

基于操作风险的双模式传感器管理方法

庞策, 单甘霖

引用本文: 庞策,单甘霖.基于操作风险的双模式传感器管理方法[J].控制与决策,2020,35(12):2993-2998.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于超级节点的分布式传感器节点定位算法

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes 控制与决策. 2020, 35(12): 2898–2906 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219

阴影条件下基于迁移强化学习的光伏系统最大功率跟踪

Transfer reinforcement learning based maximum power point tracker of PV systems under partial shading condition 控制与决策. 2020, 35(12): 2939-2949 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0412

基于稀疏度阶数优化的杂波密度估计算法

A clutter density estimation algorithm by optimized sparsity order 控制与决策. 2020, 35(12): 2923–2930 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0429

FMM与改进GBNN模型相结合的多AUV实时围捕算法

Multi-AUV real-time hunting control based on FMM and improved GBNN model 控制与决策. 2020, 35(12): 2845-2854 https://doi.org/10.13195/j.kzyje.2019.0393

基于改进堆叠自动编码器的循环冷却水系统工艺介质温度预测控制方法

Predictive control method of process medium temperature in circulating cooling water system based on improved stacked auto encoders

控制与决策. 2020, 35(12): 2835-2844 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0694

基于操作风险的双模式传感器管理方法

庞 策†,单甘霖

(陆军工程大学电子与光学工程系,石家庄 050000)

摘要:基于风险理论研究同时面向目标检测和跟踪任务的传感器管理方法.首先,定义目标检测风险和目标跟踪风险,并分别给出计算方法;其次,以目标检测风险最小化为目标函数建立传感器部署模型,以目标检测风险和目标跟踪风险之和最小化为目标函数建立传感器调度模型,且该调度发生在前面传感器部署模型建立的传感器网络之上;然后,针对模型的求解,同时为克服基本人工蜂群算法易陷入局部最优的缺点,提出改进的双向轮盘赌-粒子群-蜂群算法;最后,通过仿真验证模型和算法的有效性.

关键词: 传感器管理; 传感器部署; 传感器调度; 目标检测; 目标跟踪; 操作风险; 人工蜂群算法 中图分类号: TP219 文献标志码: A



引用格式: 庞策,单甘霖. 基于操作风险的双模式传感器管理方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2993-2998.

A dual-mode sensor management method based on operational risk

PANG Ce[†], SHAN Gan-lin

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1541

(Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: A sensor management method for the combined task of target detecting and target tracking is studied based on risk theory. Firstly, the target detecting risk and target tracking risk are separately defined, and the computing methods are given. Then, minimizing the total of the target detecting risk and the target tracking risk is seen as the objective function, to build the sensor scheduling model. What is worthy of emphasizing is that the sensor scheduling takes place on the sensor network which is deployed by the preceding sensor deployment model. To get solutions for the two models, and to overcome the artificial bee colony algorithm's defect of easily striking in local optimum, the improved bee colony algorithm based on two-way roulette and particle swarm is proposed. Finally, simulations are carried out to illustrate effectiveness of the proposed models and algorithm.

Keywords: sensor management; sensor deployment; sensor scheduling; target detecting; target tracking; operational risk; artificial bee colony algorithm

0 引 言

在现代化战争中,利用雷达、卫星、电子支援设备 等传感器对目标进行探测预警成为作战必不可少的 环节,寻找一种有效的传感器管理方法,使传感器满 足战斗需求的同时发挥最大效用,成为军事研究的热 点和难点问题.

从1977年Nash采用线性规划的方法研究传感 器管理问题开始,已发展为3类基于贝叶斯理论的传 感器管理方法:基于协方差的传感器管理方法^[1-3]、基 于信息论的传感器管理方法^[4-6]、基于风险理论的传 感器管理方法^[7-9].前两种方法虽然能够得到良好的 技术指标,但尚未考虑到实际作战需求.例如,在目标 跟踪过程中,通过前两种方法可以得到较小的目标跟踪精度,但在不考虑发射导弹击中目标的情况下,若目标可能出现的位置分布在雷达波束范围内,则即使目标跟踪精度较差,雷达波束也能探测到目标,此时,考虑目标跟踪精度失去了实际意义.而第3种方法紧密贴合作战任务建模,在考虑目标跟踪精度的基础上,进一步将不同跟踪方案产生的损失考虑到模型当中,以风险理论建模,使模型更具有实际意义,成为近几年学者关注的重点^[10].通过研究发现,以上文献还存在如下问题:1)对传感器管理(传感器部署和调度)方法的研究缺乏延续性和关联性.具体表现为,将

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2019-02-26.

基金项目: 国家部委预研基金项目(012015012600A2203). 责任编委: 夏元清.

[†]通讯作者. E-mail: guanglongzhu@163.com.

器调度过程中,忽略传感器位置分布情况.2)单独考 虑将不同的传感器探测任务(目标检测和跟踪).实际 中,当对已知目标跟踪时,还需同时对未知目标进行 检测,两者应兼顾.

针对以上问题,本文基于风险理论研究目标检 测和目标跟踪两种任务综合情形下的传感器管理问 题.分别提出目标检测风险和目标跟踪风险的概念, 并给出计算方法,在检测风险的基础上建立传感器 部署模型,在检测风险和跟踪风险的基础上建立传 感器调度模型,针对模型的求解提出改进人工蜂群算 法.最后通过仿真表明模型和算法的有效性.

1 问题分析及模型建立

1.1 作战想定

我方防御区域Ω₀为200×200的正方形,防御中 心位于正方形中心.在目标探测预警过程中,应首先 部署目标探测预警传感器(雷达)网络,当目标来袭 时,以对该传感器网络调度进行目标检测和跟踪.传 感器部署和传感器调度紧密相关,密不可分,目标检 测和跟踪同时进行,需要兼顾.

本文作如下假设:1)每个传感器均有"目标检测 状态"和"目标跟踪状态"两种工作模式;2)每个传 感器在同一时刻最多只能选择1种工作模式工作;3) 每个传感器辐射功率和在一个观测周期内的辐射时 长保持不变;4)在目标检测过程中,忽略传感器扫描 周期间隔,即认为在传感器被检测区域内所有点处 于连续被该传感器检测的状态;5)将防御中心Ω₀划 分为单位区域小方格,假定每个小方格最多同时出现 1个目标;6)在传感器探测区域之外的目标不能被该 传感器检测和跟踪.

1.2 目标检测模型及传感器部署模型

1.2.1 目标检测概率模型

对于检测概率pd,根据文献[11],有

$$p_d = p_f^{1/(1+\text{SNR})}.$$
 (1)

其中: p_f 为虚警率, $取 p_f = 0.01$; SNR 为信噪比. 根据 文献[12], 信噪比计算方法如下:

$$SNR = SNR_{cal} \left(\frac{P\tau}{P_{cal}\tau_{cal}}\right) \left(\frac{r}{r_{cal}}\right)^{-4}.$$
 (2)

其中: P 为辐射功率; τ 为雷达辐射时长, 当传感器为 目标检测状态时, τ 近似为周期内被扫描位置波束 停留时间, 当传感器为目标跟踪状态时, τ 近似为观 测周期内波束在目标处停留时间; r 为雷达与目标 之间的距离; SNR_{cal} 为雷达与目标距离为 r_{cal} 且以 P_{cal} 功率辐射时间 τ_{cal} 时, 雷达接收到的目标反射回 波信噪比,其实质是一个校准值,本文取 SNR_{cal} = $50 \text{ dB}, P_{\text{cal}} = 1 \text{ kW}, \tau_{\text{cal}} = 10 \text{ ms}, r_{\text{cal}} = 20 \text{ km}.$

1.2.2 区域防御度模型

将某点*c*的防御度定义为该点需要被防御的程度,以此指标进行传感器网络部署.

设我方防御区域 Ω_0 内点c坐标为(x, y),防御中 心o的坐标为 (x_0, y_0) ,点c到防御中心距离为

$$d = \sqrt{\left(x - x_0\right)^2 + \left(y - y_0\right)^2}.$$
 (3)

假定防御中心o的重要度为Q_o,目标不会对防御 中心o产生威胁的安全距离为α,则根据距离远近,点 c处的重要度为

$$\theta = \begin{cases} Q_o \left(1 - \frac{d}{\alpha} \right), \ 0 \leqslant d \leqslant \alpha; \\ 0, \ d > \alpha. \end{cases}$$
(4)

假定目标最初出现在点c的概率为p,目标由远 及近攻击我方防御中心,最初出现的区域为防御区域 外周,防御区域正方形的边长为a,则在点c中目标最 初出现的概率为

$$p = \begin{cases} \frac{1}{4a}, c 为防御区外周;\\ 0, c 为其他位置 \end{cases}$$
(5)

同时考虑区域重要度和目标最初出现概率,点*c*的防御度为

$$f^c = \omega_1 \theta + \omega_2 p. \tag{6}$$

其中: $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1000, a = 4, \alpha = 300, 防御中心$ 坐标(0,0).

1.2.3 传感器部署模型

当有m个雷达用于组建传感器网络对区域 Ω_0 进行防卫时,将传感器的探测区域视为以该传感器为 中心,以R为半径的圆.当点c同时位于 m_c 个传感器 探测范围内时,点c处的目标检测概率为 $p_d^{*c} = 1 - \prod_{i=1}^{m_c} (1 - p_d^{ic})$.其中: m_c 为能够探测到点c的传感器个 数, p_d^{ic} 为传感器 s^i 在点c处的目标检测概率.将风险 定义为不确定性事件发生的概率及该事件发生后造 成的损失之积,点c处的检测风险值为

$$\operatorname{risk}_{1}^{c} = (1 - p_{g}^{*c}) \times f^{c}.$$
 (7)

当传感器网络部署后,应使防御区域内的单位检测风险值最小,即有最佳传感器网络部署的方案为

$$\pi = \arg \min E(\operatorname{risk}_1) =$$

arg min $\iint_{\Omega_0} risk_1^c / \Omega_0 dx dy$, (8) 其中 $E(risk_1)$ 为平均单位区域检测风险.

1.3 目标跟踪模型及传感器调度模型

1.3.1 目标跟踪模型

目标 t 在 k 时刻运动状态为

$$X_k = [x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k]^{\mathrm{T}}.$$

状态转移矩阵为

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
 (9)

其中T为采样时间,取为T = 1s. 在k + 1时刻,目标 t的状态为 $X_{k+1} = FX_k + W$,其中W为过程演化 噪声,各分量服从均值为0的高斯分布. Q为噪声协 方差矩阵,有

$$Q = \begin{bmatrix} T^4/4\sigma_x^2 & T^3/2 & 0 & 0\\ T^3/2\sigma_x^2 & T^2\sigma_x^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & T^4/4\sigma_y^2 & T^3/2\sigma_y^2\\ 0 & 0 & T^3/2\sigma_y^2 & T^2/\sigma_y^2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 σ_x 、 σ_y 为噪声的功率谱密度, 取 $\sigma_x = \sigma_y = 1$.

在 k + 1 时刻雷达 s 对目标 t 的观测为 Y_{k+1} = h(X_{k+1}) + V_k,其中 V_k 为观测噪声,各分量服从均 值为0的高斯分布, R_k = diag($(\sigma_k^r)^2, (\sigma_k^\alpha)^2$)为其协 方差矩阵. h(X_{k+1}) = $[d_{k+1}, \alpha_{k+1}]^T$,其中: $d_{k+1} = \sqrt{(x_{k+1} - x_0)^2 + (y_{k+1} - y_0)^2}$ 为传感器 s 与目标 t 之 间的距离, α_{k+1} = arctan $\frac{x_{k+1} - x_0}{y_{k+1} - y_0}$ 为目标的方位 角, (x_0, y_0) 为传感器 s 坐标.

由文献[12], σ_k^r 和 σ_k^{α} 的计算方法为

$$\sigma_k^r = \sigma_{\rm cal}^r \sqrt{\rm SNR_{cal}/SNR},\tag{11}$$

$$\sigma_k^{\alpha} = \sigma_{\rm cal}^{\alpha} \sqrt{\rm SNR_{cal}} / \rm SNR.$$
(12)

在给定的标准辐射功率、辐射时间以及目标与 传感器的距离条件下, $\sigma_{cal}^r = 200 \text{ m}, \sigma_{cal}^{\alpha} = 0.1 \text{ rad.}$

采用扩展卡尔曼滤波对目标状态进行估计.通过卡尔曼滤波得到的目标t状态服从 $N(\hat{X}_{k|k}, \hat{P}_{k|k})$ 分布^[13].假定传感器在跟踪目标过程中,波束a的中心对准 $(\hat{x}_{k|k}, \hat{y}_{k|k})$,设目标位于传感器波束内的概率为 p_g ,传感器的探测半径为R,在传感器探测区域内有

$$p_g = \int \int_{\Omega} f(x, y) \mathrm{d}x \mathrm{d}y, \tag{13}$$

$$f(x,y) \sim N(\hat{X}_{k|k}, \hat{P}_{k|k}), \tag{14}$$

其中 Ω_1 为波束a照射区域.本文给定波束宽度 $\theta = 0.1^\circ, R = 100$ km.

在目标跟踪过程中,目标丢失概率与目标检测概 率和目标状态估计的准确性有关.在目标跟踪状态 下,目标丢失概率为

$$p_m = 1 - p_d p_g. \tag{15}$$

1.3.2 目标威胁度模型

在本文中,目标威胁度大小与目标位置和速度有 关.当目标位于防御区域内时,目标距离防御中心越 近,目标威胁度越高;当目标位于防御区域内时,速度 越大,目标威胁度越高.据此,有

$$\gamma = \begin{cases} \exp\left(\frac{-d^2}{\left(||v|| + 100\right)^2}\right) \in (0, 1), \ 0 \le d \le \alpha; \\ 0, \ d > \alpha. \end{cases}$$

(16)

1.3.3 传感器调度模型

传感器网络中共有 m 个传感器, 在 k 时刻, 检测 到对 $n_k(m > n_k)$ 个目标并对其跟踪, 设此时传感器 管理方案为m × n_k 的矩阵 U_k , 其中 $u_k^{i,j}$ 为第 i 行第 j列元素, 当 $u_k^{i,j} = 1$ 时, 表示传感器 $s^i \propto k$ 时刻对目标 t^j 跟踪, 当 $u_k^{i,j} = 0$ 时, 表示传感器 $s^i \propto k$ 时刻不对目 标 t^j 跟踪, 当 $\sum_{j=1}^n u_k^{i,j} = 0$ 时, 表示传感器 s^i 不对任何 目标跟踪而进行目标检测.

在传感器调度过程中,同时考虑目标跟踪和目标 检测,最佳传感器调度方案为

$$\pi = \arg\min\left\{\beta_1 \int \int_{\Omega_0} \left(\frac{\operatorname{risk}_1^r}{\Omega_0}\right) \mathrm{d}x \mathrm{d}y + \beta_2 \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_k} u_k^{i,j} \frac{\operatorname{risk}_2^{i,j}}{n_k}\right)\right\}.$$
(17)

其中: risk₁^c为目标检测风险; risk₂^{i,j} = $p_m^{i,j}\gamma^j$ 为目标跟 踪风险; $p_m^{i,j}$ 为目标的丢失概率; β_1 、 β_2 为权重,本文取 $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

约束条件为:1)每个目标分配1个传感器,有 $\sum_{i=1}^{m} u_k^{i,j} = 1;2)$ 每个传感器只能选择1种工作模 式,且在目标跟踪模式中只能同时跟踪1个目标,即 $\sum_{j=1}^{n_k} u_k^{i,j} \leq 1;3$)传感器 $s^i \in k$ 时刻能够对目标 t^j 探测 的条件为目标在该传感器探测范围内,即 $d_k^{i,j} \leq R$.

2 算法设计

人工蜂群算法由Karaboga等^[14]提出,由于该算 法具有参数设置简单易实现等特点,一经提出便被广 泛应用,但该算法同时有易早熟陷入局部最优、算法 后期收敛速度缓慢等缺点,而粒子群算法通过利用全 局最优解合理地更新粒子位置,能够使算法有效避免 提前陷入局部最优.本文将蜂群算法与粒子群算法 相结合,为进一步提高算法全局搜索能力,引入双向 轮盘赌策略,提出双向轮盘赌-粒子-蜂群算法,改进后



图1 改进蜂群算法流程

3 实验仿真

3.1 传感器部署过程仿真

传感器网络未优化时采用规则分布方式,12个 传感器均匀分布在半径为100km的圆环上,每个扫 描周期内传感器的辐射时间和辐射功率均为τ_{cal} = 10ms、P_{cal} = 1kW.采用本文改进人工蜂群算法(算 法1)、基本人工蜂群算法(算法2)、文献[15]提出的 食物源更新信息引导改进人工蜂群算法(算法3)以 及文献[16]改进遗传算法分别计算传感器网络部署 方案.算法对比迭代曲线、最终的传感器位置及风险 分布如图2所示.

由图2(a)可见,与其他3种算法相比,本文算法 具有更快的收敛速度和求解质量,基本人工蜂群算 法易陷入局部最优值,在改进后能够有效克服该缺 点.传感器网络部署后,平均单位区域检测风险值为 0.2668.按照本文算法得到传感器部署方案,传感器 位置为:*s*₁(116,112)、*s*₂(136,-124)、*s*₃(-129,-121)、 *s*₄(-117,131)、*s*₅(3,118)、*s*₆(132,-8)、*s*₇(12,-113)、 $s_9(-126,5)$, $s_9(10,-2)$, $s_{10}(-1,14)$, $s_{11}(12,-96)$, $s_{12}(85,78)$.



3.2 传感器调度过程仿真

在*k* = 0时刻,同时检测到4个目标.采用以上4 种算法分别计算传感器网络部署方案.算法对比迭 代曲线、调度后的检测风险分布如图3所示.



2997

由图3(a)可见,本文算法收敛速度和求解质量均 最优. 传感器网络部署方式优化后单位区域检测风 险值为0.3325,单目标跟踪风险值为0.3565,总风险 值为0.6980. 传感器-目标配对方案为 $t^1 - s^8$ 、 $t^2 - s^3$ 、 $t^3 - s^2$ 、 $t^4 - s^5$. 将图2(b)与图3(b)对比可知,当目标 来袭时,传感器网络由于承担了目标跟踪任务,在防 御区域的检测能力降低,检测风险增大.

在 $k \sim [0,50T](T = 1s)$ 时间段内,4个目标飞 行过程中,风险值的变化情况如图4所示.图4(a)为 $k \sim [0,50T]$ 时间段内目标飞行航迹与传感器分布 情况,图4(b)为 $k \sim [0,50T]$ 时间段内风险值随时间 的变化曲线.由图4(b)可见,与检测风险值相比,跟踪 风险值表现出更多的随机性,其原因是,跟踪风险值 不仅与传感器对目标的检测概率有关,还与传感器对 目标运动状态估计的准确性有关,后者在目标跟踪过 程中具有随机性,跟踪风险值的随机性将会传递到总 风险值(检测风险值+跟踪风险值)中.



3.3 权重对调度方案的影响

以上仿真过程中取权重 $\beta_1 = \beta_2 = 1$,即同时考 虑检测风险值和跟踪风险值,此部分将研究权重对传 感器调度方案的影响. 给定目标 t_5 的飞行轨迹如图 5(a)所示,分别取 $\beta_1 = 1$ 、 $\beta_2 = 0$; $\beta_1 = 0$ 、 $\beta_2 = 1$; $\beta_1 = \beta_2 = 1$;时间段 $k \sim [0,400]$ 内的风险值变化过 程如图5(b)所示. 由图5(b)可见,当 $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0$ 时,检测风险值最小,但跟踪风险值不一定最优; 当 $\beta_1 = 0, \beta_2 = 1$ 时,跟踪风险值最小,但检测风险不 一定最优;仅当 $\beta_1 = \beta_2 = 1$ 时,兼顾两种风险.由于 作战态势不断变化,目标并不是同一批次出现的,应 该在对已知目标跟踪的同时对新目标进行检测,对目 标实时探测、有效监控.



图 5 不同权重下的传感器调度过程对比

4 结 论

本文基于风险理论研究双模式传感器调度方法. 首先研究传感器部署问题,定义目标检测风险,并提 出计算模型,针对目标检测任务以检测风险最小为原 则建立传感器部署模型;然后在以上传感器网络上 研究传感器调度问题,定义目标跟踪风险并提出计算 模型,在目标跟踪任务中,同时考虑对已有目标的跟 踪风险和对未知目标的检测风险,以两种风险之和最 小为原则,建立传感器调度模型;接着针对模型的求 解提出一种双向轮盘赌-粒子-蜂群算法:最后对传感 器的部署和调度过程进行仿真,通过对比表明模型和 算法的有效性.随着战场环境的复杂化、多样化,单一 作战任务的传感器管理模型不再适用,建立多任务情 形下的传感器管理模型是传感器管理方向热点与难 点问题.在本文的基础上,研究目标跟踪、目标识别、 目标威胁等级评估等其他多种作战任务下的传感器 综合调度问题是下一步的研究方向.

参考文献(References)

- Saurav S, Yimin N D Z, Moeness G A. Cramer-rao type bounds for sparsity-aware multi-sensor multi-target tracking[J]. Signal Processing, 2018, 145(1): 68-77.
- [2] Ahmad B A, Ayed T J, Stephen L S. A complete greedy algorithm for infinite-horizon sensor scheduling[J]. Automatica, 2017, 81(1): 335-341.
- [3] Siddharth H J, Stephen B. Sensor selection via convex optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 451-462.
- [4] Mario B, Ivan M, Ivan P. Score matching based assumed density filtering with the von Mises-Fisher distribution[C]. The 20th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2017: 433-438.
- [5] Sayin M O, Lin C W, Shiraishi S, et al. Information-driven autonomous intersection control via incentive compatible mechanisms[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3): 912-924.
- [6] Ferri G, Munafò A, LePage K D. An autonomous underwater vehicle data-driven control strategy for target tracking[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(2): 323-343.
- [7] SEAN M. Risk-based sensor resource management for field of view constraint sensor[C]. The 18th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2015: 2041-2048.
- [8] Marcos E G B, Dominique M, Philippe V. Sensor management using expected risk reduction approach[C]. The 19th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2016: 2050-2058.
- [9] Marcos E G B, Dominique M, Philippe V. A risk-based sensor management using random finite sets and POMDP[C]. The 20th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2017: 1588-1596.
- [10] Gostar A, Hoseinnezhad R, Weiffeg L. Sensor-

management for multi-target filters via minimization of posterior dispersion[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2877-2884.

- [11] Jitse H Z, Hans D. Tracking performance constrained MFR parameter control: Applying constraints on prediction accuracy[C]. The 7th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2005: 546-551.
- [12] Alexey S N, Alexander Y. Sensor selection algorithm for optimal management of the tracking capability in multisensor radar system[C]. European Microwave Conference. Nuremberg, 2013: 499-502.
- [13] James Z, Hare S G, Thomas A. POSE: Prediction-based opportunistic sensing for energy efficiency in sensor networks using distributed supervisors[J]. IEEE Transactions of Cybernetics. 2018, 48(7): 2114-2127.
- [14] Karaboga D, Basturk B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-696.
- [15] Jiaxu N, Tingting L, Changsheng Z. A food source-updating information-guided artificial bee colony algorithm[J]. Neural Computer and Application, 2018: 30(3): 775-787.
- [16] Sang J Y, Anish M S. Joint spectrum sensing and resource allocation optimization using genetic algorithm for frequency hopping-based cognitive radio networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2018, 33(3): e3733.

作者简介

庞策(1993-), 男, 博士生, 从事传感器管理方法及信息 融合的研究, E-mail: guanglongzhu@163.com;

单甘霖(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制理论及信息融合方法等研究, E-mail: shanganlin@163. com.

(责任编辑:郑晓蕾)