

针对自适应滤波的组网雷达欺骗干扰优化策略*

王布宏, 黄天奇, 田继伟

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

摘要:针对组网雷达系统在跟踪目标发生机动时采用自适应滤波来估计目标状态的特点,在点迹融合数据处理结构的组网雷达基础上提出了一种欺骗干扰优化策略。根据状态和量测方程描述了组网雷达跟踪目标的模型,同时建立了跟踪机动目标的自适应滤波模型。在此基础上,建立了欺骗干扰模型,并在目标机动检测约束下,推导了虚假目标欺骗干扰对于组网雷达融合中心的自适应滤波估计误差协方差的影响关系式。用误差协方差矩阵的迹来量化欺骗干扰效果,并以此为优化的目标函数。使用矩阵 Schur 补理论把约束条件转换为线性矩阵不等式,将欺骗干扰优化策略转化为求解半定规划凸优化问题。仿真结果验证了所提欺骗干扰优化策略的有效性。

关键词:组网雷达;自适应滤波;状态估计;欺骗干扰

中图分类号:TN974 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)02-088-08

Deception jamming optimization strategy against adaptive filtering for netted radar

WANG Buhong, HUANG Tianqi, TIAN Jiwei

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the fact that the adaptive filtering is used to estimate the target state in the netted radar system when the tracking target is maneuvering, a deception jamming optimization strategy was proposed on the basis of the netted radar with the plot fusion data processing structure. The model of the target tracked by the netted radar was described according to the state and measurement equation, the adaptive filtering model of tracking maneuvering target was established at the same time. Based on all this, a deception jamming model was established, and the influence relationship of false target deception jamming against the adaptive filtering state estimation error covariance of the netted radar fusion center was derived under the constraint of target maneuver detection. The trace of the error covariance matrix was used to quantify the effect of deception jamming and stand for the objective function of optimization. The Schur complement theory of matrix was used to change the constraints to a linear matrix inequality, and a deception jamming optimization strategy was changed in the solution to the convex optimization problem for semidefinite programming. The simulation results verify the effectiveness of the proposed deception jamming optimization strategy.

Keywords: netted radar; adaptive filtering; state estimation; deception jamming

空天非合作目标的多样性、复杂性与作战使用的灵活性,预警探测环境的综合性、快变性与难以预测性,情报保障需求的实时性、连续性与高精度性,给以单雷达探测为主体的预警探测系统提出了严峻的挑战,另外传统雷达所面临的“四大威胁”(电子干扰、隐身目标、反辐射摧毁和低空突防)也促使组网雷达成为现今雷达的发展热点^[1-3]。组网雷达系统是对异地部署的,不同体制、功能、频段、精度和数据率的单一雷达进行实时远程控制和点迹集中融合处理,将指定区域雷达群的多部雷达装备以组网探测模式进行资源整

合,形成一部具有高精度和高数据率的“可编程大雷达”,实现探测效能的综合集成^[4-5]。它可以提高在复杂实战环境中对空中非合作目标的集群探测能力,增强雷达情报的准确性、连续性和时效性,因而组网区域整体抗电子干扰能力显著提升^[6-7]。

因此,如何对组网雷达进行有效的欺骗干扰,成为当今研究的热点问题^[8-10]。文献[11]按照视线法则推导了多架电子战飞机(Electronic Combat Air Vehicles, ECAV)编队飞行的一般运动学模型,提出了把ECAV从给定的任意初始状态

* 收稿日期:2020-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61671465,61902426)

作者简介:王布宏(1975—),男,山西太原人,教授,博士,博士生导师, E-mail:wbhgroup@aliyun.com;

黄天奇(通信作者),男,硕士研究生, E-mail:huang_tq@foxmail.com

转换到欺骗干扰队形的控制方法。文献[12]提出了按照比例导引法生成虚假航迹的方法,并建立了一个新的性能指标来评估虚假航迹的一致性。文献[13]在多站雷达中各雷达站相距不远的条件下,从空间分辨单元的物理含义入手,推导出了多站雷达在一定空间分辨率下,转发式干扰能对其进行有效干扰的条件。文献[14]研究了雷达位置侦测误差和ECAV预设位置误差对欺骗干扰的影响,提出了一种针对组网雷达航迹关联检测的偏差补偿机制。文献[15]针对现有研究的主瓣航迹欺骗干扰技术进行航迹规划时只考虑了运动参数限制和以单部干扰机为主的情况,提出以航迹关联准则为参考设定虚假航迹的方法,在此基础上推导ECAV运动参数和干扰信号调制参数。文献[16]通过分析ECAV路径控制参数的动态约束条件,将产生虚假航迹的动力学模型状态和控制矢量替换为一个单自由度向量,提出了产生有限时间和无限时间的虚假航迹欺骗干扰方法。

然而现有的研究工作成果缺乏考虑欺骗干扰产生的虚假目标发生机动时对于组网雷达系统滤波估计的影响分析,以及相应的欺骗干扰优化策略。ECAV编队对组网雷达实施迫近式支援欺骗干扰的目的在于产生虚假目标,诱使雷达对其进行测量和跟踪,在组网雷达融合中心形成稳定虚假航迹,维持较高的航迹精度,保证航迹不被撤销,以制造虚假空情,迷惑或误导敌方,为我方飞机突防行动创造条件。

为此,本文从理论上推导了在目标机动检测约束下,虚假目标欺骗干扰对集中式组网雷达自适应滤波估计误差协方差的影响关系式,用误差协方差矩阵的迹来量化欺骗干扰效果,并以此为优化的目标函数,使用矩阵Schur补理论把约束条件转换为线性矩阵不等式,将欺骗干扰优化策略转化为求解半定规划凸优化问题。

1 组网雷达系统模型

1.1 标状态和量测方程

点迹融合数据处理结构的组网雷达基于状态变量法跟踪运动目标的状态方程^[17-18]为:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (1)$$

式中: \mathbf{X}_k 是 k 时刻的状态向量; \mathbf{F}_k 是 k 时刻的目标状态转移矩阵; \mathbf{V}_k 是零均值、白色高斯过程噪声序列,其协方差为 \mathbf{Q}_k ,即 $E[\mathbf{V}_k \mathbf{V}_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj}$,其中 δ_{kj} 为Kronecker Delta函数。

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 0 & k \neq j \\ 1 & k = j \end{cases} \quad (2)$$

因此过程噪声在不同时刻是相互独立的。假定组网雷达系统中有 N 部雷达跟踪同一目标,第 i 部雷达在 k 时刻的量测方程^[19-20]为:

$$\mathbf{Z}_k^i = \mathbf{H}_k^i \mathbf{X}_k^i + \mathbf{W}_k^i \quad (3)$$

式中: \mathbf{Z}_k^i 为第 i 部雷达在 k 时刻的量测向量; \mathbf{H}_k^i 为量测矩阵; \mathbf{W}_k^i 是白色高斯量测噪声序列,其均值为0、协方差为 \mathbf{R}_k^i ,即 $E[\mathbf{W}_k^i (\mathbf{W}_j^i)^T] = \mathbf{R}_k^i \delta_{kj}$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。因此量测噪声在不同时刻也是相互独立的,同时假定过程噪声序列与量测噪声序列以及目标初始状态是相互独立的。

1.2 适应滤波

记 N 部集中式组网雷达总的量测^[21]为:

$$\mathbf{Z}_k = \sum_{i=1}^N c_k^i \mathbf{Z}_k^i \quad (4)$$

其中

$$c_k^i = \frac{1/\mathbf{R}_k^i}{\sum_{j=1}^N (1/\mathbf{R}_k^j)} \quad (5)$$

组网雷达系统跟踪机动目标的自适应卡尔曼滤波基本方程^[22-23]如下所示。

状态预测方程:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} \quad (6)$$

预测估计值协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (7)$$

增益矩阵:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (8)$$

滤波估计值:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}] \quad (9)$$

滤波估计值协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (10)$$

残差向量:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \quad (11)$$

其均值 $E[\mathbf{d}_k] = 0$ 。

协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= E[\mathbf{d}_k \mathbf{d}_k^T] \\ &= E[(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})^T] \\ &= \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \end{aligned} \quad (12)$$

为便于分析,引入Lyapunov和Riccati运算符 f_1, f_2 。

$$f_1(\mathbf{X}) = \mathbf{F} \mathbf{X} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (13)$$

$$f_2(\mathbf{X}) = \mathbf{X} - \mathbf{X} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{X} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{X} \quad (14)$$

滤波误差协方差稳态值表示为:

$$\bar{P} = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{k|k-1} \quad (15)$$

式中, \bar{P} 为方程 $f_1[f_2(X)] = X$ 的唯一半正定解。于是有^[24-25]:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= f_1^n[f_2(\bar{P})] \\ &= [F(I - KH)]_n \bar{P} (F^T)_n + \sum_{i=0}^{n-1} [F(I - KH)]^i Q (F^T)^i \\ &= F^n \bar{P} [(I - KH)^T F^T]_n + \sum_{i=0}^{n-1} F^i Q [(I - KH)^T F^T]^i \end{aligned} \quad (16)$$

相应地, 滤波估计增益稳态值为:

$$\bar{K} = \bar{P} H^T (H \bar{P} H^T + R)^{-1} \quad (17)$$

机动检测自适应算法不依赖于目标机动的先验假设, 机动看成是目标动态特性的内部变化, 而不是状态噪声方差的加入。由于残差序列 d_k 是零均值和协方差为 S_k 的独立同分布高斯随机变量, 所以检测手段采用基于残差的 χ^2 检测器。

检测器基于稳态残差协方差矩阵 S_k 归一化的残差平方和距离函数, 在 k 时刻, 检测准则^[26] 为:

$$\mu_k = \sum_{i=k-L+1}^k d_i^T S_i^{-1} d_i \begin{cases} < \varepsilon & H_0 \\ \geq \varepsilon & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中: L 为检测窗口大小; ε 为阈值大小; 原假设 H_0 表示目标没有机动; 备择假设 H_1 表示目标发生机动; μ_k 满足自由度为 m 的 χ^2 分布。如果 μ_k 大于等于阈值 ε , 则认为目标发生了机动。

2 欺骗干扰原理、模型及影响分析

2.1 欺骗干扰原理

ECAV 编队对组网雷达实施欺骗干扰的原理如图 1 所示, 每架 ECAV 配备的数字射频存储器 (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) 可以接收、调制并转发雷达的发射信号, ECAV 截获雷达发射的脉冲信号, 对其进行调制延迟转发, 使得欺骗干扰信号进入雷达并形成虚假目标点。通过控制虚假目标相对于雷达的回波时延, 就可以在雷达与 ECAV 连线的延长线上指定位置产生虚假目标, 随着 ECAV 以一定方式运动, 雷达探测到的虚假目标也随之发生运动, 累积的虚假目标点迹形成虚假目标航迹^[27]。

由图 1 可知, ECAV 编队对组网雷达实施欺骗干扰还需要满足以下前提条件: ① ECAV 必须处在雷达与虚假目标的连接视线 (Line Of Sight, LOS) 上, 保证每架 ECAV 对一部雷达实施欺骗干扰; ② ECAV 平台小型化, 不易被敌方雷达侦察到, 确保完成整个干扰流程; ③ ECAV 侦察引导设备灵敏度使其足以接收到雷达信号并精确测量其参数, ECAV 装备的 DRFM 可以快速识别调制转

发所接收的雷达信号^[11]。

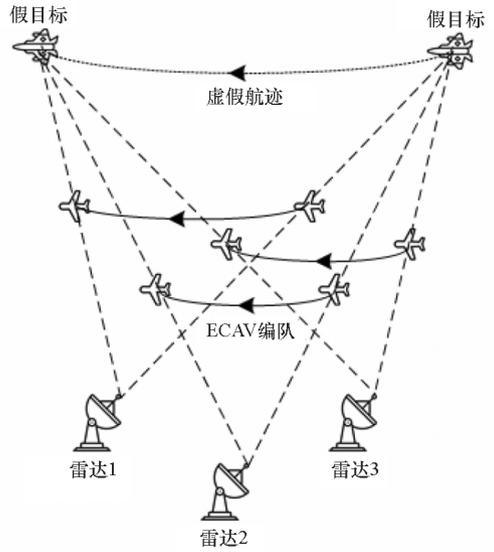


图 1 对组网雷达实施航迹欺骗干扰
Fig. 1 Phantom track deception jamming against netted radar

雷达、ECAV 和假目标的空间位置关系如图 2 所示。图 2 中: 点 O 表示雷达的位置; 点 A 和点 B 表示 ECAV 和假目标的当前位置; 点 C 和点 D 表示 ECAV 和假目标的下一位置; α 为假目标运动方向与雷达和假目标连线方向的夹角; β 为 ECAV 运动方向与雷达和假目标连线方向的夹角。

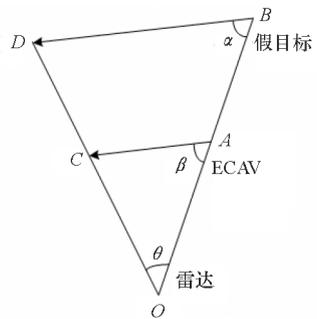


图 2 位置关系
Fig. 2 Position relation

2.1.1 距离时延

假设 ECAV 与雷达的距离为 r_0 , 设定比该 ECAV 径向距离更远的虚假目标与雷达的距离为 r_r , 那么虚假目标较 ECAV 的回波时延为:

$$\tau = 2(r_r - r_0) / c \quad (19)$$

式中, c 为光速。由 ECAV 编队对组网雷达实施欺骗干扰的原理可知, 在整个过程中首先得到的是假目标点迹的参数和 ECAV 的当前位置, 即图 2 中 OA 、 OB 和 BD 是已知的, 需要求解的是 ECAV 的下一位置 OC 。如图 2 所示, 在 $\triangle OBD$ 中, 根据余弦定理可以求得:

$$\theta = \arccos\left(\frac{|OB|^2 + |OD|^2 - |BD|^2}{2|OB| \cdot |OD|}\right) \quad (20)$$

在 $\triangle OAC$ 中,根据正弦定理可以求得:

$$|OC| = \frac{|OA| \cdot \sin\beta}{\sin(\pi - \theta - \beta)} \quad (21)$$

将式(21)代入式(1)可得:

$$\tau = \frac{2}{c} \left(|OD| - \frac{|OA| \cdot \sin\beta}{\sin(\theta + \beta)} \right) \quad (22)$$

从上述计算过程可以得知,在给定虚假目标航迹后,能够通过递推计算得到 ECAV 的运动特征参数,只要 ECAV 按此方式运动并逐步实施欺骗干扰就能形成相应的虚假航迹^[15]。

2.1.2 多普勒频移

雷达系统有很多方法对跟踪目标进行测速,最常用的就是脉冲多普勒频移测速法,它测量雷达发射信号频率与回波信号频率的差值 f_d ,该频率差值即为多普勒频率。相邻两次欺骗干扰之间的时间间隔设为 Δt_0 ,假定 ECAV 在干扰点处的速度为其在间隔 Δt_0 内匀速运动的速度,则可以求出假目标和 ECAV 的运动速度为:

$$v_f = \frac{|BD|}{\Delta t_0} \quad (23)$$

$$v_0 = \frac{|AC|}{\Delta t_0} = \frac{|OA| \cdot \sin\theta}{\sin(\theta + \beta) \cdot \Delta t_0} \quad (24)$$

虚假目标应有的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{2v_f \cos\alpha}{\lambda} \quad (25)$$

式中, λ 为雷达发射信号的波长。

对于位置固定式雷达, ECAV 的多普勒频率为 f_0 。如果要产生指定速度大小的虚假目标,既要给虚假目标设定相应的多普勒频率 f_d ,也要抵消 ECAV 自身的多普勒频率。所以 ECAV 需要调制的多普勒频率参数为:

$$f'_d = f_d - f_0 = \frac{1}{\lambda} (2v_f \cos\alpha - 2v_0 \cos\beta) \quad (26)$$

2.2 欺骗干扰模型

假设 ECAV 编队对组网雷达系统发起欺骗干扰,其目标是降低雷达组网系统对于运动目标的滤波估计性能。受攻击的雷达接收到一个时延发生改变的虚假回波信号,从而得到有偏差的量测数据^[28-29]:

$$\mathbf{Z}_k^{i'} = \mathbf{H}_k^i \mathbf{X}_k^i + \mathbf{V}_k^i + \Delta \mathbf{Z}^i = \mathbf{Z}_k^i + \Delta \mathbf{Z}^i \quad (27)$$

式中, $\mathbf{Z}_k^{i'}$ 为第 i 部雷达在 k 时刻受到欺骗干扰后的量测, $\Delta \mathbf{Z}$ 为欺骗攻击引起的量测偏差。

于是量测变为:

$$\mathbf{Z}_k^{i'} = \begin{cases} \mathbf{Z}_k^i & i \in u \\ \mathbf{Z}_k^i + \Delta \mathbf{Z} & i \in v \end{cases} \quad (28)$$

式中, $i \in u$ 为未受到欺骗攻击的雷达, $i \in v$ 为受到欺骗攻击的雷达。

此时残差可以写为:

$$\mathbf{d}'_k = \mathbf{G}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{a}_k \quad (29)$$

式中, $\mathbf{G}_k \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为线性系数矩阵。由于 \mathbf{d}_k 是零均值和协方差为 \mathbf{S}_k 的独立同分布高斯随机变量,显而易见, \mathbf{d}'_k 也是均值为零的独立同分布高斯随机变量,方差为 $\mathbf{G}_k \mathbf{S}_k \mathbf{G}_k^T + \Phi$ 。如果 \mathbf{d}'_k 与 \mathbf{d}_k 具有如式(30)所示相同的统计特征,那么根据机动检测准则式(18),受到欺骗干扰后的机动检测率与未受到欺骗干扰时相同,由此可得式(31)。

$$\mathbf{G}_k \mathbf{S}_k \mathbf{G}_k^T + \Phi = \mathbf{S}_k \quad (30)$$

$$\mathbf{S}_k - \mathbf{G}_k \mathbf{S}_k \mathbf{G}_k^T = \Phi \geq 0 \quad (31)$$

2.3 欺骗干扰影响分析

组网雷达系统的状态预测方程和滤波估计在受到欺骗干扰后变为:

$$\mathbf{X}'_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}'_{k-1} \quad (32)$$

$$\mathbf{X}'_k = \mathbf{X}'_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{d}'_k \quad (33)$$

因为满足式(31)约束的欺骗干扰产生的残差可以通过机动检测,所以滤波估计值会显著偏离真实值。根据欺骗干扰前后的目标状态方程和滤波估计可得:

$$\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1} = \mathbf{F}_k (\mathbf{X}_{k-1} - \mathbf{X}'_{k-1}) + \mathbf{W}_{k-1} \quad (34)$$

$$\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_k = \mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{d}'_k \quad (35)$$

进而滤波估计的误差协方差变为:

$$\mathbf{P}'_{k|k-1} = E[(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1})(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1})^T] \\ = \mathbf{F}_{k|k-1} \mathbf{P}'_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (36)$$

$$\mathbf{P}'_k = E[(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_k)(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_k)^T] \\ = \mathbf{P}'_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (E[\mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}] \mathbf{K}_k^T - \\ E[(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1}) \mathbf{d}'_k \mathbf{K}_k^T] - E[\mathbf{K}_k \mathbf{d}'_k (\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1})^T]) \quad (37)$$

为计算式(37)的最后两项,首先计算:

$$\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{k|k-1} = \mathbf{F} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} - \mathbf{F} (\mathbf{X}'_{k-1|k-2} + \mathbf{K} \mathbf{d}'_{k-1}) \\ = \mathbf{F}^k \mathbf{X}_0 + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^l \mathbf{W}_{k-1-l} - \mathbf{F}^k \mathbf{X}'_0 - \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^{l+1} \mathbf{K} \mathbf{d}'_{k-1-l} \\ = \mathbf{F}^k (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}'_0) + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^l \mathbf{W}_{k-1-l} - \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^{l+1} \mathbf{K} \mathbf{d}'_{k-1-l} \quad (38)$$

在上式最后一个等式中用到稳态假设 $\mathbf{X}'_{0|0} =$

$\hat{\mathbf{X}}_{0|0}$,然后计算:

$$\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{F} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} - \mathbf{F} (\hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2} + \mathbf{K} \mathbf{d}_{k-1}) \\ = \mathbf{F} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} - \mathbf{F} \{ \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2} + \\ \mathbf{K} [\mathbf{H} (\mathbf{X}_{k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2}) + \mathbf{V}_{k-1}] \} \\ = \mathbf{F} (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H}) (\mathbf{X}_{k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2}) + \mathbf{W}_{k-1} - \mathbf{F} \mathbf{K} \mathbf{V}_{k-1} \quad (39)$$

于是 d'_k 可表示为:

$$\begin{aligned} d'_k &= \mathbf{G}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{a}_k \\ &= \mathbf{G}_k \mathbf{H}(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{klk-1}) + \mathbf{G}_k \mathbf{V}_k + \mathbf{a}_k \\ &= \mathbf{G}_k \mathbf{H} \mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})(\mathbf{X}_{k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2}) + \\ &\quad \mathbf{G}_k \mathbf{H} \mathbf{w}_{k-1} - \mathbf{G}_k \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{K} \mathbf{V}_{k-1} + \mathbf{G}_k \mathbf{V}_k + \mathbf{a}_k \\ &= \mathbf{G}_k \mathbf{H}[\mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})]^k (\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_{0|0}) + \\ &\quad \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{G}_k \mathbf{H}[\mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})]^l \mathbf{W}_{k-1-l} + \mathbf{G}_k \mathbf{V}_k + \\ &\quad \mathbf{a}_k - \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{G}_k \mathbf{H}[\mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})]^l \mathbf{F} \mathbf{K} \mathbf{V}_{k-1-l} \quad (40) \end{aligned}$$

此时式(37)的倒数第二项可以写为:

$$\begin{aligned} &E[(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{klk-1}) \mathbf{d}'_k \mathbf{K}^T] \\ &= E[\{\mathbf{F}^k (\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_{0|0}) + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^l \mathbf{W}_{k-1-l}\} \{\mathbf{G}_k \mathbf{H}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})^k \cdot \\ &\quad (\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_{0|0}) + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{G}_k \mathbf{H}[\mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})]^l \mathbf{W}_{k-1-l}\}^T \mathbf{K}^T] \\ &= \{\mathbf{F}^k E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_{0|0})(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_{0|0})^T] [(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})^T \mathbf{F}^T]^k + \\ &\quad \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^l E(\mathbf{W}_{k-1-l} \mathbf{W}_{k-1-l}^T) [(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})^T \mathbf{F}^T]^l\} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T \mathbf{K}^T \\ &= \{\mathbf{F}^k \mathbf{P}[(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})^T \mathbf{F}^T]^k + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{F}^l \mathbf{Q}[(\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H})^T \mathbf{F}^T]^l\} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T \mathbf{K}^T \\ &= \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T \mathbf{K}^T \quad (41) \end{aligned}$$

同理可得:

$$E[\mathbf{K} \mathbf{d}'_k (\mathbf{X}_k - \mathbf{X}'_{klk-1})^T] = \mathbf{K} \mathbf{G}_k \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \quad (42)$$

综上所述,将式(41)和式(42)代入式(37)

中,可得欺骗干扰后的滤波估计误差协方差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'_k &= \mathbf{P}'_{klk-1} + \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} - \\ &\quad \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} - \\ &\quad \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G}_k \mathbf{H} \\ &= \mathbf{F} \mathbf{P}'_{k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} + \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{S} - \mathbf{G}_k^T \mathbf{S} - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \quad (43) \end{aligned}$$

式中, $\mathbf{S} = (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} > 0$ 。

3 欺骗干扰优化策略

根据上一节的推导结论,滤波估计误差协方差表达式(43)可以写作函数 $\mathbf{P}'_k(\mathbf{G}_k)$, 定义最优欺骗干扰策略为 \mathbf{G}_k^* , 即当 $\mathbf{G}_k = \mathbf{G}_k^*$ 时,滤波估计误差协方差最小,对应的虚假航迹精度最高。对于任意 \mathbf{G}_k , 都有 $\mathbf{P}'_k(\mathbf{G}_k^*) - \mathbf{P}'_k(\mathbf{G}_k)$ 为正半定矩阵。接下来用误差协方差矩阵的迹来量化欺骗干扰优化前后的虚假航迹精度。

$$\begin{aligned} \text{tr}[\mathbf{P}'_k] &= \text{tr}(\mathbf{F} \mathbf{P}'_{k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} + \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{S} - \mathbf{G}_k^T \mathbf{S} - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}}) \\ &= \text{tr}[\mathbf{F}^k \bar{\mathbf{P}} (\mathbf{F}^T)^k] + \sum_{l=0}^{k-1} \text{tr}[\mathbf{F}^l \mathbf{Q} (\mathbf{F}^T)^l] + \\ &\quad \sum_{l=0}^k \text{tr}[\mathbf{F}^l [\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{S} - \mathbf{G}_l^T \mathbf{S} - \mathbf{S} \mathbf{G}_l) \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}}] (\mathbf{F}^T)^l] \quad (44) \end{aligned}$$

由 $\text{tr}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \text{tr}(\mathbf{A}) + \text{tr}(\mathbf{B})$, $\text{tr}(\mathbf{ABCD}) = \text{tr}(\mathbf{DABC})$ 和 $\text{tr}(\mathbf{X}^T \mathbf{Y}) = \text{tr}(\mathbf{YX}^T)$, 可得:

$$\begin{aligned} &\text{tr}[\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T (\mathbf{S} - \mathbf{G}_k^T \mathbf{S} - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \mathbf{H} \bar{\mathbf{P}}] \\ &= \text{tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}}) - \text{tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T \mathbf{S} \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}}) - \text{tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}}) \\ &= \text{tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}}) - \text{tr}(\mathbf{S} \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{G}_k^T) - \text{tr}(\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \\ &= \text{tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{P}}) - 2 \text{tr}(\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \quad (45) \end{aligned}$$

其中, \mathbf{S} 和 \mathbf{P} 为半正定矩阵。

忽略式(45)最后一个等式中的常量,最优欺骗干扰策略等价于求解以下最优化问题。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{G}_k \in \mathbf{R}^{n \times n}} & \quad -\text{tr}(\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \\ \text{s. t.} & \quad \mathbf{G}_k \mathbf{S} \mathbf{G}_k^T - \mathbf{S} \leq 0 \quad (46) \end{aligned}$$

为求解上述优化问题,使用矩阵 Schur 补理论来把约束条件转换为线性矩阵不等式。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{G}_k \in \mathbf{R}^{n \times n}} & \quad -\text{tr}(\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \\ \text{s. t.} & \quad \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{G}_k \\ \mathbf{G}_k^T & \mathbf{S}^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (47) \end{aligned}$$

这样欺骗干扰优化策略就转化为求解半定规划凸优化问题。基于前文的分析推导,针对自适应滤波的组网雷达欺骗干扰优化策略实施过程为:

1) 干扰侦察,获得敌方雷达的发射信号波形、信号强度和脉冲重复周期等先验信息;

2) 设定虚假航迹信息,设计出满足组网雷达点迹关联准则的虚假目标,对组网雷达实施航迹欺骗干扰的 ECAV 编队在满足基本的空间几何约束和动力学约束条件^[11,15]的同时,转发的虚假目标信号量测的残差还应该满足式(47)求解出的线性系数矩阵;

3) 在对 ECAV 自身状态进行测量的基础上,依据第 2 节分析的欺骗干扰原理递推计算 ECAV 自身运动参数,并逐步实施干扰;

4) 干扰任务结束。

4 仿真分析

假设有 3 部雷达进行组网,其中雷达 1 作为坐标原点,以此建立笛卡尔直角坐标系,存在 3 架 ECAV 在组网雷达探测范围内飞行。仿真时间长度为 300 s, ECAV 分别对每一部雷达发起假目标欺骗干扰,欺骗干扰参数根据上文所述凸优化问题,利用 MATLAB 中的 CVX 工具箱进行求解。其中,3 部组网雷达的各项参数见表 1。

表1 组网雷达参数

Tab.1 Netted radar parameter

雷达编号	位置坐标/km	测距精度/m	测角精度/rad	测速精度/(m/s)
1	(0,0,0)	25	0.002	2
2	(0,20,0)	30	0.001	4
3	(20,0,0)	15	0.002	3

每一部雷达独立进行信号处理和点迹录取,然后将数据传送给组网雷达融合中心。融合中心首先进行误差配准,对不同的雷达进行系统误差校正;然后进行坐标变换,将来源于不同雷达的量测数据转换到同一个坐标系下(数据融合处理中心坐标系),并采用概率数据互联算法进行数据关联、同源检验;最后进行自适应滤波估计,实现对目标的跟踪。

4.1 虚假目标不发生机动

在本节的仿真情景下,3架 ECAV 分别对3部组网雷达进行欺骗干扰,产生的虚假目标不发生机动且做匀速运动,此时的状态转移矩阵^[30]为:

$$F_{cv} = \text{diag}(A_{cv}, A_{cv}, A_{cv}) \quad (48)$$

$$A_{cv} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (49)$$

式中, ΔT 为雷达采样时间间隔,取为1 s;设定的虚假目标航迹和欺骗干扰优化前后分别产生的虚假目标滤波航迹如图3所示。组网雷达融合中心在欺骗干扰优化前后的滤波估计误差协方差矩阵的迹如图4所示。

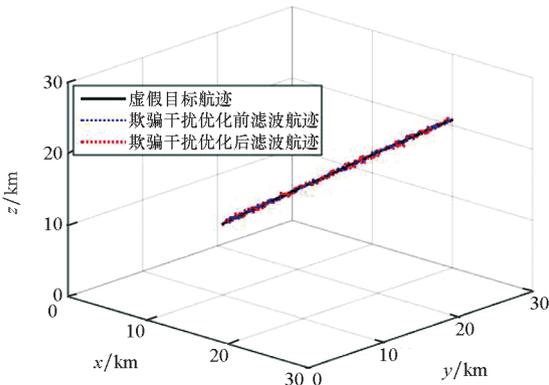


图3 匀速虚假目标的航迹

Fig.3 Flight path of false target with constant velocity

当虚假目标不发生机动且做匀速运动时,采用优化后的欺骗干扰策略对组网雷达进行干扰后,滤波估计误差协方差矩阵的迹小于优化前的

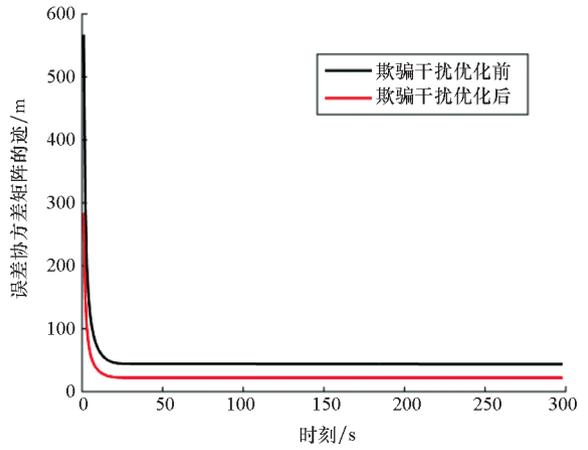


图4 误差协方差矩阵的迹(虚假目标不发生机动)

Fig.4 Trace of covariance matrix (false targets don't occur in manoeuvres)

迹,即虚假航迹精度更高,欺骗干扰效果更好。误差协方差收敛速度基本不受影响,本文所提的欺骗干扰优化策略在产生的虚假目标不发生机动时也有效。

4.2 虚假目标发生机动

在本节的仿真情景下,3架 ECAV 分别对3部组网雷达进行欺骗干扰,产生的虚假目标发生机动且做匀加速运动,此时的状态转移矩阵^[30]为:

$$F_{ca} = \text{diag}(A_{ca}, A_{ca}, A_{ca}) \quad (50)$$

$$A_{ca} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0.5(\Delta T)^2 \\ 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

式中, ΔT 为雷达采样时间间隔,取为1 s。设定的虚假目标航迹和欺骗干扰优化前后分别产生的虚假目标滤波航迹如图5所示。

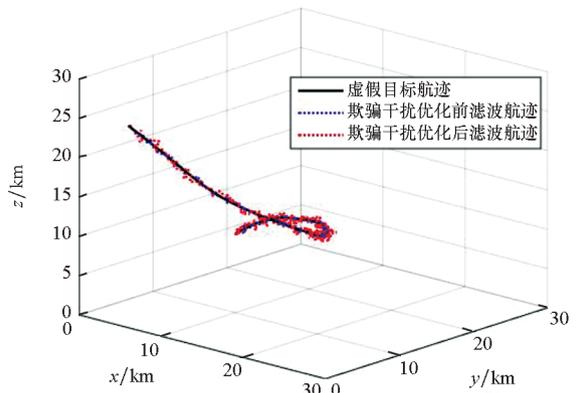


图5 匀加速虚假目标的航迹

Fig.5 Flight path of false target with constant acceleration

当虚假目标发生机动且做匀加速运动时,欺骗干扰优化前后的残差平方和距离函数值如图6

和图 7 所示。采用优化前的欺骗干扰策略产生的机动虚假目标残差平方和距离函数值 μ_k 多数大于机动检测阈值,被组网雷达检测出机动状态;而优化后的欺骗干扰策略产生的机动虚假目标残差平方和距离函数值基本小于机动检测阈值,没有被组网雷达检测出机动状态。

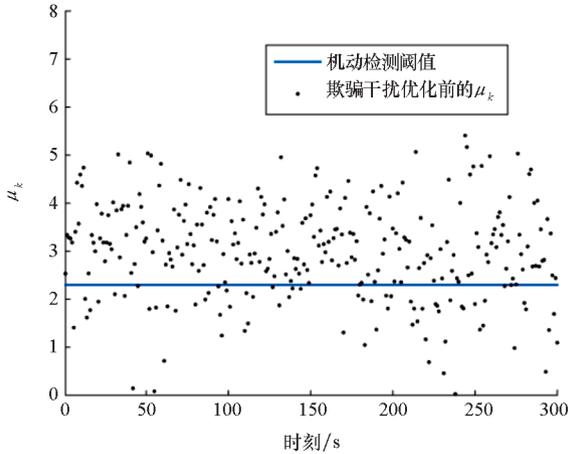


图 6 欺骗干扰优化前的 μ_k

Fig. 6 μ_k before optimized deception jamming

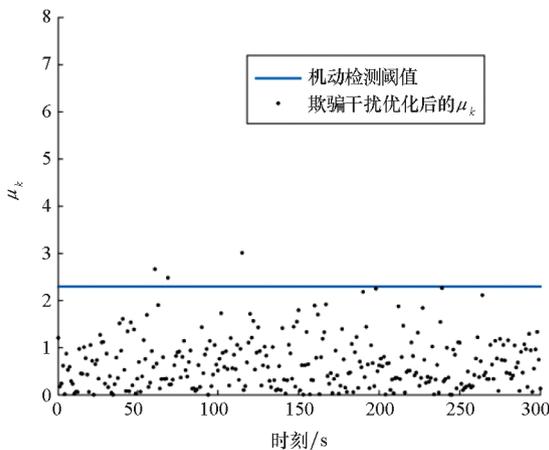


图 7 欺骗干扰优化后的 μ_k

Fig. 7 μ_k after optimized deception jamming

组网雷达融合中心在欺骗干扰优化前后的滤波估计误差协方差矩阵的迹如图 8 所示。当虚假目标发生机动且做匀加速运动时,采用优化后的欺骗干扰策略对组网雷达进行干扰后,滤波估计误差协方差矩阵的迹小于优化前的迹,即虚假航迹精度更高,欺骗干扰效果更好。并且在收敛后要大于非机动时的迹,这是因为组网雷达未检测到优化后欺骗干扰策略产生的虚假目标机动状态,而仍然采用匀速模型滤波,仿真结果证明了欺骗干扰优化策略的有效性。

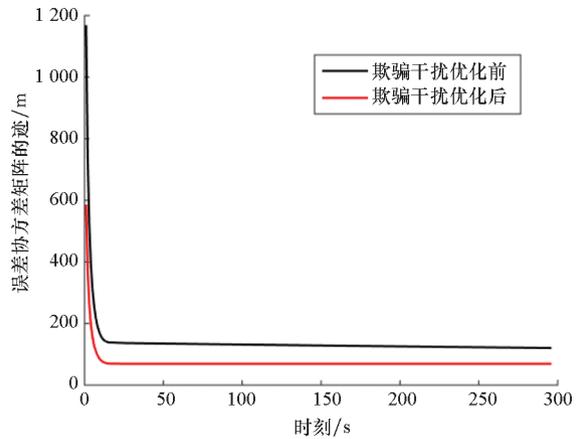


图 8 误差协方差矩阵的迹(虚假目标发生机动)

Fig. 8 Trace of error covariance matrix (false target maneuvers)

5 结论

在组网雷达对抗中,能够产生稳定航迹的欺骗干扰策略是一种有力的干扰手段。本文从理论上推导了在目标机动检测约束下,虚假目标欺骗干扰对集中式组网雷达自适应滤波估计误差协方差的影响关系式,然后用误差协方差矩阵的迹来量化欺骗干扰效果,将欺骗干扰优化策略转化为求解半定规划凸优化问题。对于分布式和混合式结构组网雷达系统的欺骗干扰优化策略还需要进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] YU H L, ZHANG J, ZHANG L R, et al. Polarimetric multiple-radar architectures with distributed antennas for discriminating between radar targets and deception jamming[J]. Digital Signal Processing, 2019, 90: 46 - 53.
- [2] 高磊, 曾勇虎, 汪连栋, 等. 对成像雷达的间歇采样非均匀转发干扰方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(2): 132 - 137.
GAO L, ZENG Y H, WANG L D, et al. Jamming method to imaging radar using intermittent sampling un-uniformly repeater [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(2): 132 - 137. (in Chinese)
- [3] COLUCCIA A, RICCI G. ABORT-like detection strategies to combat possible deceptive ECM signals in a network of radars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(11): 2904 - 2914.
- [4] TIAN T W, ZHANG T X, KONG L J. Timeliness constrained task scheduling for multifunction radar network [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(2): 525 - 534.
- [5] LI X T, ZHANG T X, YI W, et al. Radar selection based on the measurement information and the measurement compensation for target tracking in radar network [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 7923 - 7935.
- [6] PATEL J S, FIORANELLI F, RITCHIE M, et al. Fusion of deep representations in multistatic radar networks to counteract the presence of synthetic jamming[J]. IEEE Sensors Journal,

- 2019, 19(15): 6362 – 6370.
- [7] 崔玉娟, 察豪. 改进 IAHP-CIM 模型的雷达组网探测能力评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 158 – 164.
- CUI Y J, CHA H. Assessment method for radar network detection capabilities of the improved IAHP-CIM model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(3): 158 – 164. (in Chinese)
- [8] ZHAO S S, ZHOU Y, ZHANG L R, et al. Discrimination between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(7): 1124 – 1131.
- [9] NOURI M, MIVEHCY M, SABAH M F. Novel anti-deception jamming method by measuring phase noise of oscillators in LFM CW tracking radar sensor networks [J]. IEEE Access, 2017, 5: 11455 – 11467.
- [10] LI S Y, ZHANG L R, LIU N, et al. Adaptive detection with conic rejection to suppress deceptive jamming for frequency diverse MIMO radar [J]. Digital Signal Processing, 2017, 69: 32 – 40.
- [11] RATNOO A, SHIMA T. Formation-flying guidance for cooperative radar deception [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(6): 1730 – 1739.
- [12] DHANANJAY N, GHOSE D, KUDUVALLI A. Generation of a class of proportional navigation guided interceptor phantom tracks[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(11): 2206 – 2215.
- [13] 赵珊珊, 张林让, 李强, 等. 分布式多站雷达转发式欺骗干扰研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 138 – 143.
- ZHAO S S, ZHANG L R, LI Q, et al. Research on repeater jamming against distributed multiple-radar system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 138 – 143. (in Chinese)
- [14] 柳向, 李东生. 对分布式组网雷达的航迹欺骗偏差补偿技术[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1255 – 1264.
- LIU X, LI D S. Deviation compensation for phantom tracks jamming against distributed radar network [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1255 – 1264. (in Chinese)
- [15] 袁天, 陶建锋, 李兴成. 基于关联准则的主瓣航迹欺骗干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 273 – 279.
- YUAN T, TAO J F, LI X C. Main lobe track deception jamming method based on association rule [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(2): 273 – 279. (in Chinese)
- [16] LIU X, LI D S. A three-dimensional phantom track generation for radar network deception (January 2019) [J]. IEEE Access, 2019, 7: 27288 – 27301.
- [17] YAN J K, PU W Q, LIU H W, et al. Cooperative target assignment and dwell allocation for multiple target tracking in phased array radar network [J]. Signal Processing, 2017, 141: 74 – 83.
- [18] SOBHANI B, PAOLINI E, GIORGETTI A, et al. Target tracking for UWB multistatic radar sensor networks [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(1): 125 – 136.
- [19] YAN J K, LIU H W, PU W Q, et al. Joint threshold adjustment and power allocation for cognitive target tracking in asynchronous radar network [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(12): 3094 – 3106.
- [20] WANG S L, BI D P, RUAN H L, et al. Cognitive structure adaptive particle filter for radar manoeuvring target tracking [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 13(1): 23 – 30.
- [21] SHI C G, ZHOU J J, WANG F. Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2018, 29: 1203 – 1226.
- [22] NETTO M, MILI L. A robust data-driven koopman Kalman filter for power systems dynamic state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7228 – 7237.
- [23] DENG Z L, ZHANG P, QI W J, et al. Sequential covariance intersection fusion Kalman filter [J]. Information Sciences, 2012, 189: 293 – 309.
- [24] QI W J, ZHANG P, DENG Z L. Robust weighted fusion time-varying Kalman smoothers for multisensor system with uncertain noise variances [J]. Information Sciences, 2014, 282: 15 – 37.
- [25] QI W J, ZHANG P, DENG Z L. Weighted fusion robust steady-state Kalman filters for multisensor system with uncertain noise variances [J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 2014: 1 – 11.
- [26] WANG S L, BI D P, RUAN H L, et al. Radar maneuvering target tracking algorithm based on human cognition mechanism [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(7): 1695 – 1704.
- [27] ZHAO S S, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Signal fusion-based algorithms to discriminate between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6697 – 6706.
- [28] GUO Y F, LIAO G S, LI J, et al. An improved range deception jamming recognition method for bistatic MIMO radar [J]. Digital Signal Processing, 2019, 95: 102578.
- [29] HUANG D T, CUI G L, YU X X, et al. Joint range-velocity deception jamming suppression for SIMO radar [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(1): 113 – 122.
- [30] LEE C J, WON J Y, PAE D S, et al. Hybrid particle/extended finite memory filter to improve target tracking accuracy of radar measurement in harsh environments [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14: 1749 – 1758.