

## 基于能量因素的无线传感器网络关键节点判定算法

刘彬 王文吉\* 李雅倩 尹荣荣 韩涛  
(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要:** 无线传感器网络中关键节点的判定对网络抗毁性研究具有重要作用。考虑到节点能量受限, 该文综合节点剩余生命期和节点“移除”导致的网络能耗值增加, 提出一种将能量因素作为衡量节点重要程度的关键节点判定算法(CNDBE), 解决了能量受限的无线传感器网络关键节点判定问题。实验结果表明, 在对基于 CNDBE, 最短路径树算法(SPT)和能量感知的关键节点生成树算法(ENCAST)判定得到的关键节点进行保护时, CNDBE 具有更强的网络抗毁性和更长的网络生命期。

**关键词:** 无线传感器网络; 关键节点判定; 剩余生命期; 抗毁性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1728-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01066

## Crucial Node Decision Algorithm Based on Energy in WSNs

Liu Bin Wang Wen-ji Li Ya-qian Yin Rong-rong Han Tao

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Crucial node decision plays an important role during the network survivability study. Taking into account the node energy is limited, this study consider both the remaining life of the network and the added value of network energy consumption due to the node failure. A Critical Node Decision algorithm Based on Energy (CNDBE) is proposed, the problem which crucial node decision algorithm based on energy is solved. Simulation results show that, when the node which is decided by crucial node decision algorithm based on energy is protected, the network with CNDBE has a better survivability performance and has a longer lifetime when compared with Shortest Path Tree (SPT) and Energy-Critical Node Aware Spanning Tree for sensor networks (ENCAST).

**Key words:** Wireless Sensor Networks (WSNs); Crucial Node Decision (CND); Remaining life; Survivability

### 1 引言

无线传感器网络(WSNs)通常由大量能量有限的节点组成<sup>[1]</sup>, 节点通过多跳方式向位于网络中心的汇聚节点(sink)汇聚信息, 处于关键位置的节点(如靠近 sink 的节点, 本文称为关键节点), 由于需要转发更多的数据导致节点的能耗更快, 这些节点失效会导致周围区域产生能量洞(energy hole)<sup>[2,3]</sup>, 能量洞的出现会使网络连通和覆盖都受很大的影响, 网络的抗毁性降低, 最终导致网络不能满足服务需求而过早瘫痪。因此研究基于能量因素的关键节点判定算法, 对避免能量洞的过早出现以及网络抗毁性的提升, 具有实际意义。

节点重要性评估主要从社会网络和系统科学两方面展开研究<sup>[4]</sup>。基于社会网络分析法, 文献[5]通过计算网络中每个节点度的中心性, 介数中心性,

接近度中心性 3 个指标来确定节点的重要程度; 文献[6]从等价拓扑结构、节点度、介数、接近度、邻居列表的影响 5 方面来评估节点的重要性。它们均取得比单一评价指标更为准确的结果但同时也加大了运算的复杂度。对于能量和运算速度都有限的 WSNs, 上述方法存在局限性。基于系统科学分析方法, 文献[7]利用节点与网络中其他节点的平均等效最短路径数来区分节点的重要性, 提出基于最短路径数的网络抗毁性评价方法; 文献[8]在最短路径数基础上引入高斯函数, 提出了基于拓扑潜能的节点重要性评估方法。它们在一定程度上减少了计算的复杂度, 但是没有考虑相邻列表的影响从而使得评估结果不够精确。针对该问题, 文献[9]综合考虑了节点效率, 节点度值和相邻节点的重要度贡献, 提出了利用重要度评价矩阵来确定网络关键节点的方法, 解决了复杂度高, 评估不准确的问题, 但是没有考虑能量有限的限制条件。基于此, 文献[10]在考虑网络能量因素的基础上提出了更适合多对一 WSNs 的加权最短路径树, 通过加权路径能耗函数

2013-07-19 收到, 2014-02-18 改回

河北省自然科学基金(F20112203179, F2014203239)资助课题

\*通信作者: 王文吉 072027103@163.com

来判定节点是否重要，该算法在一定程度上延长了网络生命期，但是每个节点死亡后都要重建全网的最短路径树，造成了能量的浪费。文献[11]为了避免重复构建最短路径树定义了一系列门限函数，考虑了节点能量的同时根据网络不同的运行周期来选择不同的门限值，达到门限值以下的节点定义为关键节点。但是没有考虑节点的贡献，仅从是否达到门限值来判断节点是否关键，因此判断的关键节点具有盲目性。

基于上述分析，针对如何预先发现关键节点的问题，提出把节点剩余生命期和节点“移除”对网络能耗增加值作为关键节点判定参数的关键节点判定算法，解决了关键节点判定问题的同时兼顾了重复构建路径树浪费能量<sup>[10]</sup>和判定指标单一<sup>[11]</sup>问题，在对基于能量的关键点判定(CNDBE)算法判定的关键节点进行保护时，能够有效提高 WSNs 抗毁性，延长网络生命周期，最后给出 CNDBE 与其他算法的实验比较结果。

## 2 关键节点判定参数的研究

关键节点的判定受到很多因素影响，该文从如何判定关键节点着手，分别从节点剩余生命期和节点的“移除”对网络能耗造成的增加值展开研究。为了便于分析和描述网络模型，把要分析的 WSNs 节点按照到 sink 节点最小跳数的多少依次分层，如图 1 所示。

### 2.1 节点剩余生命期的研究

在研究节点的剩余生命期时引入节点转发概率，文献[12]通过节点的梯度，信道状态，剩余能量来选择节点的数据走向，但是通过节点的梯度会使得一些节点能量消耗较快，因此通过初始能量，剩余能量和拥塞预知度计算转发概率的大小，来确定节点下一跳的数据传输方向，进而计算节点能耗速率，通过节点剩余能量与节点能耗速率的比值来得出节点的剩余生命期。

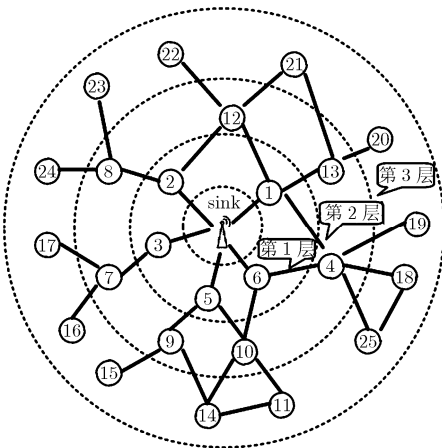


图1 拓扑简图

(1)节点转发概率 节点转发概率用来反映其作为转发节点进行数据传输优先权的大小，定义节点  $i$  的转发概率  $P_F(i)$  为

$$P_F(i) = \frac{(\text{CPD}(i) - 1)^2 E_{re}(i)}{E_{ini}(i)} \quad (1)$$

其中  $E_{ini}(i)$  和  $E_{re}(i)$  分别是节点  $i$  的初始能量和剩余能量。CPD( $i$ )是节点  $i$  的拥塞预知度<sup>[13]</sup>，其值由式(2)确定：

$$\text{CPD}(i) = \frac{\text{deg}(i) - \text{ob}(i)}{\text{deg}(i)} \quad (2)$$

其中  $\text{ob}(i)$  表示节点  $i$  的出境节点个数， $\text{deg}(i)$  表示节点  $i$  的节点度，即如果节点  $i$  发出的信息直接经过节点  $j$  进行转发而最终到达 sink 节点，则节点  $j$  称为节点  $i$  的出境节点<sup>[14]</sup>，节点度为出境和入境节点数之和。

由式(1)可知， $0 \leq P_F(i) \leq 1$ ，节点  $i$  的拥塞预知度 CPD( $i$ ) 越小，其作为转发节点的概率越大，节点  $i$  的剩余能量  $E_{re}(i)$  越大，其作为转发节点的概率越大。

在式(1)的基础上，本文采用节点转发概率的归一化形式，用来区分节点的所有父节点转发该节点数据概率大小(距 sink 节点近端为父节点，远端为子节点)，同时确保了每个节点的数据不重复发送，让较小拥塞预知度和较大剩余能量的节点作为转发父节点的概率相对较大。节点  $k1$  到其中一个父节点  $i$  的归一化转发概率  $P_{(k1 \rightarrow i)}$  用公式表示为

$$P_{(k1 \rightarrow i)} = P_F(i) / \left( \sum_{l=1}^n P_F(l) \right) \quad (3)$$

其中  $P_F(i)$  为节点  $k1$  的父节点  $i$  的转发概率， $\sum_{l=1}^n P_F(l)$  为节点  $k1$  的所有  $n$  个父节点的转发概率和。

(2)节点能耗速率 节点能耗采用通用的无线通信射频能耗模型<sup>[15]</sup>。发送  $k$  bit 数据所需要的能量为

$$E_{TX}(k, d) = E_{elec}k + \varepsilon_{amp}kd^2 \quad (4)$$

接收  $k$  bit 数据所耗费能量为

$$E_{RX}(k) = E_{elec}k \quad (5)$$

其中  $E_{elec}$  表示射频传输系数， $\varepsilon_{amp}$  为发送装置的放大系数， $d$  为节点间的数据传输半径。

节点的能耗速率  $v_E(i)$  为节点  $i$  在一个数据采集周期内(即网络中所有的存活节点将数据汇聚至 sink 节点一次)所消耗的能量。根据节点采用逐层多跳的方式向 sink 节点汇聚数据的特点，结合式(4)，式(5)，节点  $i$  转发子节点数据量为  $E_i$  bit 和发送自身数据量为  $k$  bit 的能耗速率  $v_E(i)$  为

$$\begin{aligned} v_E(i) &= [E_{TX}(E_i, d) + E_{RX}(E_i)] + E_{TX}(k, d) \\ &= E_i [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d) \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $E_i$  为节点  $i$  所有子节点的数据量, 其值为

$$E_i = \sum_{m=1}^n E_m P_{(m \rightarrow i)} \quad (7)$$

根据节点的分层关系,  $E_m$  可由式(8)给出:

$$E_m = \begin{cases} k, & m \text{ 是 } i \text{ 的子节点} \\ 0, & m \text{ 不是 } i \text{ 的子节点} \end{cases} \quad (8)$$

根据节点的邻居列表关系,  $P_{(m \rightarrow i)}$  为

$$P_{(m \rightarrow i)} = \begin{cases} P_{(m \rightarrow i)}, & L(i) = L(m) + 1 \\ \prod_{k=m}^i P_{(k \rightarrow k+1)}, & L(i) \neq L(m) + 1 \end{cases} \quad (9)$$

式(7)表示所有要通过节点  $i$  进行数据转发累积到节点  $i$  的数据量之和为  $E_i$ , 式(8)限制了只有节点  $i$  的子节点才能通过节点  $i$  进行数据传输; 式(9)中  $L(i)$  表示节点  $i$  所在的层, 式(9)表示如果节点  $m$  是节点  $i$  的一跳子节点则其归一化转发概率为  $P_{(m \rightarrow i)}$ , 如果节点  $m$  是节点  $i$  的多跳子节点, 则其到节点  $i$  归一化转发概率为  $\prod_{k=m}^i P_{(k \rightarrow k+1)}$ 。

(3)节点剩余生命期 节点剩余生命期是对节点前一段运行过程中能量消耗值大小的总结和对节点还能维持正常运转多长时间的预测。由式(7)可以得出, 节点的子节点越多, 节点作为父节点进行转发子节点的几率越大, 节点在网络运行过程中能耗速率较快, 节点的剩余能量越少, 节点的剩余生命期相应越短, 节点的存在对于维护网络的正常运行所起到的作用越大。

综上分析, 本文用节点的剩余能量  $E_{re}(i)$  与节点能耗速率  $v_E(i)$  的比值定义为节点  $i$  的剩余生命期  $T_{re}(i)$

$$T_{re}(i) = \frac{E_{re}(i)}{v_E(i)} \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)得

$$T_{re}(i) = \frac{E_{re}(i)}{E_i [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d)} \quad (11)$$

由式(11)可以得出节点转发的数据量  $E_i$  越大, 节点的能耗速率越快, 节点的剩余能量消耗速率越快, 从而节点的剩余生命期相对较短, 节点生命期减小是由节点转发其他节点的数据量多导致的, 节点的剩余生命期从直观上反映了节点还能维持正常运转的次数, 由于网络中越靠近 sink 节点需要转发外层的数据量越大, 因此节点剩余生命期从侧面上反映了节点在网络拓扑结构上的重要性。

## 2.2 节点“移除”对网络的能耗增加值的研究

节点移除是指节点由于自身故障或节点能量耗尽导致的节点死亡。在计算节点移除造成的网络能

耗增加值时, 并未真正移除该节点, 只是在评估节点重要性时刻对其进行屏蔽, 屏蔽过程是短暂的, 因此对网络造成的影响可以忽略不计。

网络能耗增加是由于节点  $i$  “移除”后节点  $i$  子节点到 sink 节点路径(这里用到 sink 节点的最小跳数来度量)变长导致的, 节点“移除”后( $t+1$  时刻)与节点“移除”前( $t$  时刻)相比造成的网络能耗增加值  $E_{ADD}$  用公式表示为

$$E_{ADD} = E_{t+1} - E_t \quad (12)$$

其中  $E_t$  为节点  $i$  的需要进行同层数据传输的所有子节点在  $t$  时刻的能量消耗, 参照式(6)给出节点  $i$  在  $t$  时刻的能耗表达式为

$$E_t = \sum_{s=1}^j E_{s(t)} [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d) \quad (13)$$

其中  $j$  表示节点  $i$  的所有子节点中进行同层数据传输的节点个数,  $E_{s(t)}$  表示节点  $i$  的任意一个进行同层数据传输子节点  $s$  在  $t$  时刻的数据量。

与式(13)类似, 节点  $i$  的子节点在  $t+1$  时刻(即节点  $i$  “移除”后)的能量消耗记为  $E_{t+1}$ 。

$$E_{t+1} = \sum_{s=1}^j E_{s(t+1)} [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d) \quad (14)$$

把式(13)和式(14)代入式(12)得

$$E_{ADD} = \sum_{s=1}^j E_{s(t+1)} [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d) - \sum_{s=1}^j E_{s(t)} [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d) \quad (15)$$

整理得

$$E_{ADD} = \sum_{s=1}^j (E_{s(t+1)} - E_{s(t)}) [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] \quad (16)$$

当  $E_{s(t+1)} - E_{s(t)}$  不为零时, 表示节点  $i$  的子节点  $s$  存在同层邻居节点来进行数据传输, 即节点  $i$  的“移除”会由于  $s$  节点的能耗增加造成网络能耗值的增加。

当  $E_{s(t+1)} - E_{s(t)}$  等于零时, 表示节点  $i$  的子节点  $s$  不存在同层邻居节点来进行数据传输, 即节点  $i$  的“移除”不会由于  $s$  节点的能耗增加造成网络能耗值的增加。

如图1所示, 计算10号节点“移除”后对网络的能耗增加值时, 10号节点“移除”后网络所有通过10号节点进行传输的节点能耗增加表现在其子节点11号节点在数据传输时的能耗增加, 由于14号子节点到sink节点的最短路径数没有变, 所以14号子节点的能耗不会因为10号节点的“移除”而增加。

### 3 关键节点判定算法

对关键节点判定参数研究表明：通过计算节点剩余生命期可以判定节点自身在网络中的重要性；通过计算节点“移除”导致的网络节点能耗增加值来判定节点对整个网络的重要性。综合关键节点判定参数中的节点剩余生命期和节点“移除”导致的网络能耗增加值来评估节点重要性，得出关键节点的判定模型，根据关键节点判定模型推导出关键节点判定算法。

#### 3.1 关键节点判定模型

考虑到节点剩余生命期越小节点越重要；节点的“移除”对网络能耗增加值越大节点越重要，综合式(11)和式(16)，利用比例权值算法<sup>[16]</sup>，给出任意节点  $i$  的重要度  $C_i$  为

$$C_i = \left[ \frac{1}{T_{re}(i)} \right]^\alpha [E_{ADD}]^\beta \quad (17)$$

其中  $1/(T_{re}(i))$  反映了节点剩余生命期在关键节点判定过程中的影响， $E_{ADD}$  反映了节点“移除”对网络能耗增加值在关键节点判定过程中的影响， $\alpha, \beta$  为正常数且  $\alpha + \beta = 1$ 。

将式(11)中的  $T_{re}(i)$  和式(16)中的  $E_{ADD}$  代入式(17)得

$$C_i = \left\{ \frac{E_i[E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] + kE_{TX}(1, d)}{E_{re}(i)} \right\}^\alpha \cdot \left\{ \sum_{s=1}^j (E_{s(t+1)} - E_{s(t)}) [E_{TX}(1, d) + E_{RX}(1)] \right\}^\beta \quad (18)$$

其中  $\alpha, \beta$  分别称为“剩余生命期因子”和“能耗增加因子”，下面分别讨论  $\alpha, \beta$  的取值对关键节点判定的影响：

在讨论  $\alpha$  取值对关键节点判定影响时，为了能够突出体现  $\alpha$  的影响，给  $\beta$  一个远小于  $\alpha$  的常量，根据式(15)可以得出，当  $\alpha$  取值越大时节点剩余生命期在判定关键节点过程中起的作用就越大，即当节点剩余生命期在判定关键节点过程中起主导作用时，判断出的关键节点就会趋向于具有较小剩余能量的节点。

同讨论  $\alpha$  类似，在讨论  $\beta$  取值对关键节点判定影响时，给  $\alpha$  一个远小于  $\beta$  的常量，当  $\beta$  取值越大时节点“移除”对网络能耗增加值的影响在关键节点判定过程中所占的比例就大，即当节点“移除”对网络能耗增加值的影响在关键节点判定过程中起主导作用时，判断出的关键节点就会趋向于具有较大网络能耗增加值的节点。

综上讨论，在对关键节点进行判定时需要根据环境的需要和网络实际运行情况调节  $\alpha, \beta$  的值来改变剩余生命期因素和节点“移除”对网络能耗增加因素在关键节点判定过程中的权值，如果强调优化网络生命周期则  $\alpha$  取值趋向于 1；如果强调优化网络能耗，则  $\beta$  的取值趋向于 1。通过动态调整参数来实现不同偏好需求的关键节点判定。

#### 3.2 关键节点判定算法描述

基于关键节点判定模型推导出关键节点判定算法。每个节点的表头如表 1 所示。

表 1 节点列表的表头格式

节点	同层邻居节点	父子节点	节点剩余能量	节点归一化转发概率	节点重要性
id	$N_{id}$	$F_{id} \& S_{id}$	$E_{re}$	$P_{(k \rightarrow i)}$	$C_i$

具体算法为：

步骤 1 sink 节点进行泛洪广播，来确定各节点所在的层(即节点到 sink 节点的最小跳数)以及各节点的同层邻居节点  $N_{id}$  和父子节点  $F_{id} \& S_{id}$ 。各个节点统计自己的父子节点  $F_{id} \& S_{id}$  和同层邻居节点  $N_{id}$ ，并把信息放入自身内存单元中。

步骤 2 节点通过统计自身的父子节点数进而确定节点的出境节点个数  $ob(i)$  和节点度  $deg(i)$ ，通过式(2)计算出节点的拥塞预知度  $CPD(i)$ ，再根据自身感知的剩余能量  $E_{re}(i)$  和节点初始能量  $E_{ini}(i)$ ，通过式(1)计算出节点转发概率  $P_f(i)$ ，再根据同层邻居节点数便可得到节点归一化转发概率  $P_{(k \rightarrow i)}$ 。

步骤 3 各节点根据归一化转发概率  $P_{(k \rightarrow i)}$  和自

身父子节点数由低层到高层依次统计节点的数据转发量，通过式(6)计算出节点的数据传输速率  $v_E(i)$ ，再根据节点的剩余能量  $E_{re}(i)$  通过式(11)计算出节点的剩余生命期  $T_{re}(i)$ 。

步骤 4 由步骤 2 和步骤 3 得到的节点数据传输速率  $v_E(i)$  和节点的归一化转发概率  $P_{(k \rightarrow i)}$ ，统计节点需要进行同层数据传输的字节节点个数，通过式(13)计算出节点在“移除”前的能耗值  $E_i$ 。

步骤 5 节点“移除”后，重复步骤 1，步骤 2 和步骤 3，通过式(14)计算出节点“移除”后的能耗值  $E_{i+1}$ ，进而通过式(12)得到由于节点“移除”导致的网络能耗增加值  $E_{ADD}$ 。

步骤 6 由步骤 3 得到的节点剩余生命期  $T_{re}(i)$

和步骤 5 得到的节点“移除”导致的网络能耗增加值  $E_{ADD}$ , 根据模型中的式(17)计算出节点的重要度  $C_i$ , 每个节点将自身计算的重要性连同网络 id 发给 sink 节点, sink 节点对所有节点的重要值进行排序。

#### 4 实验仿真与性能分析

节点分布在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的方形区域, 每个普通节点的初始能量为  $1\text{ J}$ , 节点数目设定为 100 个, sink 节点位于区域中心, 实验具体参数见表 2。在

仿真过程中不考虑父节点对子节点的数据进行融合、压缩, 而是直接将其连同自身产生的数据通过归一化转发概率发送给父节点, 仅考虑无线通信能耗, 由于服从幂律分布的网络鲁棒性性好, 故该文在具有幂律分布的网络拓扑结构上讨论网络的性能。首先讨论网络节点的分布方式对性能评估的影响, 然后讨论“剩余生命期因子”  $\alpha$  和“能耗增加因子”  $\beta$  的取值对网络性能的影响, 最后将该理论和其他算法进行比较。

表 2 仿真实验参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
节点分布区 $A$	$100\text{ m} \times 100\text{ m}$	节点初始能量	$1\text{ J}$	节点最大传输半径 $R$	$30\text{ m}$
节点数目 $N$	100	传输速率	250 kbps	发送装置的放大系数	$10\text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$
Sink 节点坐标	(50,50)	射频传输系数	$50\text{ nJ}/\text{bit}$	节点自身产生数据 $L$	4000 bit

首先讨论网络中节点的分布方式对关键节点判定的影响, 该文讨论节点随机均匀分布和高斯分布<sup>[17,18]</sup>两种情况。如图 2, 图 3 所示: 图 2 中网络的节点分布服从均匀分布, 网络的拓扑结构构建过程服从幂律分布; 图 3 中网络的节点分布服从高斯分布, 网络的拓扑构建过程也服从幂律分布。从图 2 可以看出, 网络节点分布均匀, 节点数据由外向内汇聚至 sink 节点, 由于拓扑结构服从幂律分布, 会造成部分节点的度比较大, 导致这些节点转发数据量较大, 形成关键节点。从图 3 构建的高斯分布网络来看, 节点距离 sink 节点近的节点较多, 边缘节点较少。从网络覆盖来看, 造成边缘的地区信息无法被感知, 进而无法将信息汇聚至 sink 节点; 从节点的能耗来看, 在 sink 节点的附近节点较多, 这些节点通过一跳即可将数据传送至 sink 节点, 较少的外围节点也可以通过这些节点将数据传送至 sink 节

点。因此能耗相对均衡, 从网络覆盖和能耗两方面考虑, 关键节点现象在均匀分布的网络比较明显, 因此在下面只对节点均匀分布的网络进行讨论。

随后讨论“剩余生命期因子”  $\alpha$  和“能耗增加因子”  $\beta$  的取值对网络性能的影响, 如图 4 所示, 随着网络的运行, 给出不同  $\alpha$ ,  $\beta$  取值下对网络性能的影响, 从图 4 可以看出, 随着网络的运行, 由于有些节点能量耗尽, 节点剩余生命期均值(左侧 3 维曲面)和网络能耗增加值(右侧 3 维曲面)都呈现下降趋势。在任一时刻节点剩余生命期随着  $\alpha$  取值的增加而增加, 体现了  $\alpha$  对网络生命期的调节作用; 网络的能耗增加值随着  $\beta$  的增加而增大, 体现了  $\beta$  对网络的能耗增加值的调节作用, 但是两者不存在交集即不存在最优值, 所以在网络运行过程中通过调节  $\alpha$ ,  $\beta$  取值来实现判断具有不同需求的关键节点重要性。

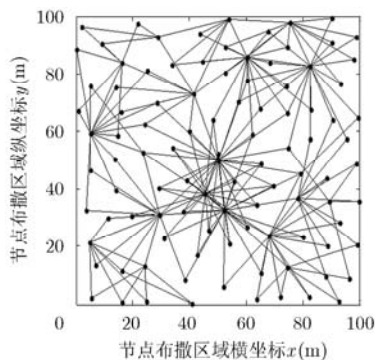


图 2 节点服从均匀分布网络拓扑图

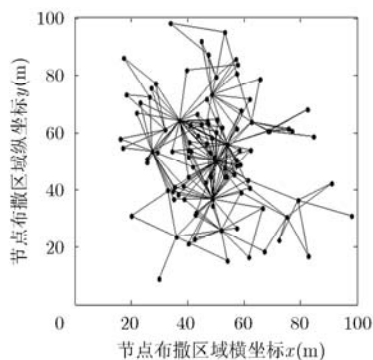


图 3 节点服从高斯分布网络拓扑图

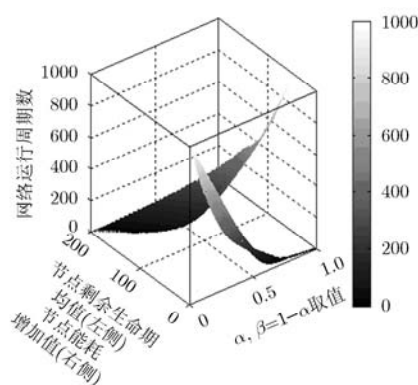


图 4 不同  $\alpha$ ,  $\beta$  取值对网络性能的影响

最后通过 CNDBE 与文献[10]中的 SPT 和文献[11]中的 ENCAST 进行比较, 对该文提出的关键节点判定算法进行评估。统计随机移除节点, 选择性移除节点, 网络随能量耗尽导致节点移除 3 种情况下, 网络最大连通块变化情况(最大连通块为从 sink 节点开始, 从内层到外层的所有与 sink 节点直接或者间接相连的节点数), 用最大连通块节点数的多少来代表网络抗毁性的强弱。

每种情况下保护 5 个最关键节点, 图 5 给出了节点随机移除网络抗毁性变化情况, 每次移除一个节点, 各算法移除相同数目节点, 每个算法中保护由该算法判定的 5 个最关键节点。仿真结果表明, 在对 CNDBE 判定的关键节点进行保护时, 比保护 SPT 和 ENCAST 得到的关键节点, 网络具有更强的抗毁性。原因是 CNDBE 不仅考虑了节点拥塞预知度和剩余能量等因素, 还考虑了节点的移除对整体网络的影响。因此在对关键节点进行保护时, 网络的最大连通块下降相对缓慢。

图 6 给出了节点选择性移除网络抗毁性变化情况(加星号的为按该方法移除关键节点, 未加星号为按该方法保护关键节点), 选择性移除的标准是: 按照各算法对节点重要性进行评估, 按重要性从高到低依次移除节点, 在移除相同数目节点情况下保护由 CNDBE 得到的关键节点比保护按照 SPT 和 ENCAST 得到的关键节点网络具有更大的最大连通块, 即网络表现出更强的抗毁性。在按照节点的

重要性从高到低选择性移除节点时, CNDBE 比 SPT 和 ENCAST 网络最大连通块节点数下降的速度更快, 即按照 CNDBE 对网络进行攻击网络时, 具有了更强的攻击性。原因是 CNDBE 判断的关键节点不仅考虑到了对比算法中关键节点的重要性因素, 还考虑到了潜在的关键因素, 比如度比较小而且处在关键位置的节点, 这些节点一旦能量耗尽, 网络就会分割。

图 7 给出网络随能量耗尽移除节点网络抗毁性变化情况, 能量耗尽移除的模拟方法是: 根据能耗模型, 通过节点的初始能量减去每一轮节点的能耗值, 直到节点的能耗为零为止, 当节点能量为零时, 视为节点失效。如图 7 所示, 在保护相同数目的关键节点时, CNDBE 比 SPT 和 ENCAST 具有更强的抗毁性; 图 8 给出在满足网络服务需求下的生命期对比情况, 在满足网络服务需求的可承受最大失效节点数(图 7 中算法曲线与横轴的交点)相对应的网络生命期对比(图 8 中点划线的交点为算法最大承受失效节点数对应的网络生命期)。结果表明, CNDBE 比 SPT 和 ENCAST 具有更长的网络生命期。原因是 CNDBE 方法在体现能耗因素方面使用了节点剩余生命期这一参数, 节点剩余生命期不仅体现了节点的能耗情况还反映了节点能耗速率, 从而更准确地判断了由能量因素反映的节点重要性, 在保护关键节点时可以提高网络最大连通块的存在时间, 从而可以达到延长网络生命期的作用。

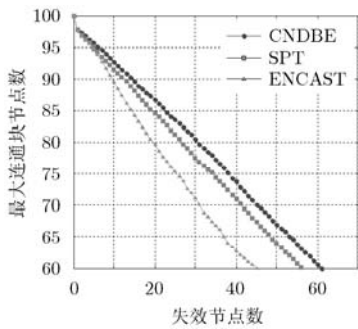


图 5 随机移除节点最大连通块变化情况

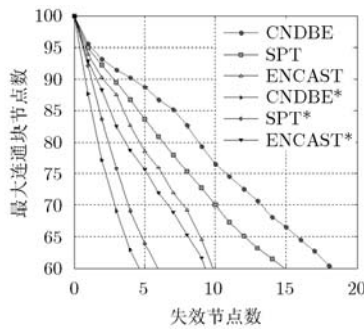


图 6 选择性移除或保护节点最大连通块变化情况

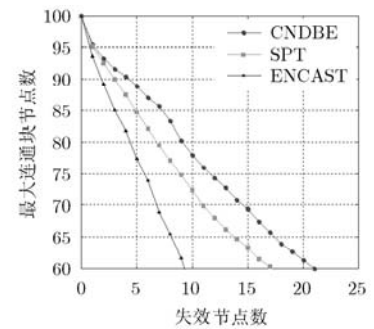


图 7 能量耗尽移除节点最大连通块变化情况

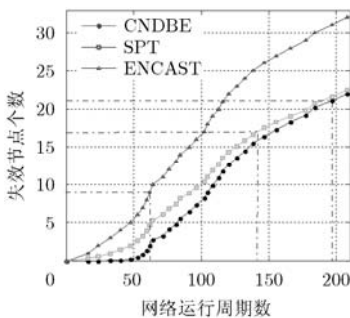


图 8 节点能量耗尽导致失效节点数变化情况

### 5 结束语

该文在分析关键节点判定参数的基础上给出了关键节点判定算法(CNDBE), 该算法从能量因素角度综合考虑了节点剩余生命期和节点“移除”导致的网络能耗的增加值, 通过该算法可以预先发现网络中能量消耗过快和在拓扑结构中处于重要位置的关键节点。仿真验证了在对 CNDBE 判定到关键节点进行保护时, 网络的抗毁性有了很大的提升, 网

络生命期得到了延长。在后续工作中还要对如何保护这些关键节点进行研究。

### 参 考 文 献

- [1] Liu An-feng, Jin Xin, and Gui Guo-hua. Deployment guidelines for achieving maximum lifetime and avoiding energy holes in sensor network[J]. *Information Sciences*, 2013, 230: 197-226.
  - [2] Watfa M K, Al H H, and Salmens S. A novel solution to the energy hole problem in sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(2): 949-958.
  - [3] 宋超, 刘明, 龚海刚, 等. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题[J]. *软件学报*, 2009, 20(10): 2729-2743.  
Song Chao, Liu Ming, Gong Hai-gang, *et al.* ACO-based algorithm for solving energy hole problems in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(10): 2729-2743.
  - [4] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 54-62.  
Yu Hui, Liu Zun, and Li Yong-jun. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 54-62.
  - [5] Yu S S, Ye F, and Chi C. Evaluating node importance in complex network based on Enron database[C]. 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (MCCC), Harbin, China, Dec. 2012: 914-917.
  - [6] Hu Jun, Wang Bing, and Lee De-yi. Evaluating node importance with multi-criteria[C]. Proceedings of the 2010 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications & International Conference on Cyber, Physical and Social Computing, Washington, DC, USA, 2010: 792-797.
  - [7] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. *通信学报*, 2009, 30(4): 113-117.  
Rao Yu-ping, Lin Jing-yu, and Hou De-ting. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(4): 113-117.
  - [8] Wang Teng, Han Yan-ni, and Wu Jie. Evaluate nodes importance in directed network using topological potential[C]. 2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS), Wuhan, China, Dec. 2010: 1-4.
  - [9] 周漩, 张凤鸣, 李克武. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 050201-1-050201-7.  
Zhou Xuan, Zhang Feng-ming, and Li Ke-wu. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 050201-1-050201-7.
  - [10] Bechkit W, Koudil M, Challal Y, *et al.* A new weighted shortest path tree for converge cast traffic routing in WSN[C]. 2012 IEEE Symposium on, Computers and Communications (ISCC), Cappadocia, Turkey, 2012: 000187-000192.
  - [11] Zou S, Nikolaudis I, and Harams J J. ENCAST: energy-critical node aware spanning tree for sensor networks[C]. Proceedings of the 3rd Annual, Communication Networks and Services Research Conference, Halifax, Nova Scotia, Canada, 2005: 249-254.
  - [12] Huang Pei, Chen Hong-yang, Xing Guo-liang, *et al.* SGF: a state-free gradient-based forwarding protocol for wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, DOI: 10. 1145/1498915. 1498920.
  - [13] 郝晓辰, 贾楠, 刘彬. 基于拥塞预知的 WSN 多径寻优路由协议[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(5): 1261-1265.  
Hao Xiao-chen, Jia Nan, and Liu Bin. Multi-path optimizing routing protocol based on predicting congestion for wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1261-1265.
  - [14] Teo Jenn-yue, Ha Ya-jun, Tham C. Interference-minimized multipath routing with congestion control in wireless sensor network for high-rate streaming[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(9): 1124-1137.
  - [15] Heinzelman W R, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2000: 3005-3014.
  - [16] 朱艺华, 沈丹丹, 吴万登. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(5): 1041-1045.  
Zhu Yi-hua, Shen Dan-dan, and Wu Wan-deng. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 1041-1045.
  - [17] Wang Gang and Chen Hong-yang. An importance sampling method for TDOA-based source localization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1560-1568.
  - [18] Chen Hong-yang, Wang Gang, Wang Zi-zhuo, *et al.* Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 108-116.
- 刘 彬: 男, 1953 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.
- 王文吉: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.
- 李雅倩: 女, 1982 年生, 副教授, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.