

复合干扰滤波
(Composite Disturbance Filtering, CDF)

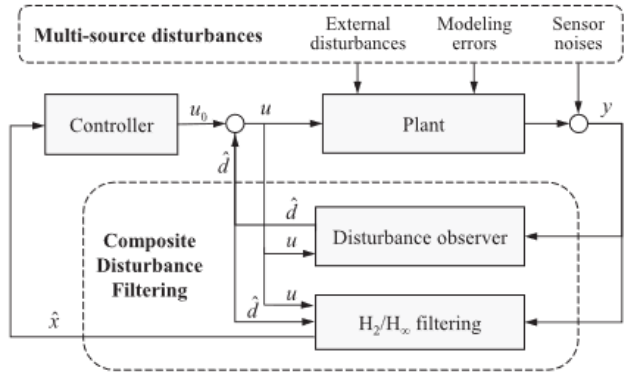
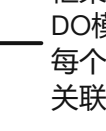
CDF方案

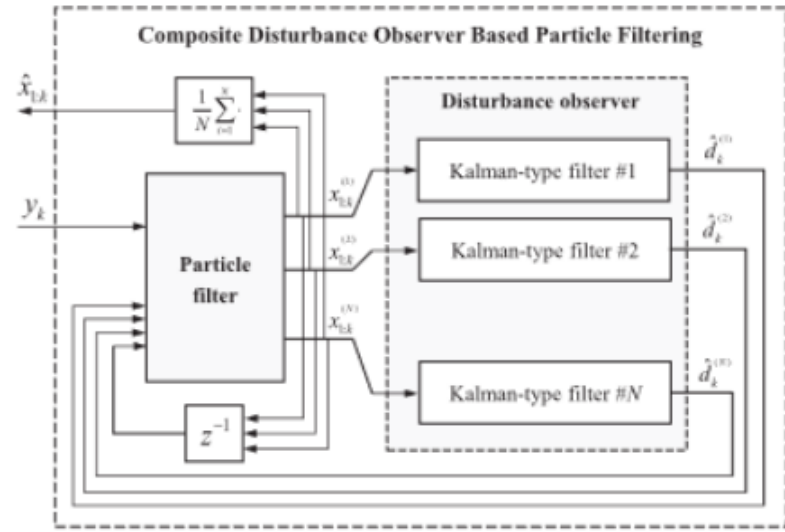
- 同时抑制和衰减异质干扰
- 深度耦合干扰信号的有效分离
- 干扰利用、最佳重建和性能重新设计

多源非均匀干扰的精确量化和可分性分析

- 深度耦合建模
 - 来源于物理模型
 - 内部
 - 外部
 - 建模
 - 输入通道
 - 加性
 - 乘性
 - 隐性
- 精细量化
 - 未知动态信号
 - 抑制：各种DO估计（鲁棒DO、自适应DO、基于学习的DO）；自适应DO适用于缺乏先验时，处理乘性或隐性干扰
 - 量化或衰减估计误差：经典滤波技术
 - L2范数有界变量——衰减：H ∞ 滤波
 - 高斯/非高斯随机变量——衰减：KF类（高斯）、PF和SDF（非高斯随机变量）
- 可分离性分析

复合干扰滤波方案的一般设计框架和典型实现

- 复合DO+鲁棒滤波器
 - 通用情况：未知动态信号、随机扰动和范数有界扰动
 - 实施方案：构造DO实时估计未知动态信号，利用H2/H ∞ 混合优化衰减随机和范数有界干扰
 - 模型：
$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k)) + B\omega_0(k) + B_1\omega_1(k) + B_2\omega_2(k) \\ \omega_0(k+1) = W\omega_0(k) + E_1\omega_1(k) + E_2\omega_2(k) \\ y(k) = Cx(k) + D\omega_0(k) + D_1\omega_1(k) + D_2\omega_2(k) \end{cases} \quad (2)$$
 - 框架图
 - 案例
 - 增强惯导系统初始对准的抗干扰能力：干扰——未知动态干扰（惯性传感器的漂移）、高斯随机噪声（惯性传感器的随机噪声）、范数有界噪声（模型不确定性）；方案——DO估计惯性传感器的漂移、鲁棒H2/H ∞ 滤波器衰减随机干扰与范数有界干扰
 - 分布式状态估计问题：干扰——未知动态信号、范数有界干扰、虚假数据注入攻击；方案——DO估计未知动态信号、H ∞ 滤波器衰减范数有界干扰；检测出发的攻击估计和抑制模块来增强对虚假数据注入攻击的弹性
- 复合DO+KF
 - 通用情况：未知动态信号和高斯随机噪声
 - 实施方案：DO用于估计未知动态信号，KF用于量化和优化误差统计
 - 案例
 - 捷联INSs的快速初始对准：KF用于估计水平失准角，DO用于估计方位角失准角，以KF的稳态输出（状态估计）用作输入（生成控制信号）
 - 测量噪声服从斜t分布：结合变分贝叶斯斜t滤波器的DO，处理斜t噪声的加性未知动态信号和隐性统计参数的联合影响
 - 机器人操作器的接触力估计：基于复合DO+学习的KF方案（高斯过程回归和变分贝叶斯推理技术进行统计参数学习），分离机械手模型和力生成模型中的不确定性
- 复合DO+随机滤波器
 - 通用情况：未知动态信号和非高斯噪声
 - 实施方案：DO用于估计未知动态信号，非高斯滤波用于衰减非高斯噪声
- 复合DO+非高斯滤波
 - 通用情况：未知动态信号和非高斯噪声
 - 实施方案：DO用于估计未知动态信号，非高斯滤波用于衰减非高斯噪声
- 案例
 - 贝叶斯递归公式：可分离非高斯噪声，用于随即滤波问题，但需假设噪声独立同分布
 - 故障检测问题：根据8样条神经网络的动态权重近似非高斯pdf；复合DO+H ∞ 滤波器进行故障信号的有效分离、同时抑制未知动态信号和衰减范数有界干扰
 - 复合DO+SDF方案：通过DO估计未知动态信号，使用模糊基函数和相关权重来近似非高斯PDF可直接跟踪状态变量和输出变量的联合PDF，不要求噪声独立同分布
 - 具有未知噪声PDF的非高斯系统：基于信息论学习的CDF方法
 - 复合DO加最小熵滤波：未知动态信号由DO估计，非高斯噪声的影响基于最小熵原理衰减
 - 复合DO+PF：针对粒子简并问题。未知动态信号的估计值在状态转移方程中构造补偿项，校正由不精确的状态转移模型引起的样本偏差；
框架图
 - 复合变分贝叶斯自适应KF（VBAPF）加PF：未知动态信号的自适应估计和噪声统计的在线识别
 - 复合DO加变分贝叶斯自适应PF方法：增强对异常值的鲁棒性，变分贝叶斯方法用于估计重尾测量噪声的统计参数
 - 复合学生t DO加PF方案：针对未知动态信号的不准确动态信息，学生t滤波器用于跟踪模型不准确引起的重尾后验分布



验证与应用

- 惯导系统的初始对准：复合DO+H2/H ∞ 滤波器
 - 干扰
 - 惯性传感器偏差（未知动态信号）
 - 建模误差（L2范数有界）
 - 方案：复合DO+H2/H ∞ 滤波方法
 - DO——补偿惯性传感器偏差
 - 多目标H2/H ∞ 优化技术——衰减范数有界干扰
 - 衰减程度的评估指标 $\gamma_{att} = \frac{\int \|e_{\omega}(t)\|_2^2 dt}{\int \|d(t)\|_2^2 dt}$
 - 类似场景：制导炮弹上安装的MEMS陀螺仪的在线校准，干扰为交叉耦合误差、比例因子误差和加速度灵敏度误差
- 旋翼无人机的室内定位：复合DO+KALMAN型滤波器
 - 干扰
 - 气动阻力引起的模型不确定性（未知动态信号）
 - UWB多径效应与非视距传播导致的斜t量测噪声（非高斯噪声）
 - 方案：复合DO+变分贝叶斯斜t滤波（DO+VBSTF）方法
 - DO——补偿UAV动力学中的不确定性
 - 变分贝叶斯斜t滤波器——通过自适应识别统计参数来斜t量测噪声
- 天窗POL辅助综合姿态确定：复合DO+PF
 - 干扰
 - INS传感器偏差
 - POL传感器遮挡导致的重尾POL噪声
 - 同时存在UDS、非高斯噪声和未知噪声统计
 - 方案：复合DO+变分贝叶斯自适应PF（DO+VBAPF）方法
 - 变分贝叶斯过程——在线估计噪声统计
 - DO——估计UDS
 - PF——利用估计的UDS和噪声统计，通过根据更新的信息重建粒子生成机制，吸收来自传感器偏差和遮挡的干扰
- 估计误差的精确量化
 - 忽略误差动力学方程中的扰动项来评估渐近或有限时间收敛性
 - 描述随机或确定性干扰对估计误差的影响
 - 随机干扰：系统的H2范数或估计误差的嫡
 - 确定性干扰：系统的H ∞ 范数刻画估计误差的有界性
 - 同时存在随机和确定性干扰：混合H2/H ∞ 范数（提供精确的误差量化）
 - 其他误差量化方法：Cramér-Rao下界计算（量化滤波器衰减随机干扰的能力）；显著性分析（对估计结果进行事后有效性测试）

总结

- CDF方案
 - 对象——干扰的异质性
 - 优势
 - 精细的状态估计：显式表征、可分性分析和复合“X-DO加Y滤波器”结构
 - “绿色”：降低状态估计过程中的感知和计算成本
 - “免疫”：“免疫”被动拒绝和主动激励的干扰
- 潜在研究方向
 - 丰富“X-DO加Y滤波器”框架——定量分析多源异质干扰的产生、传播、相互作用和影响机制，并为CDF建立一定的精细干扰可分离性结果，尝试与控制结合
 - 在CDF框架内设计风险感知过滤器——针对各种主动/被动干扰的免疫智能，提高传感和计算资源的利用效率
 - 将CDF应用于智能传感器的开发，基于CDF理论进行闭环不确定性量化，以提高系统的容错性和安全性