

DOI: 10.7652/xjtuxb201706008

采用主成分策略的传感器网络路由评估算法

刘逵^{1,2}, 刘三阳²

(1. 河南师范大学数学与信息科学学院, 453002, 河南新乡; 2. 西安电子科技大学数学与统计学院, 710071, 西安)

摘要: 针对传感器网络路由在最优性评估过程中呈现的排序问题,提出了一种采用主成分策略的路由评估算法(OREPCA)。首先利用蚁群策略寻找传感器网络中的样品路由;接着再根据实际的布网环境构建出相应的路由评价指标集;然后对样品路由按指标集中各指标出现的顺序进行逐项打分获得评价指标向量;最后借助主成分策略构造一个传输路由综合评价指标函数,从而实现在不同的监测环境中对网络路由的多元化评价,规避了人为选取权重因子带来的主观随意性。仿真结果表明,与基于负载均衡策略的路由优化算法及基于多目标优化的交互式路由算法相比,OREPCA 算法能将网络寿命提高 14%,并能有效降低网络的通信延迟。

关键词: 路由评估;主成分法;蚁群算法;无线传感器网络

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)06-0047-07

Optimal Route Evaluation Method Based on Principal Component Analysis for Wireless Sensor Networks

LIU Kui^{1,2}, LIU Sanyang²

(1. College of Mathematics and Information Science, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China;
2. College of Mathematics and Statistics Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel optimal route evaluation method based on principal component analysis (OREPCA) is proposed to solve the transmission route sequencing problem appeared in the optimality evaluation process of wireless sensor networks. Sample routes information is firstly collected in a discrete time domain by using an ant colony algorithm. Then, a relevant evaluation index system of routes is constructed based on the deployment environment of the network, and a positive dimensionless method is given and is applied to the indicators of the set. The priority of all indicators is used to score each sample route and to obtain a vector of evaluation indicators. Finally, a correlation coefficient matrix among different indicators in the vector is calculated, and the principal component approach is used to obtain a route evaluation function and the weighting factor of each evaluation indicator in the function. The algorithm avoids the problem of subjective randomness caused by manually selecting weighting factors based on experience. Moreover, the evaluation function generated by the proposed method achieves the diversified evaluation and prompts dynamic server load balance in different monitoring environments. Comparisons with the multi-objective routing algorithm and the cluster based route optimisation and load balancing

protocol, OREPCA can increase the lifetime of network by 14% and put down the delay of communication notably.

Keywords: route evaluation; principal component analysis; ant colony algorithm; wireless sensor network

无线传感器网络中传输路径的性能^[1-6]是各类应用系统能否成功部署的关键,因此如何解决大规模无线传感器网络中最优路由的选择问题已成为当前研究的热点。一个好的路由评估方法能够促使传感器节点选择出可均衡网络能耗、通信负载及传输延迟的最优路由,从而有效提升路由协议的执行效率,延长网络的寿命。众所周知,最小路由能耗和均衡节点间的通信负载是路由评估策略中的两大准则;最小路由能耗准则可以促使查询信标去探索未知区域从而找到网络中的最短路由;均衡节点间的通信负载可以促使查询信标在寻路的过程中避开业务繁忙的关键节点,从而防止关键节点过度使用而引起网络提前断裂。事实上,最小路由能耗准则和均衡节点间的通信负载准则是相互冲突的,因此为了得到更好的路由评估结果,这两个评估准则就必须实现很好的平衡。

近年来,越来越多的学者开始关注无线传感器网络路由评估问题。Shah 是最早涉足最优传输路由评估的学者,他提出一种 EARP 策略来解决无线网络中的数据传输问题^[3],EARP 策略的基本思想是利用源节点与基站之间的分割线作为导向去选择下一跳最佳传输节点。文献[4]利用区域分解给出了一种负载均衡路由(DMSR)算法,该算法仅利用节点位置信息而不综合全网负载就完成对监控区域的分块,因此具有一定的局限性。Hammoudeh 提出了一种基于负载均衡策略的路由优化(ROL)策略^[6],该策略利用不同优先级的评价指标对网络路由进行综合打分,并从中选择一个得分最高的路由作为最优路径。借助权重分析法,Wang 将最优数据传输问题转化成寻找下一跳最优节点问题(NFP)方法^[7],但 NFP 方法仅仅依据实践经验就确定了各指标权重因子的大小,因此评估结果的精确性难以保证。在文献[8]中,Liu 提出了一个路径最优度函数,利用它来判定最优路时可以兼顾传输路径上各节点的剩余能量和传输路径上的总能耗,但该文献也未给出最优度函数中各权重因子取值大小的理论依据及求解过程,因此布网环境的多样性将大大降低算法的普适性。文献[9]提出了一个求解帕累托最优路径的多目标规划路由算法,但该算法仅考虑

了路由能耗和通信延迟两种指标,因此对网络路由的评价过于理想化。文献[10]基于多目标优化提出了一个集中式路由算法(MORA),该算法的创新点在于首次提出要考虑各评估指标内在的关联性,避免传输路由的某些特性被重复评价,而造成评估结果的不准确,但集中式算法并不适合无线传感器网络。

针对现有路由评估算法评价指标单一、量化不足及普适性差的问题,本文提出了一种采用主成分策略的传感器网络最优路由评估算法(OREPCA),该算法首先利用蚁群策略^[11]寻找网络中的样品路由;然后再根据实际的布网环境构建出相应地路由评价指标集,并据此对样品路由进行逐项打分求得评价指标向量;最后借助主成分^[12-14]策略构造一个传输路由综合评价函数,从而实现在不同的监测环境下对网络路由的多元化评估,解决数据传输过程中的最优路由选择问题。

1 样品路由搜寻机制

蚁群算法因具有自组织和自动寻优的特性,尤其适合应用于同样具有动态、自组织特点的无线传感器网络中进行传输路径的建立和维护。通过在查询信标中加入一段特殊的代码使其具有蚂蚁的特性,然后将源节点看作为蚁巢,将基站看作为食物,就可将查询信标在网络中寻找传输路由的问题转化成蚂蚁从巢穴出发寻找食物源的过程。在寻路的过程中,查询信标需携带如下信息:①路由信息字符串,该字符串记录了信标途经各节点的 ID 号;②能量向量,该向量记录了查询信标途经各节点的剩余能量;③占用带宽,用来记录查询信标途经各链路的已占用带宽;④链路长度,用来记录查询信标途经各链路的长度;⑤通信延迟,用来记录查询信标的通信时延;⑥路由总能耗,记录寻路信标从源节点出发到达当前节点所需的路由总能耗。当一个蚂蚁寻路结束后,就开始下一个蚂蚁的寻路过程,依次类推,直到取样周期结束,即得到了样本路由集。寻路流程的伪代码如下。

/Ant k come from the node v to node i /

1 if ant k arrives to the node i ;

```

2   calculate the visit probability of the nodes
   store in the neighbor information table of
   node  $i$ ;
3   if the ID of node  $j$  appeared in route table
   which used to store the ID of nodes passed
   through by ant  $k$ 
4       the probability of node  $j$  chosen as the
       next hop node of ant is set to 0;
5   else if node  $j$  is far away from the station
   than node  $i$ 
6       the probability of node  $j$  chosen as the
       next hop node of ant is set to 0;
7   else
8       the probability of the remaining node chosen
       as the next hop node of ant is calculated
       according to pheromones concentration;
9   end
10  ant  $k$  utilizes pseudorandom generator technology
   to choose next hop node;
11  randomly generated a number  $q$  between 0
   and 1;
12  if  $q$  is no larger than threshold value  $q_0$ 
13      ant  $k$  chooses the maximum visit probability
       node  $j$  as the next hop node;
14  else
15      ant  $k$  randomly chooses a node whose visit
       probability is not equal to 0 as the next
       hop node;
16  end
17  node  $i$  updates local pheromones;
18  ant  $k$  utilizes the information extracted
   from node  $i$  to update the data store in
   neighbor information table;
19  ant  $k$  arrives to the static sink  $u$  by repeating
   the above steps, and then update global
   pheromones;
20  end

```

2 主成分分析

随着对无线传感器网络研究的不断深入,路由评价指标也越来越多。目前应用较广泛的评价指标有路由长度、链路延迟、路由跳数、占用带宽及途经节点能耗值等。虽然不同的指标对路由评价的侧重

点不尽相同,但是它们之间会存在不同比例的信息关联,这种信息关联会造成对传输路由某些特性的重复评价,进而影响评估结果的精确性。主成分法^[13]是一种多元统计分析方法,可以通过分布检测、模糊估计等手段,有效提取数据背后隐藏的结构及规律。其他降维算法如基于神经网络的非线性降维方法等,由于计算复杂度及空间复杂度较高,所以不利于传感器节点的硬件实现。因此,为了挖掘路由评价指标间的内在关联性,本文借助主成分法描述融合多元统计评价指标向量,实现对评价指标间关联性的全面平衡,进而保证对网络路由的多元化评估。

根据实际的布网环境和网络操控者的具体性能要求,设定传输路由评价指标集 $\mathbf{X}$ 里含有 m 个元素,分别为 $x_1, x_2, \dots, x_m$,为便于评估,将这些评价指标做正向无量纲化处理。记 $S_R = 1, 2, 3, \dots, n$ 为在离散时间域内收集到的 n 条样品路由。对每条样品路由按评价指标集中各指标出现的顺序进行逐项打分,求其对应的评价指标向量 $\mathbf{A}_t = (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tm})$,其中 $t \in S_R$ 为样品路由的标号;然后利用这 n 个 m 维向量 $\mathbf{A}_t$ 来构造评价指标矩阵 $\mathbf{A}$,即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

以指标为单位,将评价指标矩阵 $\mathbf{A}$ 中各列记录的同—指标数据按下式进行标准化处理

$$y_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j \quad (1 \leq t \leq n, 1 \leq j \leq m) \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_j$ 表示评价指标矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 j 列元素对应的均值; S_j 为第 j 列元素对应的标准差。记标准化处理后的评价指标矩阵为 $\mathbf{Y}$,其表达式如下

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用经标准化处理后的矩阵 $\mathbf{Y}$ 来计算指标间的协方差矩阵,即相关系数矩阵 $\mathbf{R}$,计算公式如下

$$\mathbf{R} = \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $r_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{ki} y_{kj}$, $i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

求相关系数矩阵 R 的特征值及特征向量, 记矩阵 R 的特征向量分别是 $\alpha_1 = [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m}]^T$, $\alpha_2 = [a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m}]^T$, $\dots$, $\alpha_m = [a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mm}]^T$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ 则是相对应的特征值。由于矩阵 R 是标准化的实对称阵, 所以 α_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 是相互正交的 m 维向量。同时, 由主成分的定义可知, 原始评价指标向量 A_i ($i \in S_R$) 对应的主成分分别为 $F_i = (\alpha_{i1} x_1, \alpha_{i2} x_2, \dots, \alpha_{im} x_m)$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

构造前 k 个主成分的复合评价向量 F , k 值越大, 即选取的主成分越多, 则意味着复合主成分向量 F 保留的原始数据信息也就越多。确定选取主成分个数的具体准则是: 根据预设的累计贡献率动态决定选取主成分的个数, 进而可以获得不同评估精度要求的数据压缩比。由主成分法可知, F_i 对保留原始数据特征的贡献率为

$$w_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (5)$$

则前 k 个主成分保留原始数据特征的累计贡献率为

$$w = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (6)$$

通常, 当累计贡献率达到 85% 时, 前 k 个主成分就已保留了原有评价指标向量的几乎全部特征, 此时复合主成分向量 F 可表示为

$$F = \lambda_1 F_1 / \sum_{i=1}^k \lambda_i + \lambda_2 F_2 / \sum_{i=1}^k \lambda_i + \dots + \lambda_k F_k / \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (7)$$

由于向量 F 保留了原有评价指标向量的几乎全部特征, 因此可使用复合主成分向量 F 构造一个新的路由评估函数 D (D 取值越小, 则待评估路由就越优)。评估函数 D 的表达式如下

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i a_{i1}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} x_1 + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i a_{i2}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} x_2 + \dots + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i a_{im}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} x_m \quad (8)$$

3 OREPCA 路由评估算法

为了避免评估函数引发重复评价的现象, 本文借助主成分法来估算函数 D 中各评价指标的权重因子。在估算的过程中根据预设的累计贡献率动态决定选取主成分的个数, 进而获得不同评估精度要求的数据压缩比, 具体操作流程如图 1 所示。

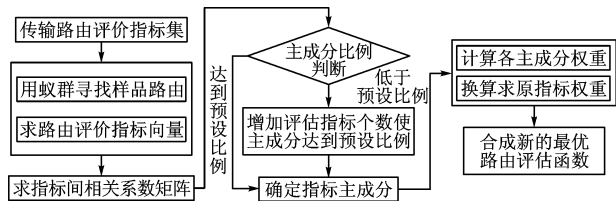


图1 OREPCA 路由评估算法流程图

步骤 1 根据实际布网环境构建相应地路由评价指标集, 并对各指标做正向无量纲化处理;

步骤 2 借助蚁群算法寻找网络中的样品路由, 同时对样品路由按指标集中各项指标出现的顺序进行逐项打分, 求得样品路由的评价指标向量;

步骤 3 构造评价指标矩阵 A , 然后将矩阵 A 标准化处理后计算指标间的相关系数矩阵 R ;

步骤 4 计算矩阵 R 的特征值及相应的特征向量, 然后借助主成分法计算评价指标向量的主成分 F_i 及其权重 w_i ($1 \leq i \leq m$), 并根据预设比例确定拟提取的主成分个数 k , 最后按公式(8)构建新的最优传输路由评估函数 D ;

步骤 5 全网节点均按该评估函数 D 进行路由评估, 从而确定各传输节点间的最优路由。

4 仿真实验

利用 NS-2 仿真工具随机生成一个无线传感器网络, 网络的 MAC 协议采用载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)机制。网络的监察区域是一个边长为 400 m 的正方形, 区域内共随机部署了 100 个传感器节点。节点的初始能量为 7 J, 通信半径为 20~50 m, 侦察半径为 20 m。节点通信能耗模型^[5]中的参数设置如下: 发送和接收功耗 $E_{\text{elec}} = 50$ nJ/bit, 自由能量模型下的功率放大损耗 $\zeta_{\text{fs}} = 100$ pJ/(bit · m²), 多路径衰减模型下的功率放大损耗 $\zeta_{\text{mp}} = 0.013$ pJ/(bit · m⁴)。实验过程中网络内共随机产生 70 个事件。当网络中有事件发生时, 事件域内的传感器节点需将采集到的数据信息及时传送至基站。当网络中无事件发生时, 传感器节点之间无需通信。同时, 假定事件域内感知节点产生数据包的速率为 3 包/s, 数据包的大小为 1×10^4 bit。为了验证本文所提算法的可靠性, 将本文所提最优传输路由评估算法(OREPCA)与文献[3]提出的能量多路径策略(EARP)、文献[6]提出的基于负载均衡策略的路由优化算法(ROL)和文献[10]提出的基于多目标优化的交互式路由算法(MORA)进行了仿真比较, 测试指标包括网络寿命、通信延迟、传输成功

率、基站收集到的数据包总数、最优路由的平均跳数和收集到的每个数据包的平均能耗。

当前,无线传感器网络中常用的评价指标有路由长度、通信延迟、路由能耗、链路带宽、路由跳数、链长方差、占用带宽及途经节点能耗等。不同的指标对网络路由评价的侧重点不尽相同,因此网络操控者需要根据实际的布网环境和具体的性能要求组建出相应的路由评价指标集。由于仿真实验中所用的传感器网络为事件驱动型网络,因此实验中所用的评价指标集包含如下指标:通信延迟、路由能耗、途经节点能耗、路由跳数、链长方差及占用带宽。仿真实验首先测试了不同寻路机制下无线传感器网络寿命的对比情况;测试过程中记网络内不同比例的传感器节点失效时刻为各寻路机制在不同阶段对应的网络寿命。在实验过程中,若所选路径上某个节点没有接收和转发数据的能力,则将其标注成失效节点,并重新寻路。

图 2 给出了 4 种算法的网络寿命。由图 2 可知:与 MORA 相比,本文 OREPCA 算法可将网络寿命延长 7%~12%;与 ROL 相比,本文算法的网络寿命可延长 9%~14%;与 EARP 相比,本文算法的网络寿命可延长 80%~97%。这是因为:OREPCA 算法可以均衡网络中各节点的能耗,避免关键链路过度使用而引发网络提前断裂;由于 EARP 策略仅以传输距离作为寻找前行中转节点的准则,因此该策略将会导致关键节点过早耗尽自身能量而引发网络提前断裂现象;ROL 算法根据不同的应用需求来设定各评价指标的优先性,这种主观随意性降低了所选路由的最优性,因此过多使用这种低精度的传输路由会促使网络过早陷入到路由空洞中去,进而降低网络寿命。

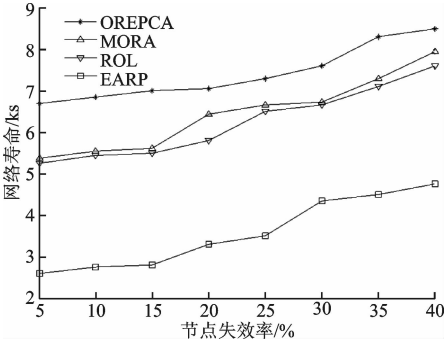


图 2 4 种算法的网络寿命

接着,测试了不同比例的节点失效时各寻路机制下基站收集到数据包总数的对比情况。图 3 给出了各寻路机制下基站收集到数据包总数的对比情

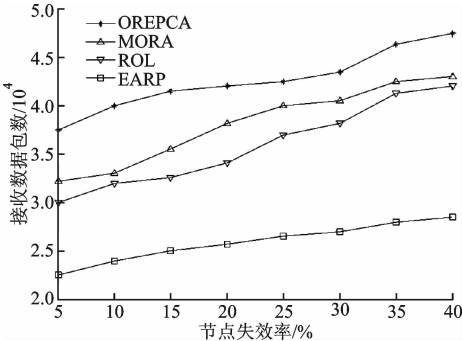


图 3 不同算法下基站收集到数据包总数的对比情况

况。图 3 表明,由于采用本文 OREPCA 算法可有效延长网络寿命,因此利用该算法为网络采集到的数据包寻找最优路由进行传输时,可明显增加基站接收到数据包的总数。然后,仿真测试了不同寻路机制寻找到的最优路由的平均跳数对比情况及基站收集每个数据包所消耗的平均能量对比情况。

图 4 描述了不同算法的寻路机制寻找到的最优路由的平均跳数对比情况。从图 4 可以看出,随着网络运行时间的推移,各寻路机制对应的最优路由的平均跳数快速增大,但由于 OREPCA 算法可以均衡网络中各节点的通信负载,避免关键节点过度使用而引发其过早死亡,因此该算法可以降低网络直径的增长速度,进而减缓路由长度的增长速率。由于 EARP 策略会过早地引发网络断裂现象,因此随着网络运行时间的推移,EARP 策略会促使网络直径急剧增长,进而加大网络内传输路由的平均跳数。

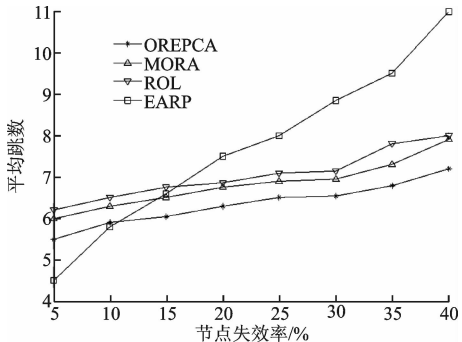


图 4 不同算法下最优路由的平均跳数

图 5 描述了不同算法的寻路机制下网络收集一个数据包所耗的平均能耗。由于 OREPCA 算法采用了一种能均衡路由上各节点能耗及网络总能耗的评定法则,因此该算法找到的传输路径总是具有跳距均匀、跳数适中的特性。这一路由特性有利于减少网络的传输失误,进而降低基站收集数据包的平均能耗。

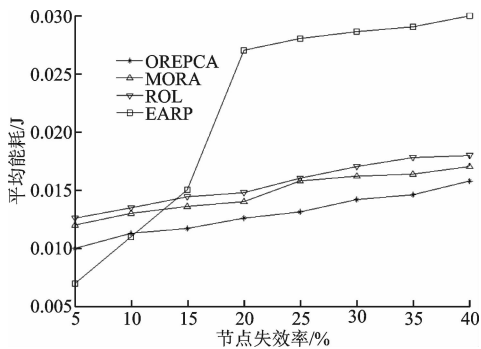


图 5 不同算法收集每个数据包的平均能耗

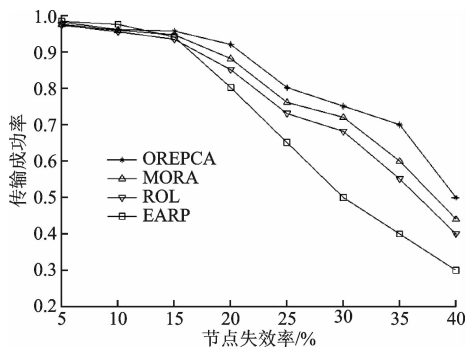


图 7 不同算法的寻路机制下数据包的传输成功率

最后,仿真测试了各寻路机制下,网络对应的通信延迟及数据包传输成功率情况,如图 6、图 7 所示。由图 6 可知,各算法的通信延迟均随着网络内节点失效率的增加而迅速恶化。产生这种状况的主要原因是:网络直径会随着失效节点比例的增加而增加,而网络直径的增加将会拉长网络中的传输路由,进而加大网络的平均通信时延,但 OREPCA 算法对应的通信延迟增速最为缓慢,这是因为该算法可均衡网络负载,延长网络中关键节点的寿命,推迟网络直径急剧增长的时刻,进而达到减小网络通信延迟的目标。

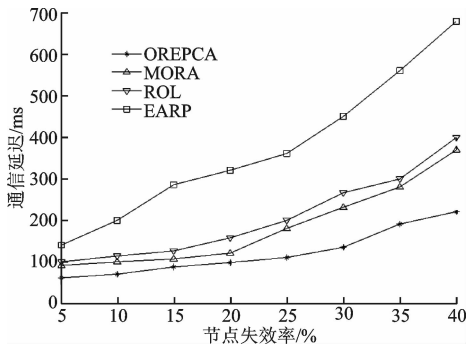


图 6 不同算法的通信延迟

与 OREPCA 算法相比,MORA 算法和 ROL 算法均会不同程度的诱发网络产生路由空洞现象,该现象会增加传输路径的平均链路长度,进而延长网内数据的通信时延。EARP 策略则是因为其过早地引发网络断裂,而造成了网内通信时延的急剧恶化。

图 7 描述了不同算法的寻路机制下数据包传输成功率的对比情况。由图 7 可知,网络中数据包的传输成功率随着节点失效个数的增加而快速下降。这是因为传输失误会随着网络直径的增加而迅速恶化,但由于 OREPCA 算法降低了数据包的平均传输跳数,因此也就相应地提高了数据包的传输成功率。

为了验证本文所提算法在不同应用场景下的自

适应性,现分别在目标跟踪场景下及环境监测场景下对 OREPCA、EARP、ROL 和 MORA 算法进行仿真比较,网络规模及相关参数的设置不变。在目标跟踪场景下选用的路由测试指标集包含如下指标:通信延迟、路由跳数、链长方差及占用带宽;在环境监测场景下选用的路由测试指标集包含如下指标:路由能耗、途经各节点能耗、路由跳数、链耗方差。测试结果如表 1 所示(表中数据为网络内节点死亡率达到 20% 时所得)。由表 1 结果可知,OREPCA 可以根据实际的布网环境及网络操控者的具体性能要求构造出相应的评价指标集,进而保证所合成的路由评估函数具有良好的自适应性。

表 1 不同场景下各算法的自适应能力测试

算法	网络寿命/s		通信延迟/ms	
	目标跟踪	环境监测	目标跟踪	环境监测
OREPCA	4 732	8 644	72	257
MORA	4 316	7 968	96	286
ROL	4 451	7 675	107	297
EARP	3 255	3 255	315	315

5 结 论

提出了一种应用于无线传感器网络的最优传输路由评估算法——OREPCA。实验表明,本文算法可以根据实际的布网环境及网络操控者的具体性能要求构造出相应的评价指标集,进而保证所合成的路由评估函数具有良好的普适性,同时还可可在不同的评估精度要求下,根据预设比例动态调整选取主成分的个数,进而获得不同评估精度要求的数据压缩比,促使所提路由由评估函数具有更好的可调性。

参考文献:

[1] ZHANG Degan, LI Guang, ZHENG Ke, et. al. An energy-balanced routing method based on forward-

aware factor for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2010, 10(1): 63-83.

[2] 孙泽宇, 伍卫国, 曹仰杰, 等. 无线传感器网络中能量均衡参数可控覆盖算法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 77-83.

SUN Zeyu, WU Weiguo, CAO Yangjie, et. al. EB-PCC: energy balance parameters controlled covering algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 77-83.

[3] SHAH R, RABAEY J. Energy aware routing for low energy Ad Hoc sensor networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference for Wireless Communications and Networking. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 350-355.

[4] KO R S. A load-balancing routing algorithm for wireless sensor networks based on domain decomposition [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 30(4): 63-83.

[5] ZHU Yihua, SHEN Dandan, WU Wandeng, et al. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1041-1045.

[6] HAMMOUDEH M, NEWMAN R. Adaptive routing in wireless sensor networks: QoS optimization for enhanced application performance [J]. Information Fusion, 2015, 22(1): 2-15.

[7] WANG Kun, GAO Hui, XU Xiaoling, et al. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4051-4061.

[8] 刘逖, 刘三阳, 冯海林. 双信道无线传感器网络移动代理路由算法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 113-118.

LIU Kui, LIU Sanyang, FENG Hailin. A mobile agent combination optimization routing algorithm in dual-channel wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 113-118.

[9] XUE F, SANDERSON A, GRAVES R. Multi-objective routing in wireless sensor networks with a differential evolution algorithm [C]// Proceedings of IEEE International Conference for Networking, Sensing and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 880-885.

[10] MAGAIA N, HORTA N, NEVES R. A multi-objective routing algorithm for wireless multimedia sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2015, 30(5): 104-112.

[11] MARCOD T. Ant colony optimization [M]. Cambridge, MA, USA: MIT press, 2006: 49-59.

[12] BERTRAND A, MOONEN M. Distributed adaptive estimation of covariance matrix eigenvectors in wireless sensor networks with application to distributed PCA [J]. Signal Processing, 2014, 104(2): 120-135.

[13] YIN Yihang, LIU Fengzheng, ZHOU Xiang, et. al. An efficient data compression model based on spatial clustering and principal component analysis in wireless sensors networks [J]. Sensors, 2015, 15(8): 19443-19465.

[14] JOLLIFFE I T. Principal component analysis [M]. New York, USA: Springer Verlay New York Inc., 2010: 338-372.

(编辑 刘杨)

(上接第 46 页)

[13] 陈树勇, 戴慧珠. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.

CHEN Shuyong, DAI Huizhu. Reliability model of wind power plants and its application [J]. Proceedings of Chinese Society of Electrical Engineering, 2000, 20(3): 26-29.

[14] 王钊, 潘险险, 陈迎, 等. 基于实测数据的风电场风速-功率模型的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 23-27.

WANG Qian, PAN Xianxian, CHEN Ying, et al. Study of wind speed-active power model for wind farm based on measured data [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 23-27.

[15] 黄海煜, 于文娟. 考虑风电出力概率分布的电力系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2585-2591.

HUANG Haiyu, YU Wenjuan. Power grid reliability assessment considering probability distribution of wind farm power output [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2585-2591.

(编辑 刘杨)