:

[0035] 步骤S41:可用观测筛选,用于在生成控制参数前筛除低可信观测数据并确定各节点参与协同的权重,具体为根据节点有效观测数据中的观测可信度等级数据及观测有效区间数据,筛选可用于控制决策的观测信息,同时结合各节点本振锁定状态数据、节点运行健康状态数据及通信链路质量状态数据,生成节点参与协同的权重数据;

[0036] 步骤S42:控制可行域构建,用于限定各节点在设备运行边界条件下可执行的控制参数范围,具体为依据各节点当前工作模式、功率上限、频段许可范围、波形配置范围以及收发时隙约束条件,构建发射功率、发射频率、波形参数及工作时序的可行参数集合;

[0037] 步骤S43:候选参数组合生成,用于在所述可行参数集合内生成满足抗扰需求的候选控制组合,具体为根据主要受扰频段信息及可用观测结果,在各节点可行参数集合中选择避开受扰频段且满足运行约束的候选发射功率、频率、波形及工作时序组合,并生成候选控制参数集合;

[0038] 步骤S44:多节点一致性判定,用于确定是否需要多节点协同执行以及协同节点范围,具体为根据节点权重数据及候选控制参数组合之间的冲突关系,对各节点候选组合进行一致性比对,当候选组合满足预设一致性条件时生成协同节点集合,当存在冲突时按照节点权重进行优先级筛选或缩减协同范围,生成协同控制标识数据;

[0039] 步骤S45:控制参数封装输出,用于形成可直接下发执行的控制参数数据,具体为根据最终确定的控制参数组合,生成节点抗扰动控制参数数据;

[0040] 所述节点抗扰动控制参数数据,具体包括:发射功率调整参数数据、发射频率调整参数数据、波形参数调整数据、工作时序调整数据和协同控制标识数据。

[0041] 进一步地,在步骤S5中,所述环境抗扰动控制,用于控制各电子对抗节点执行抗扰动控制参数,并校核各节点执行结果的一致性及抗扰动效果,具体为将所述节点抗扰动控制参数数据下发至对应节点执行,并对执行后的节点运行状态及接收信号变化情况进行回采与一致性校核,得到节点抗扰动执行状态数据;

[0042] 所述节点抗扰动执行状态数据,具体包括:实际执行参数反馈数据、执行一致性校核结果数据、抗扰动效果变化数据和执行异常标志数据;其中,所述实际执行参数反馈数据,用于表征节点执行后的实际发射参数;所述执行一致性校核结果数据,用于表征各节点之间是否存在执行偏差;所述抗扰动效果变化数据,用于表征控制执行后电磁环境变化情况;所述执行异常标志数据,用于表征是否存在参数未生效或执行失败情况。

[0043] 采用上述方案本发明取得的有益效果如下:

[0044] (1)针对在已有的机载电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法中,存在着各分布式电子对抗节点在强电磁对抗环境下观测结果失真、扰动来源难以准确区分以及抗扰动控制缺乏闭环校核机制,导致抗扰动控制参数生成针对性不足、控制执行效果不可验证的问题,本方案创造性地采用基于分布式节点运行状态对齐数据、电磁环境扰动判定数据、节点有效观测数据及节点抗扰动执行状态数据构建的闭环抗扰动控制方法,通过节点同步、扰动归因判定、观测异常修正、协同控制参数生成及执行状态回采校核形成完整抗扰动控制闭环,实现对抗扰动控制过程的可观测、可修正、可执行及可校核管理;

[0045] (2)针对在已有的分布式电子对抗节点运行状态管理方法中,存在着各节点本地时间漂移及运行状态偏差导致观测数据不可直接比较,进而影响扰动识别准确性的问题,本方案创造性地采用分布式电子对抗节点同步方法,通过机载统一时间源对各节点时间进行对齐,并对节点本振锁定状态、发射工作参数、接收链路状态及运行健康状态进行一致性校核,生成分布式节点运行状态对齐数据,实现各节点观测及运行状态的同周期一致化管理;

[0046] (3)针对在已有的电子对抗节点接收观测数据处理方法中,存在着在强干扰条件下接收链路增益压缩、限幅或溢出导致观测功率数据失真,从而使抗扰动控制决策依据不准确的问题,本方案创造性地采用观测可逆修正改进方法,通过异常观测定位、增益反演处理、限幅补偿处理、频谱占用修正及可信度评估,生成节点有效观测数据,实现对受干扰失真观测结果的恢复及有效区间筛选;

[0047] (4)针对在已有的电子对抗系统抗扰动控制执行方法中,存在着控制参数下发后缺乏执行状态一致性校核及抗扰动效果反馈机制,导致控制执行偏差无法及时发现及修正的问题,本方案创造性地采用环境抗扰动控制方法,通过控制参数下发、执行确认、实际执

行参数反馈比对及抗扰动效果变化分析,生成节点抗扰动执行状态数据,实现抗扰动控制执行状态的闭环校核与效果评估。

附图说明

[0048] 图1为本发明提供的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法的流程示意图;

[0049] 图2为步骤S2环境异常扰动判定的流程示意图;

[0050] 图3为步骤S3节点观测异常修正的流程示意图;

[0051] 图4为步骤S4抗扰动控制参数生成的流程示意图。

[0052] 附图用来提供对本发明的进一步理解,并且构成说明书的一部分,与本发明的实施例一起用于解释本发明,并不构成对本发明的限制。

具体实施方式

[0053] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例;基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0054] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“顶”、“底”、“内”、“外”等指示方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0055] 实施例一,参阅图1,本发明提供的一种机载分布式电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法,该方法包括以下步骤:

[0056] 步骤S1:分布式电子对抗节点同步;

[0057] 步骤S2:环境异常扰动判定;

[0058] 步骤S3:节点观测异常修正;

[0059] 步骤S4:抗扰动控制参数生成;

[0060] 步骤S5:环境抗扰动控制。

[0061] 通过执行上述操作,针对在已有的机载电子对抗系统电磁环境抗扰动控制方法中,存在着各分布式电子对抗节点在强电磁对抗环境下观测结果失真、扰动来源难以准确区分以及抗扰动控制缺乏闭环校核机制,导致抗扰动控制参数生成针对性不足、控制执行效果不可验证的问题,本方案创造性地采用基于分布式节点运行状态对齐数据、电磁环境扰动判定数据、节点有效观测数据及节点抗扰动执行状态数据构建的闭环抗扰动控制方法,通过节点同步、扰动归因判定、观测异常修正、协同控制参数生成及执行状态回采校核形成完整抗扰动控制闭环,实现对抗扰动控制过程的可观测、可修正、可执行及可校核管理;

[0062] 具体而言,例如在多个电子对抗节点同时执行压制式干扰任务时,由于外部强压制信号或本机互扰影响,部分节点接收链路可能发生限幅或增益压缩,使接收功率数据失真,传统方法直接依据失真观测生成频率规避参数,可能误将本机互扰识别为外部干扰,从

而错误切换频率,导致协同干扰失败;而本方案通过统一时间基准实现节点状态对齐,并基于多证据归因判定区分扰动来源,再通过观测异常修正恢复真实观测状态,最终生成针对性抗扰动控制参数并通过执行状态回采进行效果校核,从而保证控制参数与真实电磁环境相匹配,提高抗扰动控制的准确性及可靠性。

[0063] 实施例二,参阅图1,该实施例基于上述实施例,在步骤S1中,所述分布式电子对抗节点同步,用于在统一时间基准下消除各电子对抗节点之间的时间漂移及状态偏差,确保各节点运行状态在同一工作周期内具备可比性与一致性,具体为采集各电子对抗节点的本地时间信息、工作状态信息及发射接收参数信息,基于机载统一时间源对各节点时间信息进行对齐处理,并对节点运行状态进行一致性校核处理,得到分布式节点运行状态对齐数据;

[0064] 所述分布式节点运行状态对齐数据,具体包括:节点时间对齐标识数据、节点本振锁定状态数据、节点发射工作参数数据、节点接收链路状态数据和节点运行健康状态数据;其中,所述节点时间对齐标识数据,用于表征各节点与机载统一时间源的同步状态;所述节点本振锁定状态数据,用于表征本振是否锁定及锁定稳定性等级;所述节点发射工作参数数据,用于表征当前发射频率、发射功率及占空比参数;所述节点接收链路状态数据,用于表征接收增益档位、限幅触发标志及溢出标志;所述节点运行健康状态数据,用于表征温度、电流及通信链路质量状态;

[0065] 在本实施例中,所述机载分布式电子对抗系统包括多个电子对抗节点,各电子对抗节点分布安装于机体不同位置,并通过机载数据总线与主控单元通信连接。每一电子对抗节点至少包括接收单元、发射单元、本振单元、控制处理单元、状态监测单元以及通信接口单元,其中,接收单元用于接收外部电磁信号并输出接收信号功率数据,发射单元用于执行电子干扰或对抗信号发射,本振单元用于提供频率基准,控制处理单元用于执行参数控制与状态管理,状态监测单元用于采集温度、电流及设备运行状态,通信接口单元用于与主控单元进行数据交互;

[0066] 所述分布式电子对抗节点同步,用于在统一时间基准下消除各电子对抗节点之间的时间漂移及状态偏差,确保各节点运行状态在同一工作周期内具备可比性与一致性。机载系统设有统一时间源,所述统一时间源可以为机载主时钟模块、导航时间源或专用时间同步模块,并以固定周期向各电子对抗节点广播时间同步帧。在每一同步周期内,各电子对抗节点读取本地时间计数值并生成本地时间戳,同时采集本振锁定状态、当前发射参数、当前接收链路状态以及运行健康状态,并将上述数据上传至主控单元;

[0067] 主控单元接收到各节点上传的数据后,计算各节点本地时间与统一时间源之间的时间偏差,当时间偏差超过预设阈值时,向对应节点发送时间校正指令,节点根据所述时间校正指令对本地时间计数基准进行调整。完成时间校正后,主控单元对各节点运行状态进行一致性校核,包括校核各节点是否处于相同工作模式、发射频率是否处于允许频段范围、发射功率是否超过安全边界、接收链路是否处于饱和状态以及通信链路质量是否满足可靠传输要求。当检测到节点运行状态存在异常时,生成状态异常标志并记录异常类型;

[0068] 在完成时间对齐及一致性校核处理后,生成分布式节点运行状态对齐数据。所述分布式节点运行状态对齐数据,具体包括:节点时间对齐标识数据、节点本振锁定状态数据、节点发射工作参数数据、节点接收链路状态数据以及节点运行健康状态数据。其中,所

述节点时间对齐标识数据用于表征节点是否完成时间对齐以及当前时间偏差情况;所述节点本振锁定状态数据用于表征本振是否锁定及锁定稳定等级;所述节点发射工作参数数据用于表征当前发射频率、发射功率、占空比及工作模式;所述节点接收链路状态数据用于表征接收增益档位、限幅触发标志、溢出标志及当前信号强度;所述节点运行健康状态数据用于表征节点温度状态、电流状态、电压状态及通信链路质量等级;

[0069] 在本实施例中,所述分布式节点运行状态对齐数据以结构化数据帧形式存储,每一电子对抗节点对应一条数据记录,数据记录中包括节点编号、时间戳、同步状态标志、本振状态信息、发射参数信息、接收链路状态信息以及健康状态信息,各数据记录按照节点编号顺序排列形成数据集合。通过上述同步与一致性校核处理,实现各电子对抗节点在统一时间基准下的状态对齐,为后续电磁环境扰动判定及抗扰动控制提供一致且可靠的运行状态基础。

[0070] 实施例三,参阅图1、图2,该实施例基于上述实施例,在步骤S2中,所述环境异常扰动判定,用于识别当前电磁环境中是否存在异常扰动,并区分扰动来源类型,以避免误将本机互扰或节点异常误判为外部压制干扰,具体为基于所述分布式节点运行状态对齐数据,对各节点接收信号变化情况与节点自身发射状态进行关联比对,并结合节点方向接收差异信息及节点运行健康状态数据,对异常变化进行来源分类,得到电磁环境扰动判定数据;

[0071] 优选地,所述节点方向接收差异信息基于节点安装方位及方向接收增益差异计算得到;

[0072] 所述环境异常扰动判定,具体采用多证据一致归因方法,包括以下步骤:

[0073] 步骤S21:观测特征规整处理,用于在统一时间基准下对各电子对抗节点的接收信号变化情况进行同周期规整,消除采样差异对判定结果的影响,具体为在预设时间窗口内,提取各节点的接收功率变化量、频段占用变化情况及谱形变化情况,并生成节点接收变化特征数据,同时提取对应节点的发射频率、发射功率、占空比、接收增益状态及限幅状态信息,形成节点运行关联特征数据;

[0074] 在本实施方式中,所述预设时间窗口优选设置为5ms～50ms,在快速压制扰动场景下优选为10ms;所述接收功率变化量可由当前窗口接收功率均值与前一窗口接收功率均值之差获得,所述频段占用变化情况可通过对当前窗口内各频点能量是否超过预设门限进行二值化后统计得到,所述谱形变化情况可通过频谱质心偏移量、主峰数量变化量或谱宽变化量中的至少一种进行表征;

[0075] 进一步地,为减小瞬时脉冲噪声对后续归因判定的影响,可对所述接收功率变化量及谱形变化量执行中值滤波或指数滑动平均处理,并将发射频率、发射功率、占空比、接收增益状态及限幅状态按照统一字段顺序构造成节点运行关联特征向量,以保证各节点输入结构一致;

[0076] 步骤S22:异常候选检测,用于判断当前时间窗口内是否存在异常扰动,具体为对各节点接收变化特征数据进行聚合处理,计算整体异常变化程度,并与预设基线阈值进行比较,当整体异常变化程度超过预设阈值时,生成扰动存在标志数据,并依据异常变化程度划分扰动强度等级数据;

[0077] 在本实施方式中,所述整体异常变化程度优选采用三类观测变化特征的耦合异常指数进行表征,其计算公式为:

[0078] $$A_t = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[(1+\Delta P_i)(1+\Delta O_i)(1+\Delta S_i)-1];$$

[0079] 式中，A_t是当前时间窗口内的整体异常变化程度，N为参与判定的电子对抗节点数量，ΔP_i是第i个节点的接收功率变化量，ΔO_i是第i个节点的频段占用变化量，ΔS_i是第i个节点的谱形变化量，i是节点索引；

[0080] 采用上述形式，可在接收功率变化、频段占用变化及谱形变化同时增强时放大异常响应，从而提高对复合型异常扰动的检测敏感性；当三类变化中仅单一特征轻微波动时，整体异常变化程度增长较缓，有利于抑制偶发局部噪声对异常候选检测的干扰；

[0081] 所述频段占用变化量，优选通过对当前时间窗口内各频点能量与自适应门限进行比较后得到的占用频点比例与前一时间窗口占用比例之差计算获得；所述谱形变化量，优选通过频谱质心偏移量与谱宽变化量的归一化组合表示，其中频谱质心可通过各频点能量加权平均计算获得，谱宽可通过能量分布方差确定；

[0082] 所述预设基线阈值可依据正常稳态工况下多个时间窗口的统计结果确定，优选采用正常工况均值加两倍标准差的方式自适应生成；在部分实施方式中，也可将归一化阈值设置为0.42；当A_t超过预设阈值时，判定当前窗口存在异常扰动候选；当A_t进一步超过第二强度阈值或第三强度阈值时，可分别标记为中强度扰动或高强度扰动；

[0083] 步骤S23：计划一致性分析，用于判定异常变化是否与本机发射行为存在关联，具体为将各节点的接收变化特征数据与对应时间窗口内的发射工作参数进行关联比对，当异常频段与发射频率存在重叠关系，且接收变化程度与发射功率或占空比变化具有同步性时，生成计划一致性证据数据；

[0084] 在本实施方式中，所述计划一致性证据数据可通过异常频段与发射频率重叠比例、接收变化量与发射功率变化之间的同步相关程度以及接收变化量与占空比变化之间的同步相关程度联合构建，优选采用几何耦合形式得到计划一致性证据得分：

[0085] $$E_p = \sqrt[3]{R_f \cdot R_p \cdot R_d};$$

[0086] 式中，E_p是计划一致性证据得分，R_f是异常频段与发射频率的重叠比例，R_p是接收变化量与发射功率变化的同步相关程度，R_d是接收变化量与占空比变化的同步相关程度；

[0087] 所述接收变化量与发射功率变化之间的同步相关程度，以及与占空比变化之间的同步相关程度，优选通过滑动时间窗口内的归一化互相关函数计算获得，并取最大相关值作为同步性指标；

[0088] 采用上述形式，可使异常频段重叠、功率同步及占空比同步三项证据对计划一致性形成共同约束，当其中任一项证据较弱时，整体得分将被抑制，从而避免仅凭单项证据偏高而误判为本机互扰来源；当节点处于静默接收模式、测试待机模式或当前时间窗口内未执行有效发射任务时，可对所述计划一致性证据得分执行抑制处理，以避免无效发射计划对本机互扰归因造成误导；

[0089] 步骤S24：空间一致性分析，用于判定异常变化是否在多个节点之间具有一致趋势，具体为对多个节点的接收变化程度进行一致性比对，当多个节点在同一时间窗口内呈

现同步上升或同步下降趋势时,生成空间一致性证据数据;

[0090] 在本实施方式中,所述空间一致性证据数据优选根据节点之间接收变化序列的两两相关程度构建,具体可按下式计算空间一致性证据得分:

[0091] $$E_s = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i<j} \rho_{ij};$$

[0092] 式中,E_s是空间一致性证据得分,ρ_{ij}是第i个节点与第j个节点在当前时间窗口内接收变化序列的相关程度,j是第二节点索引,N是参与一致性分析的节点数量;在一种实施方式中,ρ_{ij}可采用皮尔逊相关系数计算;在节点方向性差异较大时,也可结合节点安装方位和方向接收增益差异引入方向补偿因子,以减小节点朝向差异对外部异常扰动整体一致性识别的影响;进一步地,可分别计算相邻节点局部一致性和全部节点全局一致性,当局部一致性高而全局一致性不足时,可判为局部空间覆盖扰动;当多个不同方位节点同时呈现较高一致性时,则更倾向于外部异常辐射来源;

[0093] 步骤S25:健康一致性分析,用于判定异常变化是否由节点自身运行异常引起,具体为对节点本振锁定状态、接收链路限幅状态、溢出状态以及温度、电流及通信链路质量状态进行综合判断,当异常变化集中于运行状态异常的节点时,生成健康一致性证据数据;

[0094] 在本实施方式中,所述健康一致性分析优选采用分级健康异常规则进行处理,其中,本振失锁状态优先作为高优先级健康异常标志;当接收链路限幅状态、溢出状态与温度异常或电流异常同时出现时,提高节点自异常判定权重;当异常变化仅持续集中出现在单节点,且该节点连续多个时间窗口存在健康状态异常时,优先生成节点运行异常来源候选标志;当多个节点的健康状态均处于正常范围内时,则对健康一致性证据进行削弱处理,以突出环境来源扰动的判定可信度;

[0095] 步骤S26:多证据归因判定,用于根据计划一致性证据数据、空间一致性证据数据及健康一致性证据数据对扰动来源进行分类,具体为按照预设权重对计划一致性证据数据、空间一致性证据数据和健康一致性证据数据进行综合比较,当空间一致性证据占优且计划一致性证据较低时,判定为外部异常辐射来源;当计划一致性证据占优时,判定为本机互扰来源;当健康一致性证据占优且异常集中于单节点时,判定为节点运行异常来源;并生成扰动来源类型数据;

[0096] 在本实施方式中,所述多证据归因判定优选采用优势证据比值型归因方式进行处理,分别构建外部异常辐射来源、本机互扰来源以及节点运行异常来源的主导度指标,具体为:

[0097] $$G_{ext} = \frac{E_s}{1 + E_p + E_h}$$

$$G_{self} = \frac{E_p}{1 + E_s + E_h};$$

$$G_{fault} = \frac{E_h}{1 + E_p + E_s}$$

[0098] 式中,G_{ext}是外部异常辐射来源主导度,G_{self}是本机互扰来源主导度,G_{fault}是节点运行异常来源主导度,E_p是计划一致性证据得分,E_s是空间一致性证据得分,E_h是健康一致

性证据得分；

[0099] 所述健康一致性证据得分，优选通过对各类设备运行状态异常进行综合归纳得到，具体为依据本振锁定状态、接收链路限幅或溢出触发情况、温度电流运行状态以及通信链路质量状态，对各类异常进行统一表征；当对应状态处于正常范围内时，记为低异常程度，当出现异常或接近预设安全阈值时，记为中或高异常程度；

[0100] 进一步地，所述健康一致性证据数据优选根据多类异常在同一时间窗口内的叠加情况及其在节点间的分布特征进行确定：当单一异常偶发出现时，仅作为弱健康异常证据；当多类异常同时出现或同一异常在连续多个时间窗口内持续存在时，提高健康异常证据强度；当异常主要集中于单一节点且该节点运行状态持续偏离正常范围时，判定该节点具备显著健康异常特征；

[0101] 采用上述形式，可直接表征某一类证据相对于其余证据的占优程度；当空间一致性证据相对于计划一致性证据和健康一致性证据明显占优时，G_{ext}增大，对应判定为外部异常辐射来源；当计划一致性证据占优时，G_{self}增大，对应判定为本机互扰来源；当健康一致性证据占优且异常集中于单节点时，G_{fault}增大，对应判定为节点运行异常来源；

[0102] 最终，将主导度最大的来源类型确定为当前异常扰动的来源类型；在最大主导度与次大主导度之差小于预设差值阈值时，可将当前窗口标记为归因不确定状态，并在后续时间窗口内继续累积证据后再执行最终判定；

[0103] 步骤S27：扰动频段分布生成，用于明确异常扰动主要集中频段，具体为对各节点接收变化频段进行汇总处理，生成扰动频段分布数据并汇总为电磁环境扰动判定数据；

[0104] 优选地，对各节点识别出的异常频段区间进行合并处理，并根据频段出现次数、平均异常强度和持续窗口数量计算频段优先级；对于连续多个时间窗口重复出现的异常频段，可标记为稳定受扰频段；对于仅单次短时出现且强度较低的离散频点，可执行抑制处理，以降低偶发噪声频点对后续控制决策的影响。所述扰动频段分布数据可进一步包括扰动频段起止范围、中心频率、频段宽度、占用率、异常强度均值及持续时间等级，用于为后续节点观测异常修正及抗扰动控制参数生成提供频段级输入依据；

[0105] 所述电磁环境扰动判定数据，具体包括：扰动存在标志数据、扰动强度等级数据、扰动来源类型数据和扰动频段分布数据；其中，所述扰动存在标志数据，用于表征当前是否存在异常电磁扰动；所述扰动强度等级数据，用于表征扰动强度的分级结果；所述扰动来源类型数据，用于区分外部压制扰动、本机设备互扰或节点异常扰动；所述扰动频段分布数据，用于表征扰动主要集中频段。

[0106] 通过执行上述操作，针对在已有的分布式电子对抗节点运行状态管理方法中，存在着各节点本地时间漂移及运行状态偏差导致观测数据不可直接比较，进而影响扰动识别准确性的问题，本方案创造性地采用分布式电子对抗节点同步方法，通过机载统一时间源对各节点时间进行对齐，并对节点本振锁定状态、发射工作参数、接收链路状态及运行健康状态进行一致性校核，生成分布式节点运行状态对齐数据，实现各节点观测及运行状态的同周期一致化管理；

[0107] 具体而言，例如机体两侧电子对抗节点由于本地时钟漂移存在微秒级时间偏差，当外部压制信号瞬时出现时，部分节点记录的扰动时间早于或晚于其他节点，传统方法可能误判为局部节点异常；而本方案通过统一时间同步及状态一致性校核，使各节点在同一

时间基准下记录接收变化情况,使扰动识别建立在一致的时间基础上,从而提高电磁环境扰动判定结果的可靠性。

[0108] 实施例四,参阅图1、图3,该实施例基于上述实施例,在步骤S3中,所述节点观测异常修正,用于消除强干扰或链路异常对接收观测结果造成的失真影响,提高观测数据的真实性与稳定性,具体为基于所述电磁环境扰动判定数据,对存在异常扰动的节点接收数据进行状态关联分析,结合节点增益状态信息及信号限幅状态信息,对受影响观测结果进行修正处理,得到节点有效观测数据;

[0109] 所述节点观测异常修正,采用观测可逆修正改进方法,包括以下步骤:

[0110] 步骤S31:异常观测定位,用于识别受增益压缩、限幅或溢出影响的观测样本,具体为在统一时间窗口内,读取节点接收增益状态信息、限幅触发标志及溢出标志,对存在限幅或溢出的时间段进行标记处理,得到受影响观测区间数据;

[0111] 在本实施方式中,所述统一时间窗口优选设置为2ms～20ms,在高动态电子对抗场景下优选为5ms;当限幅触发标志在连续不少于两个采样周期内出现时,将对应样本段标记为限幅受影响区间;当溢出标志出现时,将对应样本段直接标记为高风险失真区间;当接收增益档位在相邻时间窗口之间的变化超过预设档位阈值时,将档位切换前后预设长度的过渡样本段标记为增益不稳定区间;

[0112] 进一步地,所述受影响观测区间数据优选包括异常区间起始时刻、终止时刻、持续时长、异常类型标识以及对应频段范围,以便后续分类型执行增益反演和限幅补偿处理;

[0113] 步骤S32:增益反演处理,用于消除接收链路增益对观测功率的影响,具体为根据节点当前接收增益档位对应的预设增益标定值,对观测接收功率数据进行反向换算,得到等效输入功率数据;

[0114] 在本实施方式中,所述等效输入功率优选计算公式:

[0115] $$P_{in}(t) = P_{obs}(t) - G_{rx}(t);$$

[0116] 式中,$P_{in}(t)$是时刻t的等效输入功率,$P_{obs}(t)$是时刻t的观测接收功率,$G_{rx}(t)$是时刻t对应接收增益档位的增益标定值;

[0117] 在一种优选实施方式中,所述接收增益档位可设置为8档或16档,每一档对应预先标定的增益值,档间标定误差优选控制在±0.5dB以内;所述增益标定值可来源于设备出厂标定表或在机自校准表。当节点温度超过预设温漂阈值时,还可对所述增益标定值叠加温度修正项,以提高高温工况下的反演精度;对于处于增益切换瞬态区间的样本,可将其标记为过渡候选样本,并降低其后续可信度等级,以避免档位抖动引起的反演误差传播;

[0118] 步骤S33:限幅补偿处理,用于对发生限幅的观测结果进行可逆修正,具体为在同一时间窗口内选取未发生限幅的参考观测样本,计算参考功率统计值,并依据参考功率统计值与限幅观测功率之间的比例关系确定恢复因子,对限幅观测数据进行补偿修正,得到修正后接收功率数据;

[0119] 在本实施方式中,为体现观测可逆修正过程,所述修正后接收功率可优选通过下式确定:

[0120] $$P_{rec}(t) = P_{clip}(t) + \eta \cdot \left(\overline{P}_{ref} - P_{clip}(t)\right);$$

[0121] 式中,$P_{rec}(t)$是时刻t的修正后接收功率,$P_{clip}(t)$是时刻t的限幅观测功率,$\overline{P}_{ref}$是

同一时间窗口内未发生限幅的参考观测样本统计功率值，η是恢复因子；

[0122] 优选地，所述恢复因子η可依据限幅持续时间比例、增益稳定程度及跨节点同频段观测一致性联合确定，取值范围优选为0.4～0.9；当限幅持续时间较短、增益档位稳定且邻近节点在对应频段内观测趋势一致时，提高恢复因子；当限幅持续时间较长、链路状态波动明显或跨节点一致性较低时，降低恢复因子；

[0123] 进一步地，所述参考观测样本优选选取同节点前后相邻未限幅样本，并可结合邻近节点在同一频段的观测值构造补充参考集；所述参考功率统计值优选采用中位数、截尾均值或分位均值中的至少一种计算，以抑制异常尖峰值对恢复结果的影响。对于同时出现溢出和限幅的观测区间，可仅输出低可信修正值，或在持续时间超过预设上限时直接标记为不可完全恢复区间；

[0124] 步骤S34：频谱占用修正，用于恢复因增益压缩或限幅导致的频谱能量失真，具体为对各频点观测能量进行增益反演及限幅补偿处理，并依据预设频谱判定门限重新生成频段占用标识，得到修正后频谱占用数据；

[0125] 在本实施方式中，优选先对每一频点的观测能量执行步骤S32中的增益反演处理，再对落入限幅受影响区间的频点能量执行步骤S33中的限幅补偿处理，得到修正后的频点能量分布；随后将修正后的频点能量与频谱判定门限进行比较，对超过门限的频点生成占用标识，并对连续不少于预设数量的占用频点进行合并，形成修正后频段占用区间；

[0126] 所述频谱判定门限可依据当前噪声底估计值自适应生成，优选采用噪声底加6dB的方式确定；对于仅单个频点短时超门限的离散占用现象，可执行孤立频点抑制，以降低随机噪声或瞬态尖峰对频谱占用结果的影响；

[0127] 步骤S35：可信度评估，用于评估修正后观测结果的可靠程度，具体为根据限幅触发情况、增益变化幅度、节点链路质量状态以及跨节点观测一致性情况，生成观测可信度等级数据；

[0128] 在本实施方式中，所述观测可信度评分优选采用乘性可信度模型进行计算：

[0129] $$C_{obs} = \sqrt[4]{(1 - r_{clip})(1 - \Delta g) q_{link} \rho_{cross}}$$；

[0130] 式中，C_{obs}是观测可信度评分，r_{clip}当前时间窗口内限幅样本占比，Δg是归一化后的增益变化幅度，q_{link}是链路质量评分，ρ_{cross}是跨节点观测一致性指标；

[0131] 所述跨节点观测一致性指标，优选通过当前节点与邻近节点在同频段内接收变化序列的平均相关系数计算获得；所述链路质量评分，则优选依据通信误码率、丢包率及链路时延抖动构建分级评分表进行量化；

[0132] 采用上述形式，可使限幅比例、增益稳定性、链路质量及跨节点一致性对观测可信度形成联合约束；当任一项指标显著降低时，整体可信度评分将同步下降，从而更符合异常观测修正后的可靠性评估需求；

[0133] 进一步地，可根据可信度评分对修正结果划分为高可信、中可信和低可信三级；例如，当$C_{obs} \geq 0.80$时标记为高可信，当$0.55 \leq C_{obs} < 0.80$时标记为中可信，当$C_{obs} < 0.55$时标记为低可信；

[0134] 在部分实施方式中，也可采用轻量级多层感知机模型对限幅比例、增益变化幅度、

链路质量评分及跨节点一致性指标进行非线性融合,所述多层感知机优选为两层全连接结构,隐藏层神经元数量优选为16或32,用于进一步提高复杂失真场景下的可信度评估稳定性;但在一般实施场景中,优选采用上述加权评分方式,以兼顾可解释性和工程可实现性;

[0135] 步骤S36:有效区间生成,用于确定可用于后续控制决策的观测时间段及频段范围,具体为根据溢出标志、持续限幅时间比例及观测可信度等级,对低可信时间段或频段进行剔除处理,生成观测有效区间数据;

[0136] 在本实施方式中,当观测可信度等级为高可信时,可将对应时间段或频段直接纳入有效区间;当观测可信度等级为中可信时,可进一步结合扰动来源类型及跨节点同频段一致性决定是否保留;当观测可信度等级为低可信,或者对应时间窗口内存在持续溢出状态时,则将其从后续控制决策输入中剔除;优选地,当持续限幅时间比例超过60%时,将对应时间窗口标记为低可用区间;当可信度评分低于0.55时,剔除对应观测结果;对于频段级结果,可仅保留连续宽度超过最小有效带宽阈值的区间,并对相邻窄带区间执行合并处理,以提高后续控制参数生成时的频段稳定性;

[0137] 所述节点有效观测数据,具体包括修正后接收功率数据、修正后频谱占用数据、观测可信度等级数据和观测有效区间数据;其中,所述修正后接收功率数据,用于表征消除增益压缩影响后的接收信号强度;所述修正后频谱占用数据,用于表征校正后的频段能量分布情况;所述观测可信度等级数据,用于表征当前观测数据的可靠程度;所述观测有效区间数据,用于表征可用于控制决策的有效频段或时间段。

[0138] 通过执行上述操作,针对在已有的电子对抗节点接收观测数据处理方法中,存在着在强干扰条件下接收链路增益压缩、限幅或溢出导致观测功率数据失真,从而使抗扰动控制决策依据不准确的问题,本方案创造性地采用观测可逆修正改进方法,通过异常观测定位、增益反演处理、限幅补偿处理、频谱占用修正及可信度评估,生成节点有效观测数据,实现对受干扰失真观测结果的恢复及有效区间筛选;

[0139] 具体而言,例如当电子对抗节点接收到强压制干扰信号时,接收链路触发限幅保护,导致测得接收功率维持在固定上限值,传统方法无法判断实际干扰强度变化趋势,而本方案通过对接收增益状态及限幅状态进行反演及补偿处理,恢复等效输入功率变化趋势,并通过可信度评估筛除不可靠区间,使抗扰动控制参数生成建立在真实观测基础上,提高抗扰动控制的适应性。

[0140] 实施例五,参阅图1、图4,该实施例基于上述实施例,在步骤S4中,所述抗扰动控制参数生成,用于根据当前有效观测结果及各节点运行状态生成适配的抗扰动控制参数,保证各节点在满足运行约束条件下实施协同抗扰动动作,具体为基于所述节点有效观测数据,结合各电子对抗节点当前工作模式与设备运行边界条件,对发射功率、发射频率、波形参数及工作时序进行计算生成,得到节点抗扰动控制参数数据;

[0141] 所述抗扰动控制参数生成采用一种协同控制参数生成改进方法,其特征在于包括以下步骤:

[0142] 步骤S41:可用观测筛选,用于在生成控制参数前筛除低可信观测数据并确定各节点参与协同的权重,具体为根据节点有效观测数据中的观测可信度等级数据及观测有效区间数据,筛选可用于控制决策的观测信息,同时结合各节点本振锁定状态数据、节点运行健康状态数据及通信链路质量状态数据,生成节点参与协同的权重数据;

[0143] 在本实施方式中,当节点观测可信度评分低于预设可信门限时,可直接将对应节点排除出协同候选节点集合;当节点本振处于失锁状态时,将其本振锁定状态评分降为最低等级;当通信链路质量低于预设门限时,仅允许该节点参与本地降级控制而不参与全局协同控制;

[0144] 步骤S42:控制可行域构建,用于限定各节点在设备运行边界条件下可执行的控制参数范围,具体为依据各节点当前工作模式、功率上限、频段许可范围、波形配置范围以及收发时隙约束条件,构建发射功率、发射频率、波形参数及工作时序的可行参数集合;

[0145] 本实施方式中,所述控制可行域优选根据不同节点工作模式进行分层构建;当节点处于高功率压制模式时,开放较高发射功率区间并限制接收保护时隙;当节点处于侦收兼容模式时,对发射占空比上限和连续发射时长进行限制,以保留必要的侦收窗口;当节点温度接近安全阈值或电流裕量不足时,动态下调其功率上限。进一步地,所述频段许可范围除受硬件频率合成能力限制外,还可受任务禁用频段、友邻系统保护频段及已判定主要受扰频段的避让约束共同限定;所述波形配置范围可包括调制方式、脉冲宽度、带宽、重复周期及编码方式中的至少一种;所述收发时隙约束条件可包括本机接收保护窗口、预定协同任务窗口及总线下发控制指令的同步生效时间要求。通过上述处理,形成各节点对应的发射功率、发射频率、波形参数及工作时序的可行参数集合;

[0146] 步骤S43:候选参数组合生成,用于在所述可行参数集合内生成满足抗扰需求的候选控制组合,具体为根据主要受扰频段信息及可用观测结果,在各节点可行参数集合中选择避开受扰频段且满足运行约束的候选发射功率、频率、波形及工作时序组合,并生成候选控制参数集合;

[0147] 在本实施方式中,为提高候选控制组合对当前干扰环境的适配性,优选采用效费比形式对每一个节点的候选参数组合进行优选,具体可表示为:

[0148] $$J_{i,m}=\frac{A_{anti}(i,m)\cdot S_{safe}(i,m)\cdot M_{match}(i,m)\cdot C_{obs}(i,m)}{1+C_{cost}(i,m)};$$

[0149] 式中,$J_{i,m}$是第i个节点的第m个候选控制组合的综合优选指标,$A_{anti}(i,m)$是抗扰有效性指标,$S_{safe}(i,m)$是运行安全性指标,$M_{match}(i,m)$是与当前任务模式的匹配度指标,$C_{obs}(i,m)$是第i个节点的第m个候选控制组合的观测可信度评分,$C_{cost}(i,m)$是控制切换代价;

[0150] 所述各特征量在参与后续计算前优选执行归一化处理,其中接收功率变化量及增益变化幅度可基于历史统计范围进行线性归一化;

[0151] 采用上述形式,可使抗扰收益、运行安全性及模式匹配度共同提升候选组合优先级,同时通过分母项抑制切换代价过高的控制组合,从而使所生成的候选控制参数集合既具备较好的抗扰能力,又避免因频率跨度过大、波形调整过频或时隙扰动过强而影响系统稳定执行;

[0152] 在本实施方式中,所述抗扰有效性指标优选根据候选频率与主要受扰频段的最小距离、波形对干扰类型的规避能力以及有效观测覆盖比例综合确定;所述运行安全性指标优选依据节点当前发射功率占额定上限比例、温度裕量及电流裕量构建;所述任务匹配度指标优选根据候选控制组合与当前任务模式在波形类型、时序结构及频率规划上的匹配程

度进行离散评分;所述控制切换代价优选依据频率切换跨度、波形切换复杂度及对既有时隙安排的扰动程度进行归一化计算;

[0153] 进一步地,上述各指标均优选归一化至[0,1]区间,以保证效费比计算结果具备可比性与稳定性;

[0154] 进一步地,在部分实施方式中,可通过离散枚举结合启发式贪婪筛选的方式生成前若干个综合优选指标最高的候选控制组合,并将其作为候选控制参数集合;当候选组合数量过多时,可仅保留综合优选指标位于前30%或前20%的组合进入下一步一致性判定;

[0155] 步骤S44:多节点一致性判定,用于确定是否需要多节点协同执行以及协同节点范围,具体为根据节点权重数据及候选控制参数组合之间的冲突关系,对各节点候选组合进行一致性比对,当候选组合满足预设一致性条件时生成协同节点集合,当存在冲突时按照节点权重进行优先级筛选或缩减协同范围,生成协同控制标识数据;

[0156] 在本实施方式中,为定量描述多节点候选组合之间的协同冲突程度,优选构建节点间冲突代价函数:

[0157] $$D_{ij} = 1 - (1 - R_{freq}(i,j))(1 - R_{slot}(i,j))(1 - R_{wave}(i,j));$$

[0158] 其中,D_{ij}是节点i与节点j的候选控制组合之间的冲突代价,$R_{freq}(i,j)$是频率冲突程度,$R_{slot}(i,j)$是工作时隙冲突程度,$R_{wave}(i,j)$是波形不兼容程度;

[0159] 采用上述形式,可在频率冲突、时隙冲突及波形不兼容同时出现时放大整体冲突程度;当三者中任一项显著升高时,也可明显推高总冲突值,更适合表征多节点协同控制中的并发约束特征;

[0160] 当D_{ij}不超过预设冲突阈值时,可认为对应候选组合满足协同一致性条件;进一步地,当多个节点候选组合之间存在冲突时,优选首先保留节点参与协同权重较高的节点;若高权重节点之间仍存在冲突,则进一步比较其候选组合综合优选指标,优先保留抗扰收益更高且运行安全性更好的组合;当冲突在当前轮次内无法完全消解时,可缩减协同范围,仅保留局部协同节点集合,并将未纳入协同集合的节点转入单节点独立抗扰控制模式;

[0161] 所述协同控制标识数据优选包括:是否启用多节点协同、协同节点编号集合、节点主从角色标识或平权协同标识、生效时间及协同持续窗口长度,用于后续控制参数的统一下发与执行校核;

[0162] 步骤S45:控制参数封装输出,用于形成可直接下发执行的控制参数数据,具体为根据最终确定的控制参数组合,生成节点抗扰动控制参数数据;

[0163] 在本实施方式中,所述节点抗扰动控制参数数据优选采用结构化控制指令帧形式封装,每一条控制指令帧可包括参数版本号、节点编号、生效时间、发射功率调整参数、发射频率调整参数、波形参数、工作时序参数及协同控制标识字段;在需要支持异常回退的实施场景中,还可附加失效时间字段、回滚标识字段或候选备用参数编号字段;

[0164] 进一步地,所述发射功率调整参数数据可包括目标功率值、功率调整步长及最大允许持续时间;所述发射频率调整参数数据可包括目标频点、跳频区间、频率切换序列或禁用频段避让信息;所述波形参数调整数据可包括调制方式、脉冲宽度、带宽和脉冲重复周期中的至少一种;所述工作时序调整数据可包括发射时隙起止时间、接收保护窗口及协同生效时刻。通过上述封装处理,形成可由主控单元直接下发至各电子对抗节点执行的节点抗

扰动控制参数数据；

[0165] 所述节点抗扰动控制参数数据，具体包括：发射功率调整参数数据、发射频率调整参数数据、波形参数调整数据、工作时序调整数据和协同控制标识数据；其中，所述发射功率调整参数数据，用于控制发射功率增减幅度；所述发射频率调整参数数据，用于控制频点切换或跳频范围；所述波形参数调整数据，用于控制调制方式或脉冲宽度；所述工作时序调整数据，用于控制发射与接收的时隙分配；所述协同控制标识数据，用于表征该控制参数是否需要多节点协同执行。

[0166] 通过执行上述操作，针对在已有的电子对抗系统抗扰动控制执行方法中，存在着控制参数下发后缺乏执行状态一致性校核及抗扰动效果反馈机制，导致控制执行偏差无法及时发现及修正的问题，本方案创造性地采用环境抗扰动控制方法，通过控制参数下发、执行确认、实际执行参数反馈比对及抗扰动效果变化分析，生成节点抗扰动执行状态数据，实现抗扰动控制执行状态的闭环校核与效果评估；

[0167] 具体而言，例如在多节点协同跳频抗干扰过程中，某一节点由于硬件执行延迟未能按预定时间完成频率切换，传统方法无法及时发现该节点执行异常，而本方案通过执行参数反馈比对及一致性校核，能够识别频率执行偏差并生成执行异常标志，同时通过执行后电磁环境变化情况分析判断抗扰动效果，从而实现抗扰动控制的闭环优化，提高系统整体抗干扰能力及协同作战可靠性。

[0168] 实施例六，参阅图1和图2，该实施例基于上述实施例，在步骤S5中，所述环境抗扰动控制，用于控制各电子对抗节点执行抗扰动控制参数，并校核各节点执行结果的一致性及抗扰动效果，具体为将所述节点抗扰动控制参数数据下发至对应节点执行，并对执行后的节点运行状态及接收信号变化情况进行回采与一致性校核，得到节点抗扰动执行状态数据；

[0169] 所述节点抗扰动执行状态数据，具体包括：实际执行参数反馈数据、执行一致性校核结果数据、抗扰动效果变化数据和执行异常标志数据；其中，所述实际执行参数反馈数据，用于表征节点执行后的实际发射参数；所述执行一致性校核结果数据，用于表征各节点之间是否存在执行偏差；所述抗扰动效果变化数据，用于表征控制执行后电磁环境变化情况；所述执行异常标志数据，用于表征是否存在参数未生效或执行失败情况；

[0170] 在本实施例中，所述环境抗扰动控制通过控制参数下发、执行确认、状态回采及一致性校核形成闭环控制流程；主控单元将步骤S4生成的节点抗扰动控制参数数据封装为控制指令帧并发送至各电子对抗节点，所述控制指令帧包括参数版本号、生效时间、发射功率调整参数、发射频率调整参数、波形参数、工作时序参数及协同控制标识等字段；

[0171] 各节点在接收到控制指令帧后，按照生效时间执行参数调整，并向主控单元返回执行确认信息；当节点在预设时间窗口内未返回确认信息时，主控单元生成执行异常标志数据；

[0172] 在控制参数执行完成后，各电子对抗节点自动读取当前实际发射功率、实际发射频率、实际波形配置状态及当前工作时序状态，并将所述信息作为实际执行参数反馈数据上传至主控单元；

[0173] 主控单元将实际执行参数反馈数据与原下发控制参数进行比对，当二者之间的差值超过预设容差范围时，生成执行异常标志数据，并记录异常类型；当处于协同控制模式

时,主控单元进一步对各节点执行参数之间的一致性进行校核,若存在发射频率不一致、工作时隙冲突或波形配置不匹配等情况,则生成执行一致性校核结果数据;

[0174] 在完成执行一致性校核后,主控单元在下一观测周期内采集各节点的修正后接收功率数据及修正后频谱占用数据,并与执行前的观测数据进行对比;当扰动强度等级降低或受扰频段占用率下降时,生成抗扰动效果变化数据;当未观察到明显改善或出现异常升高时,生成效果异常标志,并触发控制参数重新生成或进入降级运行模式;

[0175] 通过上述处理,最终形成节点抗扰动执行状态数据,所述节点抗扰动执行状态数据具体包括实际执行参数反馈数据、执行一致性校核结果数据、抗扰动效果变化数据以及执行异常标志数据,从而实现对抗扰动控制过程的可执行、可校核及可追溯管理。

[0176] 需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。

[0177] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型。

[0178] 以上对本发明及其实施方式进行了描述,这种描述没有限制性,附图中所示的也只是本发明的实施方式之一,实际的结构并不局限于此。总而言之如果本领域的普通技术人员受其启示,在不脱离本发明创造宗旨的情况下,不经创造性的设计出与该技术方案相似的结构方式及实施例,均应属于本发明的保护范围。

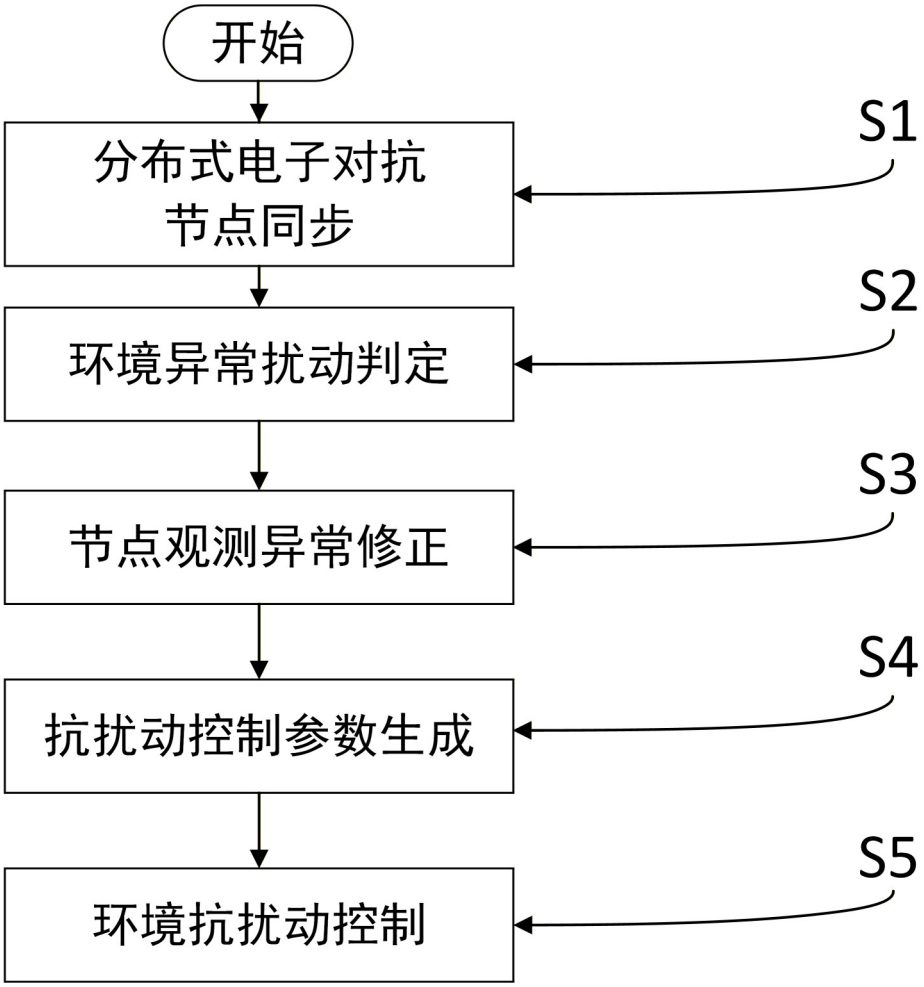

开始
分布式电子对抗节点同步
S1
环境异常扰动判定
S2
节点观测异常修正
S3
抗扰动控制参数生成
S4
环境抗扰动控制
S5

图1

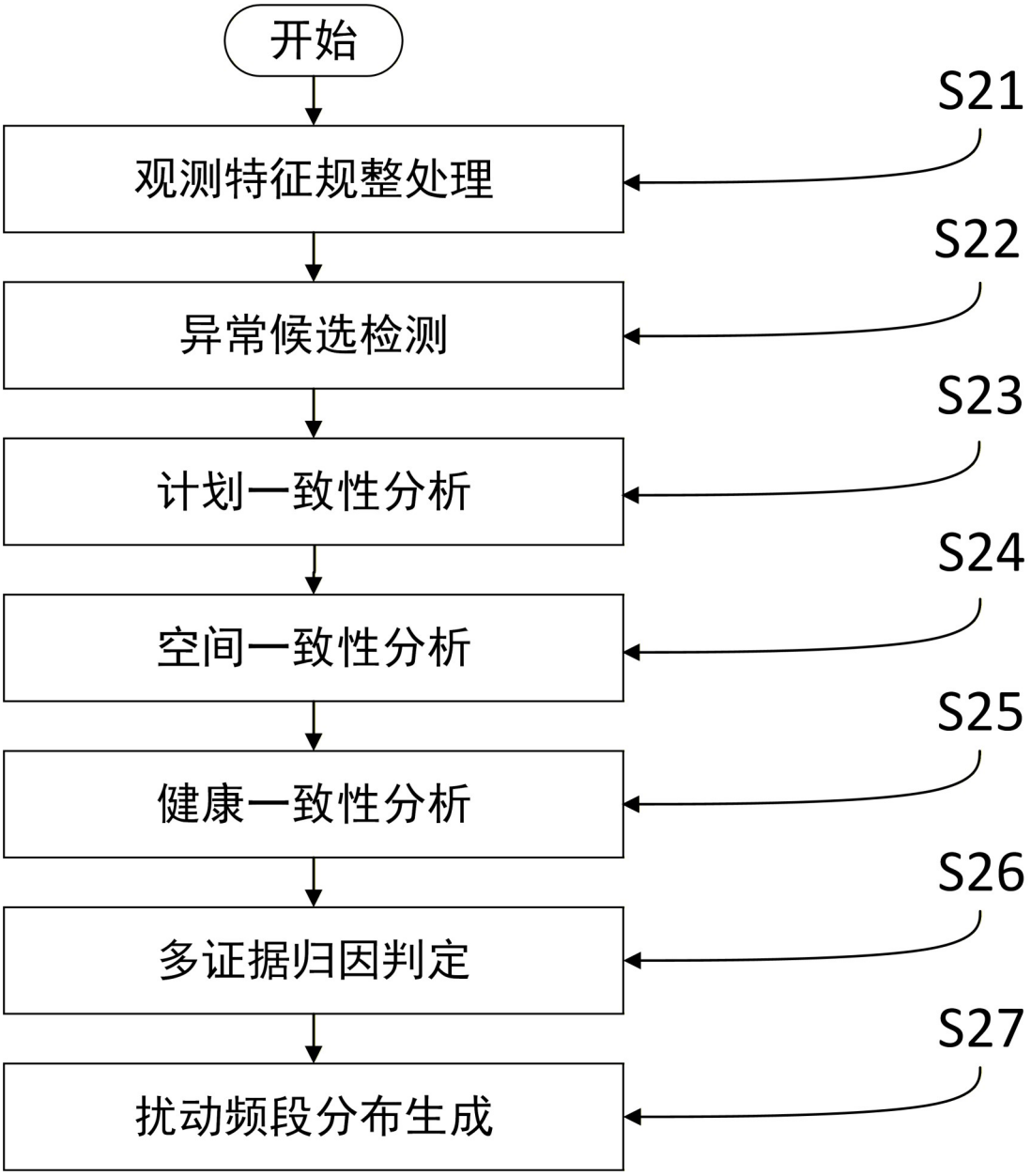

开始
观测特征规整处理
S21
异常候选检测
S22
计划一致性分析
S23
空间一致性分析
S24
健康一致性分析
S25
多证据归因判定
S26
扰动频段分布生成
S27

图2

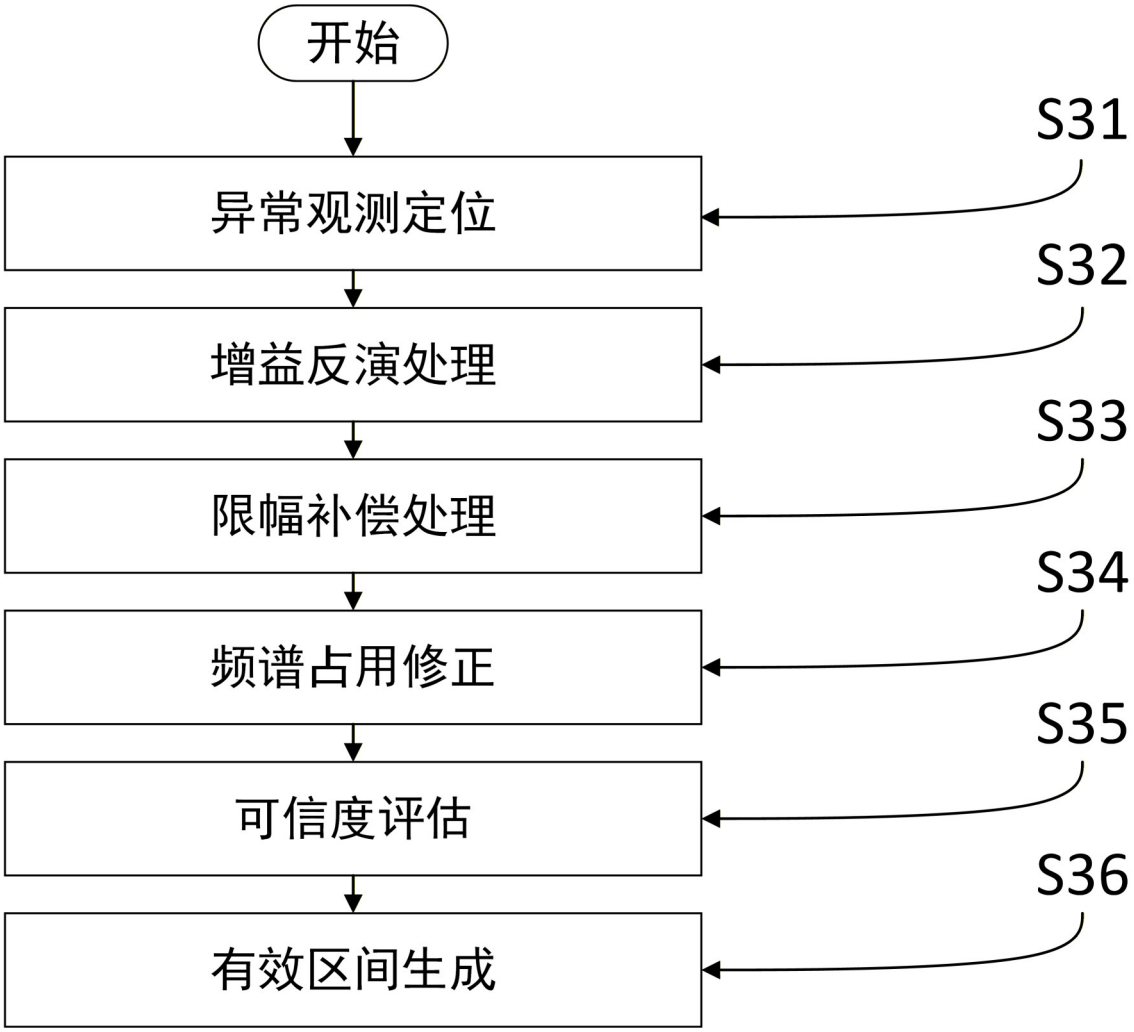

开始
异常观测定位
S31
增益反演处理
S32
限幅补偿处理
S33
频谱占用修正
S34
可信度评估
S35
有效区间生成
S36

图3

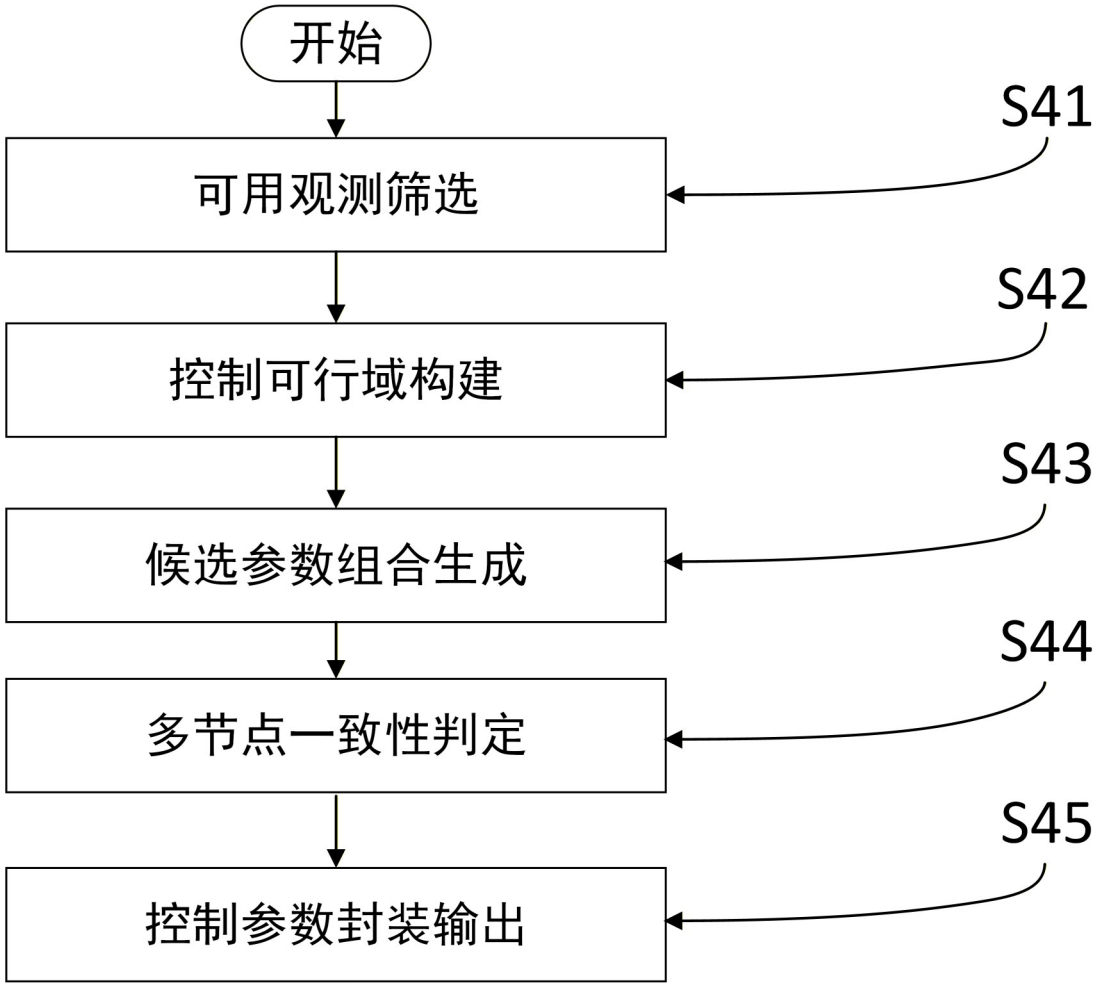

开始
S41
可用观测筛选
S42
控制可行域构建
S43
候选参数组合生成
S44
多节点一致性判定
S45
控制参数封装输出

图4