

引用格式:王宇,张聚伟,王亚乐.异构传感器网络基于粒子群算法的部署策略[J].电光与控制,2017,24(10):40-44,63. WANG Y, ZHANG J W, WANG Y L. Deployment strategy of heterogeneous sensor network based on particle swarm optimization algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):40-44, 63.

异构传感器网络基于粒子群算法的部署策略

王宇, 张聚伟, 王亚乐
(河南科技大学, 河南 洛阳 471023)

摘要: 异构传感器网络的部署问题较之同构传感器网络更为复杂,需要充分考虑节点的异构性带来的影响。采用粒子群算法对异构传感器网络进行部署,加入异构性适应策略,并改进了适应度函数,提出一种异构性适用的粒子群算法。仿真结果表明,相比于基本粒子群算法,所提算法有效避免了陷入局部最优次于全局最优的情况,并加快了收敛性,提高了一定的网络覆盖性能。

关键词: 异构传感器网络; 异构性适用; 粒子群算法

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.008

Deployment Strategy of Heterogeneous Sensor Network Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

WANG Yu, ZHANG Ju-wei, WANG Ya-le
(Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The deployment of heterogeneous sensor networks is more complex than that of the homogeneous sensor networks, for which the influence of the heterogeneity of nodes should be taken into full consideration. Particle swarm optimization algorithm is used for the deployment of heterogeneous sensor networks. By integrating the heterogeneity adaptability strategy and improving the fitness function, a new particle swarm optimization algorithm adaptive for heterogeneity is proposed. Simulation results show that: Compared with the basic particle swarm optimization algorithm, the proposed method can accelerate the convergence speed, improve the network coverage performance, and effectively avoid falling into the situation that the local optimum is inferior to the global optimum.

Key words: heterogeneous sensor network; heterogeneity adaptability; particle swarm optimization algorithm

0 引言

随着应用场景和条件的要求增加,无线传感器网络感知、传输的数据类型也越来越多,并且不同的数据类型要占用更多的无线带宽资源,所以就越来越需要功能强大但结构复杂的异构传感器网络投入应用。传感器节点具有差异且多样的传感网络为异构传感器网络,在异构传感器网络中,由于节点的异构性,节点携带能量、工作能耗以及感知类型等都不尽相同,导致了节点间感知范围大小的不同^[1]。

与同构传感器网络一样,在异构传感器网络中,覆盖控制仍然是一项需要解决的基本问题。异构传感器网络的部署可以参考应用同构传感器网络研究中的各种策略,但其过程更为复杂。文献[2]针对异构传感器网络中的节点冗余问题,把节点按其邻居节点的不同位置进行分类,研究了每组邻居节点的覆盖率与工作节点个数之间的约束关系,并在此基础上判断并调度冗余节点,提高网络的效率和寿命,实现了非移动性节点的网络部署;文献[3]研究了在两种感知范围不同的异构网络中,节点数目对网络单连通度和重复连通度的影响关系,对于实现一定连通度时所需要的节点数量,提供了一个参考;文献[4]分析了在异构传感器网络中,不同类型节点不同覆盖范围下的冗余问题,研究了节点数量和冗余度之间的关系,并通过限定网

收稿日期:2016-10-11

修回日期:2016-11-12

基金项目:“十二五”装备预先研究项目(51305080301)

作者简介:王宇(1978—),男,河南商丘人,硕士,研究方向为无线传感器网络部署。

网络冗余度来计算所需不同节点的数量,可减少一定网络成本,但其降低成本是以牺牲部分覆盖率为代价的。文献[5]的算法参考同构传感器网络中基于能量考虑的部署方法,围绕基站划分层次,部署普通节点和转发消息的节点;文献[6]在两种不同能量级节点的网络中,根据两种节点的不同能耗,计算得到所需两种节点的比例,并在此基础上提出节点部署算法,一定程度上延长了网络寿命,但其提升有限;文献[7]针对存在障碍的监测区域,用 Delaunay 三角剖分法划分三角形的方法,实现了对目标区域的高效覆盖;文献[8]结合虚拟力算法和差分算法,通过异构节点间的虚拟力影响差分算法的位置向量更新过程,指导种群进化,实现了网络节点的布局优化,但其算法对节点定位精度的依赖度较高;文献[9]在不同感知范围的异构传感器网络中,应用遗传算法迭代计算并移动节点至新的位置,使感知范围大小不同的节点均匀分布在监测区域,极大地提高了网络的覆盖质量;文献[10]针对感知半径不等的异构传感器网络,在覆盖区域中随机采样直线,并对采样直线上的覆盖进行优化,在多次采样后,实现对整个区域的覆盖优化,但随机采样的方法在算法后期对整个网络的性能提升量急剧减小,增加了大量冗余计算。

粒子群算法具有迭代格式简单、收敛速度快等优点。文献[11-12]在有向传感器网络中应用粒子群算法,以节点的不同朝向角度为粒子的解,粒子通过跟踪满足最优覆盖的解,多次迭代寻找所有节点的最优角度,完成网络部署;文献[13-14]在全向同构传感器网络中,以节点单步可到达的位置为粒子的解,跟踪寻优;文献[15]则在传感器网络中利用粒子群寻找补充节点的最佳位置,并添加汇节点,增加了网络的连通性。粒子群算法在传感器网络中的应用,很大程度上提高了传感器网络的覆盖性能和节点利用率。

目前粒子群算法的研究应用于异构传感器网络的较少,本文在异构传感器网络中应用粒子群算法,以异构节点随机单步可移动到的位置为粒子的解,并以提高网络性能为约束,寻找节点部署的最优位置解,提出异构性适用粒子群部署算法 HAPSO。

1 异构传感器网络模型

1.1 异构节点模型

在异构传感器网络中,节点的异构性会造成节点间覆盖范围的差异,因此本文采用不同的节点感知半径,如图 1 所示。

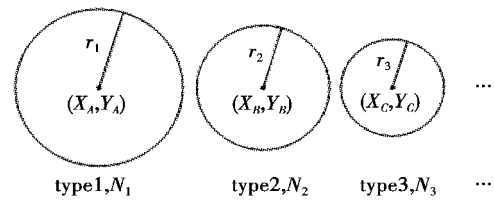


图 1 异构节点

Fig. 1 Heterogeneous sensors

节点不同的规格 type1, type2, type3, ..., 对应的感知半径分别为 r_1, r_2, r_3, \dots , 对应的节点数目分别为 N_1, N_2, N_3, \dots 。

节点的感知模型采用概率感知模型,即节点的感知强度随距离的增大而减弱,节点 s 对任一点 q 的感知概率为

$$P(s, q) = \begin{cases} 1 & d(s, q) \leq r \\ e^{-\alpha[d(s, q) - r]} & r < d(s, q) \leq R \\ 0 & R < d(s, q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d(s, q)$ 表示节点 s 与目标位置 q 之间的欧氏距离; r 为节点的确定感知区域的半径; R 为节点的最大感知半径; α 为相关参数。

1.2 数据融合模型

由于概率感知模型中存在非确定性感知区域,故需采用数据融合策略,以加强对节点非确定性感知数据的利用,并增加一定的覆盖效果。假设在监测区域内有一点 q , 处于 m 个传感器节点的感知范围内,若其在任意一个节点的确定感知范围内,则认为该点被感知到;若在 2 个及 2 个以上节点的非确定性感知区域内,则要对这些节点的感知数据进行融合计算

$$P_q = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P(s_i, q)) \quad (2)$$

1.3 网络模型

传感器网络采用如下设定:1) 初始部署为随机部署;2) 异构节点选用 3 种类型(按感知半径从小到大的顺序依次为 type1, type2, type3);3) 所有节点具备移动能力;4) 所有节点的通信范围大于其感知范围,且通信半径 R_c 与感知半径 R_s 满足 $R_c \geq R_s + R_1$ (R_1 为最大感知范围节点的感知半径)。

2 粒子群算法应用

2.1 基本粒子群算法

粒子群算法 (PSO) 是 KENNEDY 和 EBERHART 根据鸟类的捕食行为于 1995 年提出的一种群体智能的优化算法,该算法具有迭代格式简单、收敛速度快等优点。PSO 算法在可行解空间中初始化一群粒子,每个粒子代表一个极值最优解,且每个粒子都有位置、

速度和适应度值 3 个特征指标,其中,适应度值可通过适应度函数计算得到,通过判断适应度值的好坏评判粒子的优劣。每个粒子在解空间里运动,跟踪局部最优位置 P_{best} 以及全局最优位置 G_{best} 来更新个体的位置。 P_{best} 指个体粒子所经历的位置中适应度值最好的位置,而 G_{best} 是指所有粒子所经历过的适应度最优位置。粒子每更新一次位置就会计算一次适应度,同时通过比较新的适应度值和 $P_{\text{best}}, G_{\text{best}}$ 的适应度值更新局部最优和全局最优。

粒子群在传感器网络覆盖部署中的应用则是求解使传感器网络覆盖率最大的节点位置集 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$, 其中, $\varphi_i(x_i, y_i)$ 为第 i 个传感器节点的位置 ($1 \leq i \leq n$)。假设有 m 个粒子组成的种群 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_m)$, 每个粒子在一个 n 维的搜索空间中寻优, 其中, 第 i 个粒子表示为一个 n 维的向量 $\mathbf{X}_i = (\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{in})^T$, 代表第 i 个粒子在 n 维搜索空间的位置, 即 n 个传感器节点的第 i 个新位置。根据目标函数即可计算出每个粒子的位置 \mathbf{X}_i 所对应的适应度值。第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})^T$, 局部最优位置为 $\mathbf{P}_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})^T$, 种群的全局最优位置为 $\mathbf{P}_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gn})^T$ 。粒子通过式(3)和式(4)进行迭代寻找局部最优和全局最优并更新自身的位置和速度^[16]。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (3)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (4)$$

式中: k 为当前迭代次数; $d = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$; V_{id} 为粒子的速度; c_1 和 c_2 是非负的常数, 为加速 r_1 因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。一般情况下, 为防止粒子的盲目搜索会将位置和速度限制在一定的区间 $[-X_{\text{max}}, X_{\text{max}}]$, $[-V_{\text{max}}, V_{\text{max}}]$; ω 为惯性权重, 体现的是粒子继承前次迭代速度的能力, 较大的惯性权重有利于全局搜索, 而较小的惯性权重则有利于局部搜索。为了更好地平衡全局搜索和局部搜索能力, 使用线性递减惯性权重, 即

$$\omega(k) = \omega_{\text{start}} (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) (T_{\text{max}} - k) / T_{\text{max}} \quad (5)$$

式中: ω_{start} 为初始惯性权重; ω_{end} 为最后一次迭代的惯性权重; k 为当前迭代次数; T_{max} 为算法最大迭代次数。在一般情况下, 惯性权重取 $\omega_{\text{start}} = 0.9$, $\omega_{\text{end}} = 0.4$ 。

以网络覆盖率为优化对象, 则基本粒子群算法的适应度函数为网络覆盖率。每个粒子 $\mathbf{X}_i = (\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{in})^T$ 都是算法的一个潜在解, 通过不断迭代求出使得网络覆盖率最大的粒子位置集, 即传感器节点位置集合 $\varphi_g = (\varphi_{g1}, \varphi_{g2}, \dots, \varphi_{gn})^T$, 再调整传感器节点到计算所得的最优位置。但是, 基本粒子群算法容易陷入局部最优

次于全局最优的情况。

2.2 异构性适用粒子群算法

为使粒子群算法更好地适用于异构传感器网络, 并进一步提高网络性能, 对基本粒子群算法进行适当改进。

1) 以节点利用率为适应度函数。

以全局覆盖率为适应度函数进行计算时, 计算量较大, 并且太依赖节点的高定位精度, 因此, 使用节点利用率作为新的适应度函数。

定义 1 单个节点利用率 λ_i 即只被节点 i 有效覆盖的面积与其完整覆盖面积之比, 算式为

$$\lambda_i = 1 - \frac{1}{\pi R_i^2} \sum_{j=1}^N S_{\text{overlap}}(i, j) \quad (6)$$

式中, $S_{\text{overlap}}(i, j)$ 为节点 i 与节点 j 重复覆盖的区域面积。与使用节点覆盖率相比, 以单个节点利用率作为寻找局部最优的适应度函数, 只需要对节点与其通信范围内节点(邻居节点)的距离情况进行计算, 而不用每次都计算所有节点的情况, 减少了算法的复杂度, 并且可以适当避免一些局部最优次于全局最优情况的出现。

定义 2 网络资源利用率 λ_N , 传感器网络所有节点的利用效率, 即节点覆盖区域 S_i 的并集与所有节点覆盖区域之和的比例, 为

$$\lambda_N = \frac{S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_i \cup \dots \cup S_N}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (7)$$

网络资源利用率的计算有别于覆盖率, 以网络资源利用率作为寻找全局最优的适应度函数, 既简化了计算复杂度, 又可以逼近当前网络所能提供的最高覆盖效果。

2) 异构性适用。

考虑到大覆盖范围节点容易形成局部封闭空间, 而造成该局部区域节点利用率过低的情况(局部最优次于全局最优), 以及小型节点移动能耗更少, 需要赋予小型节点更高的灵活性, 以便跳出局部封闭空间。设置节点的移动步长与其覆盖半径成反比, 设 type1 节点移动步长为 $d_1 = d_0$, 则 type2 节点移动步长为 $d_2 = (r_1/r_2)d_0$, type3 节点移动步长为 $d_3 = (r_1/r_3)d_0, \dots$, 即 typen 节点的移动步长为

$$d_i = \frac{r_1}{r_i} d_0 \quad (8)$$

节点移动步长的调节, 再加上以节点利用率为适应度函数的应用, 可有效减少局部最优次于全局最优情况的出现, 如图 2 所示。

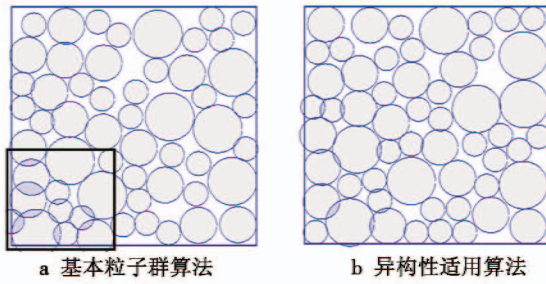


图 2 局部最优次于全局最优的情况

Fig.2 Situation of local optimum inferior to the global optimum

图 2a 为应用基本粒子群算法时出现的局部最优次于全局最优情况,图 2b 为在相同的一次初始部署下,应用异构性适用算法的部署效果,避免了该不良情况的出现。

3) 粒子优先跟踪上次迭代最优解。

粒子在移动寻优时,由于移动步长有限,在单次迭代找到优于上次的位置时,并没有完全在该方向上到达最优位置,如鸟群飞行时,若发现疑似目标时,在飞往该目标的过程中,并不会在到达该目标半途而废一样。所以,在算法过程中设置优先考虑上次迭代选取的粒子方向,只要该粒子位置优于当前位置,则直接选取该粒子并且不再考虑其他粒子,该策略在算法前期可取得明显的加速收敛的效果。

4) 边界约束。

边界约束是传感器网络部署时需要考虑的另一个基础问题,在经典的虚拟力算法中,约束边界的策略为:节点只要超出边界,就将其移回界内。这种策略可以有效限制节点出界,但是又同时会造成部分节点在边界处进行不必要的往返移动。在本文中,则可以直接在适应度函数中加入边界约束策略,在单个节点利用率计算中加入边界判定,为

$$\lambda_i = 1 - \frac{1}{\pi R_i^2} \sum_{j=1}^N S_{\text{overlap}}(i, j) + S'_i \quad (9)$$

式中, S'_i 为节点 i 覆盖区域超出边界部分的面积,在区域横轴边界为 $[0, x']$,纵轴边界为 $[0, y']$ 的区域中, S'_i 的算式为

$$S'_i = R_i^2 \arccos \frac{x' - x_i}{R_i} + R_i^2 \arccos \frac{y' - y_i}{R_i} \quad (10)$$

3 基于粒子群的部署算法

算法步骤如下:

- 1) 随机部署;
- 2) 更新节点位置信息,更新节点当前适应度;
- 3) 粒子到达自己位置,计算每个粒子位置的适应度;
- 4) 比较每个粒子适应度和节点当前适应度的大小(优先考虑上次最优粒子);

- 5) 选取适应度值最大的粒子为节点新位置,该适应度值为节点当前的新适应度,并记录最优粒子;
- 6) 重复 2) ~ 5);
- 7) 当迭代次数等于最大迭代次数 N 时结束。

4 仿真分析

采用 Matlab 作为仿真工具。在监测区域 $M=200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 内,初始随机均匀部署节点数为 $N_1 = 10, N_2 = 20, N_3 = 40$,节点感知半径取 $R_1 = 10 \text{ m}, R_2 = 20 \text{ m}, R_3 = 40 \text{ m}$,在同一次随机部署(RAN)下,分别运行异构性适用虚拟力算法(HAVFA)、基本粒子群算法(BPSO)和异构性适用粒子群算法(HAPSO)得到的部署效果如图 3 所示。

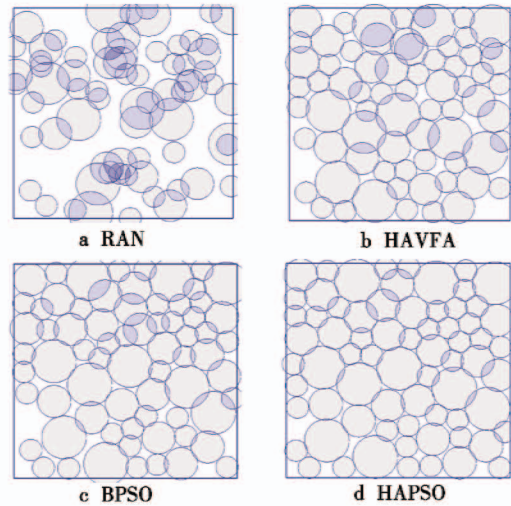


图 3 算法部署效果对比

Fig.3 Deployment effects of different algorithms

网络整体覆盖率 $P_{\text{RAN}} = 61.12\%, P_{\text{HAVFA}} = 83.74\%, P_{\text{BPSO}} = 86.39\%, P_{\text{HAPSO}} = 89.66\%$,3 种算法运行迭代次数相同,BPSO 和 HAPSO 算法采用同样的参数,可以看出本文提出的算法具有较好的覆盖效果。

4.1 算法覆盖效果对比

为对不同的算法进行详细的覆盖效果对比,在相同参数下,采用不同的节点数目,分别运行 3 种算法 20 次,并取平均值,得到覆盖率对比情况如图 4 所示。

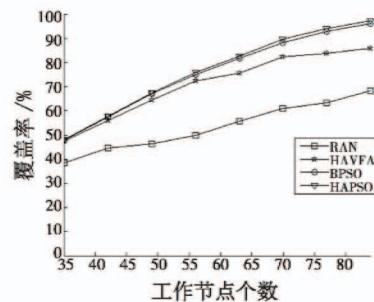


图 4 算法覆盖率对比

Fig.4 Coverage effects of different algorithms

由图 4 中的覆盖率曲线可以看出,提出的异构性适用粒子群算法具有较好的覆盖效果,始终高于 HAV-FA 算法,且较基本粒子群算法有着一定的提高。

4.2 粒子数对算法影响

粒子数是影响粒子群算法效果的一个重要因素,粒子数越多,算法的寻优性能越好,但其计算复杂度也会越大,现采用不同的粒子数,运行基本粒子群算法和本文改进的算法,得到效果如图 5 所示。

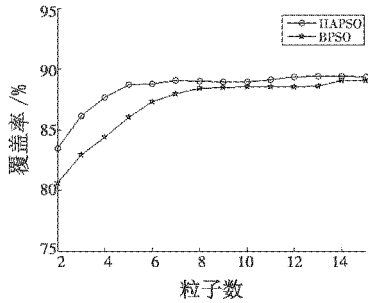


图 5 粒子数对粒子群算法的影响

Fig. 5 Effects of particle quantity

由图 5 中曲线可以看出,粒子数并不用选取太多就能达到较好的效果,在采用相同参数的情况下,基本粒子群算法选用 9 个粒子,异构性适用粒子群算法选用 6 个粒子,就能基本达到最优效果。

4.3 算法收敛性

算法的收敛性表示算法达到最优效果的速度,快速地收敛和到达峰值的稳定性,是优秀算法的特点。在同一初始部署下,对不同算法每次迭代后的网络覆盖率进行记录,得到的效果如图 6 所示。

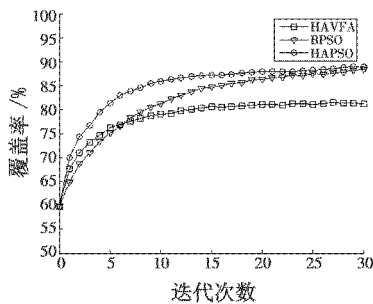


图 6 算法收敛性对比

Fig. 6 Convergence properties of the algorithms

由图 6 可以看出, HAPSO 算法较 BPSO 算法具有更快的收敛性,这是因为本文提出的 HAPSO 算法中使用了异构性适应策略,加强了小型节点的机动性,并且采用了优先跟踪上次最优粒子的策略。

4.4 节点移动距离对比

移动节点调整策略中,节点移动距离大小会严重影响节点的剩余能量多少,节点移动距离越少越能够节省更多的能量,这就要求算法要尽量避免无效移动。采用不同节点数量,分别运行 3 种算法,取 20 次平均

值,记录节点的移动距离情况,如图 7 所示。

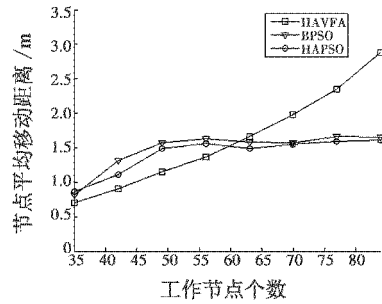


图 7 节点平均移动距离对比

Fig. 7 Average node distances of different algorithms

由图 7 可以看出,在节点数量由稀少增加到饱和的过程中,3 种算法下,节点的平均移动距离都在增大,而在由饱和到过剩的过程中,粒子群算法的节点平均移动距离不再明显增大,而虚拟力算法则会一直增加,这是由于,在节点过多的情况下或在算法后期,虚拟力算法中的节点会一直在做往返移动,造成节点能量的浪费和覆盖率振荡。

5 结束语

异构传感器网络的部署较为复杂,在参考同构传感器网络的部署策略时,要针对异构性进行改进,以进一步提高网络的覆盖性能及资源利用率。本文提出的异构性适用粒子群算法,在基本粒子群算法的基础上,加入一些新的策略,更好地适应了网络的异构性,提高了网络的性能。但在异构传感器网络的部署问题中,还有更多影响网络性能的因素,如异构节点的比例大小,不同感知范围节点能耗速度快慢及其初始携带能量的多少,都会对网络覆盖性能及网络的寿命产生影响,这些是下一步研究需要考虑的问题。

参考文献

- [1] 秦宁宁,张林,徐保国. 异构传感器网络覆盖势力剖分算法[J]. 电子信息学报, 2010, 32(1): 189-194.
- [2] 孙力娟,魏静,郭剑,等. 面向异构无线传感器网络的节点调度算法[J]. 电子学报, 2014(10): 1907-1912.
- [3] GUAN Z Y, WANG J Z. Research on coverage and connectivity for heterogeneous wireless sensor network[C]// The 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2012), 2012: 1239-1242.
- [4] GUPTA H P, RAO S V, VENKATESH T. Analysis of the redundancy in coverage of a heterogeneous wireless sensor network[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013: 1904-1909.

(下转第 63 页)

该方案充分利用规范开放性、可扩展性的特点,设计了自定义窗体部件及其参数接口,并设计了一种新的显示项类型,它能依据 DF 文件中的设置信息以及 UA 指令中的配置信息,组合出复杂的目标符号。该设计已应用于某先进飞行仿真实验室座舱仿真平台。实践证明,该设计合理,运行可靠,在不增加 CDS 内存占用率和通信指令的基础上,大大减小了预定义符号库以及 DF 开发者的工作量,同时也便于后期维护,且安全、高效。

随着综合化航空电子系统飞速发展,基于 ARINC661 的座舱显控系统将会应用于越来越多型号的飞机,本文研究设计的基于 ARINC661 的座舱显控系统目标符号显控方案,将为今后座舱显控技术的研究提供有效的参考。

参考文献

- [1] Airlines Electronic Engineering Committee. ARINC661-5 cockpit display system interfaces to user systems[S]. Annapolis: Aeronautical Radio, INC, 2013.
- [2] BARBONI E, NAVARRE D, PALANQUE P, et al. A formal description technique for interactive cockpit applications compliant with ARINC specification 661[C]//The 2th International Symposium on Industrial Embedded Systems, 2007:250-257.
- [3] 丁毅,王辉,马慧芳.符合 ARINC661 规范的 DF 文件生成技术的研究与应用[J].航空电子技术,2014(3):46-51.
- [4] 高忠杰,胡潇.基于 ARINC661 的通用图符显示管理软件性能优化[J].航空电子技术,2012(4):31-33.
- [5] 周德新,张婧瑜.基于 ARINC661 规范的平视显示器显示技术研究[J].计算机测量与控制,2015,23(3):927-929,932.
- [6] NAVARRE D, PALANQUE P, BASNYAT S. A formal approach for user interaction reconfiguration of safety critical interactive systems[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5219:373-386.
- [7] 钱雪佳,孙永荣,袁磊,等.基于 ARINC661 的座舱显示系统通信机制研究[J].测控技术,2013,32(10):105-108.
- [8] 黄鸣丰,孙永荣,孙旭东,等.航空座舱显示系统内核设计研究[J].现代电子技术,2011,34(19):205-207.
- [9] 郑澄,孙永荣,王晖,等.基于 ARINC661 的触摸屏显控系统研究与设计[J].电光与控制,2015,22(4):62-65.
- [10] 杜晓玉,孙力娟,郭剑,等.异构无线传感器网络覆盖优化算法[J].电子与信息学报,2014(3):696-702.
- [11] 肖甫,王汝传,孙力娟,等.一种面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强算法[J].电子学报,2012,40(1):167-172.
- [12] 顾晓燕,孙力娟,郭剑,等.一种有向传感器网络改进粒子群覆盖增强算法[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2011,23(2):214-219.
- [13] LI Z M, LEI L. Sensor node deployment in wireless sensor networks based on improved particle swarm optimization[C]//IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Chengdu, 2009:215-217.
- [14] HUANG Z H, LU T J. A particle swarm optimization algorithm for hybrid wireless sensor networks coverage[C]//IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EEESYM), 2012:630-632.
- [15] 张轮,陆琰,董德存,等.一种无线传感器网络覆盖的粒子群优化方法[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(2):262-266.
- [16] 潘泉,程咏梅,梁彦,等.多源信息融合理论及应用[M].北京:清华大学出版社,2013:77-81.

(上接第 44 页)

- [5] YUAN H Y, LIU W Q, XIE J S. Prolonging the lifetime of heterogeneous wireless sensor networks via non-uniform node deployment[C]//International Conference on Internet Technology and Applications (iTAP), 2011:1-4.
- [6] HU N, WU C D, JI P, et al. The deployment algorithm of heterogeneous wireless sensor networks based on energy-balance[C]//The 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013:2884-2887.
- [7] GAO J J, ZHOU J P. Delaunay-based heterogeneous wireless sensor network deployment[C]//The 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012:1-5.
- [8] 李明,石为人.虚拟力导向差分算法的异构移动传感器网络覆盖策略[J].仪器仪表学报,2011(5):1043-1050.
- [9] YOON Y, KIM Y H. An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks[C]//IEEE Transactions on Cybernetics, 2013:1473-1483.