基于节点可靠度的无线传感器网络拓扑控制算法

刘洲洲[1,2], 彭 寒[2]

(1.西安航空学院 电子工程学院,西安 710077;2.西北工业大学 计算机学院,西安 710072)

摘 要:针对无线传感器网络节点在数据传输过程中易面临能量耗尽和数据拥塞失效的问题,通过构建节点可靠度模型,获得了网络在保证节点可靠度最大且网络生存时间最长的条件下最优节点度的取值。进而依据最优节点度的取值,提出了一种基于节点度调整的无线传感器网络拓扑控制算法(TCNR)。仿真实验结果表明,TCNR算法极大减少了拓扑数据传输过程中的拥塞程度,增强了拓扑结构的健壮性,并有效延长了网络生存时间。

关键词:计算机应用;无线传感器网络;拓扑控制;数据拥塞;能量耗尽

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2018)02-0571-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161348

Topology control algorithm based on node reliability in WSN

LIU Zhou-zhou[1,2], PENG Han[2]

(1.*School of Electronic Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an* 710077, *China*; 2.*School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: During data transmission in Wireless Sensor Network (WSN), the nodes are always faced with the problems of energy depletion and data congestion. To solve these problems, this paper establishes a mathematical model of node reliability, and the optimal value of the node degree is obtained by maximizing the node reliability and the network lifetime. Then, in accordance with the optimal value of the node degree, a Topology Control based on Node Reliability (TCNR) algorithm is put forward. Simulation results show that the TCNR algorithm can greatly reduce the congestion degree in data transmission, enhance the robustness of the topological structure, and effectively prolong the WSN lifetime.

Key words: computer application; wireless sensor networks; topology control; data congestion; energy depletion

0 引 言

无线传感器网络(WSN)作为物联网发展的重要组成部分[1,2],与其他通信网络相比,具有部署规模大、节点冗余度高、分布环境恶劣和节点自身资源有限等特点[3]。对于大规模部署的WSN,良好的拓扑结构是网络生存能力的重中之重[4],也是实现各种网络协议的基础。

当前对于WSN拓扑结构控制算法大多是从节能角度出发考虑的,其中,文献[5]构建了一种

收稿日期:2017-11-28.

基金项目:陕西省自然基础研究计划面上项目(2017JM6096);西安市科技计划项目(2017076CG/RC039(XAHK001)).

作者简介:刘洲洲(1981-),男,在站博士后.研究方向:无线传感器网络.E-mail: nazi2005@126.com

节能拓扑(Energy-aware evolution model, EAEM),节点的择优连接概率不仅仅取决于节点度,还与节点的剩余能量有关。文献[6]在局域世界内建立适应度模型,通过调节节点的适应度因子,最终演化出能耗更均衡的无标度拓扑,更适用于WSN的实际应用。文献[7]构建的拓扑,通过节点的剩余能量限制网络中的最大节点度,有效地均衡了网络负载,减小了能量耗尽对拓扑的影响。文献[8]基于节点综合故障模型约束网络节点度,构建了节能容错的拓扑结构。然而,目前工程上所用的WSN节点大多受到节点能量和容量的限制,其中节点容量是指节点能够转发数据量多少的能力,现有WSN拓扑控制算法大多仅仅考虑节点能量方面的优化,考虑节点容量方面的研究较少,而节点容量正是引起节点拥塞的重要原因,目前研究的节点拥塞控制机制都是在节点发生拥塞时才采取一定的拥塞控制措施。其中,文献[9]通过分析得出,距离SINK节点越近的节点越容易发生拥塞,然后依据节点距离SINK节点的远近控制节点度,最终达到控制网络数据拥塞的目的。文献[10,11]通过判断节点缓存内数据队列长度来判断节点的拥塞程度,然后通过控制节点度达到减弱拓扑拥塞的目的。文献[12]运用博弈理论来分析单个传感器节点的分布式决策过程,以此达到降低网络能耗的目的,但是仅在理论层面上给出了理想的能耗均衡WSN结构,并没有考虑节点度对网络性能的影响。文献[13]考虑了节点在广播时的干扰和能量消耗,通过优化每个节点的传动功率以达到优化网络结构的目的,以此来降低节点拥塞。文献[14]从博弈论的视角出发考虑单个节点度对网络性能的影响,从理论上分析了WSN系统存在最优的纳什均衡。但是,以上文献均没有考虑到当无线传感器网络节点大规模密集部署时,在突发数据流引发拥塞后,再采用拥塞控制措施也不一定可以完全避免节点拥塞,则很有可能导致节点能量过快耗尽,进而导致全局网络受损。

针对上述分析,本文提出了一种基于节点可靠度拓扑控制算法(Topology control based on node reliability in wireless sensor networks, TCNR),首先依据节点能量耗尽概率和拥塞失效概率构建节点可靠度模型,并以节点可靠度最大和网络生存时间最长为约束条件,获得了最优节点度的取值,最终通过最优节点度约束网络所有节点的节点度,根据仅改变最优节点度取值,可以有效地使整个网络拓扑性能得到优化,从而达到延长网络生存时间的目的。

1 问题模型

WSN在数据传输过程中,节点能量耗尽和数据拥塞是造成数据传输失败的重要原因,本文通过对节点能量耗尽失效概率和数据拥塞造成节点失效概率建模,得出了节点可靠度模型,并通过分析节点可靠度与网络参数的关系,最终得出了最优节点度的取值。

1.1 节点可靠度建模

本文将节点 i 可靠度 $R(i)$ 定义为:

$$R(i)=1-f_e(i)f_c(i) \tag{1}$$

式中:$f_e(i)$ 为节点 i 能量耗尽失效的概率;$f_c(i)$ 为节点 i 数据拥塞造成节点失效的概率。

节点能量耗尽失效和数据拥塞造成节点失效的概率越大,节点的可靠度就越小;节点能量耗尽失效和数据拥塞造成节点失效的概率越小,节点的可靠度就越大。

由文献[15]可知,节点能量耗尽的概率 $f_e(i)$ 取决于节点 i 的初始能量值 $E_0(i)$、能量消耗值 $E_c(i)$ 和网络运行时间 t,即:

$$f_e(i)=1-e^{-\frac{1}{E0(i)/Ec(i)}t} \tag{2}$$

采用一阶无线通信能耗模型[16],两个相距为 d 的节点发送 l bit 数据所消耗的能量 E_{tx} 为:

$$E_{tx}=E_{elec}l+\varepsilon_{amp}ld^2 \tag{3}$$

式中:E_{elec} 为射频传输系数;ε_{amp} 为发送装置放大系数。

节点接收 l bit 数据消耗能量 E_{rx} 取决于信号接收电路消耗的能量:

$$E_{rx}=E_{elec}l \tag{4}$$

那么,节点 i 在单位时间内消耗的总能耗 $E_c(i)$ 可由下式计算得到:

$$E_c(i)=E_{tx}+E_{rx}=2E_{elec}l+\varepsilon_{amp}ld^2 \tag{5}$$

假设 N 个节点随机部署在监测区域 G(面积为 A)上,由概率论可知节点坐标 (X,Y) 具有概率密度函数 $g(x,y)$ 为:

$$g(x,y)=\begin{cases}1/A, & (x,y)\in G\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

则节点落入以通信距离 d 为半径的圆域 D 内的概率 P 为:

$$P=\iint_D g(x,y)\,dx\,dy=\frac{\pi d^2}{A} \tag{7}$$

因此，可得节点传输距离 d 与其节点度 k 之间存在如下关系：

$$k=NP=N\frac{\pi d^2}{A} \tag{8}$$

此时，将式(8)代入式(5)，可得节点 i 的能耗值 $E_c(i)$ 随其节点度 k 的变化关系：

$$E_c(i)=E_{tx}+E_{rx}=2E_{elec}l+\frac{\varepsilon_{amp}lA}{N\pi}k \tag{9}$$

再将式(9)代入式(2)可得节点由能量耗尽引起节点失效的概率 $f_e(i)$ 为：

$$f_e(i)=1-e^{-(a+bk)t} \tag{10}$$

式中：$a=\frac{2E_{elec}l}{E_0(i)}$；$b=\frac{\varepsilon_{amp}lA}{N\pi E_0(i)}$。

考虑到 WSN 引起节点拥塞的重要原因是其负载大于其最大容量。通常 WSN 节点负载是指节点在某一时刻需要转发的信息量，假设节点 i 的节点度为 k，任意节点与其邻居节点数据交换的信息量为 l，那么在任意时刻节点 i 的最大负载 L 定义为：

$$L=kl \tag{11}$$

由于 WSN 节点受到硬件资源的限制，节点具有固定的容量，如果在某一时刻其负载量超过其容量，就会发生拥塞。其中，节点发生拥塞的概率与其负载量成正比，节点负载量越大，其发生拥塞的概率就越大。假设节点拥有固定的容量 C_0，那么在任意时刻节点由数据拥塞是造成节点失效的概率 $f_c(i)$ 定义为：

$$f_c(i)=\frac{1}{C_0-L}=\frac{1}{C_0-kl} \tag{12}$$

为了满足概率范围为[0,1]的条件，式(12)中 $C_0-kl>1$，可得 $k<\frac{C_0-1}{l}$，将式(10)和式(12)代入式(1)可得节点可靠度函数为：

$$R(i)=1-\frac{1-e^{-(a+bk)t}}{C_0-kl},\ k<\frac{C_0-1}{l} \tag{13}$$

式(13)即为节点可靠度数学模型，由式(13)可知，节点可靠度不仅与节点度有关，也与网络的生存时间相关。下面利用所获得的节点可靠度数学模型对节点度进行量化分析，为获取依据最优节点度调整的 WSN 拓扑演化模型提供理论依据。

1.2　基于节点可靠度的最优节点度量化分析

对于一个网络 I，其拓扑参数应满足如下条件：为提高拓扑的可用性，网络须保证一定的生存时间 t_{min}，即 $t\geqslant t_{min}$；为了保证网络的连通性，网络 I 须维持一定的节点度下限 k_{min}，即 $\tilde{k}\geqslant k_{min}$。为了分析拓扑参数对节点可靠度的影响，得出网络中节点可靠度最大时，网络生存时间与节点度的关系，引出如下定理。

定理　对于一个网络 I，如果其运行时间 $t\geqslant t_{min}$，且网络节点度符合 $k_{min}\leqslant\tilde{k}<\frac{C_0-1}{l}$，则当节点可靠度为 $R_0(i)=1-\frac{1-e^{-(a+bk_{min})t_{min}}}{C_0-k_{min}l}$ 时，网络中的节点可靠度最大。其中，t_{min} 为网络预设运行时间，k_{min} 为节点度下限，k_{max} 为节点度上限值。

证明　由 $t\geqslant t_{min}$ 可得，节点可靠度 $f(i)$ 符合：

$$R(i)\leqslant 1-\frac{1-e^{-(a+bk)t_{min}}}{C_0-kl} \tag{14}$$

又根据 $k\geqslant k_{min}$ 可得：

$$R(i)\leqslant 1-\frac{1-e^{-(a+bk)t_{min}}}{C_0-kl}\leqslant 1-\frac{1-e^{-(a+bk_{min})t_{min}}}{C_0-k_{min}l} \tag{15}$$

所以有：

$$R(i)\leqslant 1-\frac{1-e^{-(a+bk_{min})t_{min}}}{C_0-k_{min}l} \tag{16}$$

因此，如果网络中节点可靠度满足：

$$R_0(i)=1-\frac{1-e^{-(a+bk_{min})t_{min}}}{C_0-k_{min}l},\ k_{min}\leqslant\tilde{k}<\frac{C_0-1}{l}$$

则网络中所有节点可靠度最大。

上述定理得出了网络在节点可靠度最大时 $R_0(i)$ 与拓扑参数的关系，则当网络中节点失效概率满足 $R(i)=R_0(i)$，根据式(13)可得：

$$t=\frac{\ln[1-(C_0-kl)(1-R_0(i))]}{-(a+bk)} \tag{17}$$

由于当式(17)中分子 $1-(C_0-kl)(1-R_0(i))<0$ 时，函数值不存在，因此可得：

$$k>\frac{C_0(1-R_0l)-1}{l(1-R_0l)}$$

当 $\frac{C_0(1-R_0l)-1}{l(1-R_0l)}<k<\frac{C_0-1}{l}$ 时，对式(17)进行一阶求导可得：

$$t'=\frac{dt}{dk}=\left\{-\frac{l(1-R_0(i))(a+bk)}{1-(C_0-kl)(1-R_0(i))}+b\ln[1-(C_0-kl)(1-R_0(i))]\right\}\Big/(a+bk)^2 \tag{18}$$

由于 $0<1-(C_0-kl)(1-R_0(i))<1$，所以 $\ln[1-(C_0-kl)(1-R_0(i))]<0$，又 $-\frac{l(1-R_0(i))(a+bk)}{1-(C_0-kl)(1-R_0(i))}<0$ 且 $(a+bk)^2>0$，因此可得 $t'<0$，也就是说，式(17)在

$\frac{C_0(1-R_0l)-1}{l(1-R_0l)}<k<\frac{C_0-1}{l}$范围内单调递减,由于节点度 k 为整数,因此可得:当 $k_0=\left\lceil\frac{C_0(1-R_0l)-1}{l(1-R_0l)}\right\rceil$时,网络生存时间最长。

综上可知,由于突发数据流引发拥塞后,再采用拥塞控制措施也不一定可以完全避免节点拥塞,很有可能导致节点能量过快耗尽,本文通过理论分析获得了在节点可靠度最大和网络生存时间最长的条件下最优节点度 k_0 的取值,通过最优节点度约束网络所有节点的节点度,相比目前已有的研究[10-14],根据仅改变最优节点度取值,优化了网络拓扑性能,延长了网络生命周期。

2 TCNR 算法

TCNR 算法主要由以下 4 个阶段组成:

(1)信息交换阶段:在拓扑结构形成开始,各节点都以最大功率广播"握手"消息,任意收到"握手"消息的节点建立其自身的邻居列表。以节点 i 为例,邻居列表的表头格式如表 1 所示。其中,$ID(j)$表示节点 i 的邻居节点 j 的 ID;(x_j,y_j)表示节点 j 的地理位置;$d(i,j)$为 i 和 j 之间的距离;$mark(j)$为状态标识,初始记为 0。其中,任意节点的邻居列表均依据节点之间的通信距离进行升序排序。

表 1 节点 i 的邻居列表的表头格式

Table 1 Header format for node i neighbor list

$ID(j)$	(x_j,y_j)	$d(i,j)$	$mark(j)$

(2)邻居排序阶段:节点 i 广播 NOTICE 信息,其中 NOTICE 信息包含节点 iID 及邻居列表信息。收到 NOTICE 信息的邻居节点判断自身局域范围内的通信状态,并建立局域链路列表,其表头格式见表 2。其中,假设 j_1、j_2 为节点 i 的邻居节点,$d(j_1,j_2)$为节点 i 的邻居节点 j_1 和 j_2 间的距离,$ID(j_1)$和 $ID(j_2)$分别为 j_1、j_2 的 ID,$sign(j_1,j_2)$为状态标识,初始设定为 0。区域链路列表建立后,节点 i 按照通信距离 $d(j_1,j_2)$对其局域链路列表进行升序排列,如果 j_1 和 j_2 之间不存在通信路径,将链路状态标识 $sign(j_i,j_j)$更新为 1,直至与所有邻节点判断完成为止,最后删除 $sign$ 标记为 0 的链路项信息。

表 2 节点 i 局域链路列表的表头格式

Table 2 Header format for node i local link list

$d(j_1,j_2)$	$ID(j_1)$	$ID(j_2)$	$sign(j_i,j_j)$

(3)链路选择阶段:依据区域链路列表,节点 i 对其邻居节点广播包含自身 ID 和局域链路列表信息的 CONNECT 数据包。根据所接收到的 CONNECT 数据,以链路双向性原则确定其区域链路,将其 $sign$ 标记为 2,删除标记为 1 的链路项信息,进而寻找区域链路列表中由自身出发的链路项,并将其邻居列表中的相应标识位 $mark$ 更新为 1,统计其数目记为 $k_{\min}$,计算出最优节点度 k_0 与 $k_{\min}$的差值 $\hat{k}$。在此基础上,按距离升序依次将 $\hat{k}$ 个邻居列表中标识为 0 的节点标记为 2,删除状态不为 1 的邻节点信息项。

(4)功率调整阶段:节点 i 根据链路选择阶段确定其自身发射功率,同时应保证与新的邻居节点皆能正常通信。

3 仿真实验与性能分析

为了验证 TCNR 拓扑控制算法的性能,本文采用 MATLAB 2012a 仿真工具,对具有节能代表性的 FTEL 算法[16]和路径优化算法(Path optimization algorithm, POA)[17]进行仿真实验对比,并且假定拓扑结构均为不分簇的同构平面结构,仿真实验参数见表 3。其中,每一个实验结果都是 50 次实验的平均值。

表 3 实验环境参数

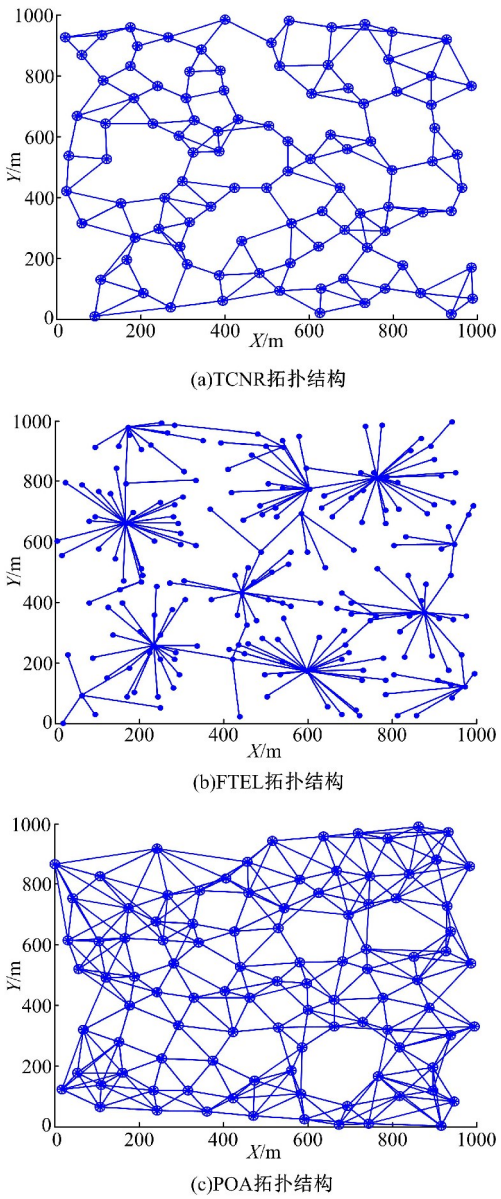
Table 3 Experimental environmental parameters

参 数	数值
节点个数 N/个	100
节点分布区域 A/m^2	1000×1000
节点最大传输半径 $R_{\max}$/m	200
初始能量 E/J	2
数据融合能耗 E_{elec}/(nJ·bit^{-1})	50
放大器功放能耗 ε_{amp}/(pJ·bit^{-1}·m^{-2})	100
节点容量 C/kbit	2
节点产生数据包 l/bit	500
最小运行时间 $t_{\min}$/s	2000
最小节点度 $k_{\min}$	1

为了解析得到网络中最优节点度 k_0 的最优取值,首先根据构建的节点可靠度模型和表 3 中的参数取值,并结合式(18)可以得出最优节点度在 $k_0=4$ 时网络运行时间达到最大,然后依据 TCNR 拓扑控制算法优化网络拓扑,与 FTEL 和 POA 算法进行性能对比。

3.1　拓扑结构对比

在 1000 m×1000 m 的区域随机布撒 100 个节点，依照 TCNR、FTEL 和 POA 三种拓扑控制算法得到的拓扑结构如图 1 所示。对比 TCNR 和 FTEL 拓扑结构可以看出，FTEL 中存在较多度为 1 的节点和一部分度较大的节点，而 TCNR 图谱结构较为均匀，拓扑中的节点度都接近 4，可以有效避免节点拥塞和能量耗尽失效。TCNR 与 POA 拓扑相比，大大减少了冗余链路的存在，有效避免了不必要的节点能耗，延长了络生存时间。



(a)TCNR拓扑结构

(b)FTEL拓扑结构

(c)POA拓扑结构

图 1　拓扑结构对比

Fig.1　Comparison of topological structure

3.2　网络平均节点度对比

网络的平均节点度通常表示为节点与邻居节点通信链路的数量，因此，拓扑连通的情况下可以通过平均节点度的大小来衡量拓扑的冗余程度和干扰程度，如果平均节点度越大，冗余链路越多就会造成网络能耗越快，而且链路之间的干扰也会增大，本文对 TCNR、FTEL 和 POA 三种拓扑控制算法的平均节点度进行了对比。分别在 1000 m×1000 m 的区域随机布撒 100、200、300、400 和 500 个节点，依照 TCNR、FTEL 和 POA 三种拓扑控制算法，得到 3 种拓扑结构的平均节点度如图 2 所示。由图 2 可以看出，TCNR 算法的平均节点度在 5 左右，POA 算法平均节点度在 7 左右，FTEL 算法随节点数的增加平均节点度也在逐渐增大。TCNR 算法与 POA 和 FTEL 算法相比比降低了网络平均节点度，说明 TCNR 算法通过最优节点度的限制有效控制了网络的平均节点度，减少了网络干扰，增强了网络健壮性。

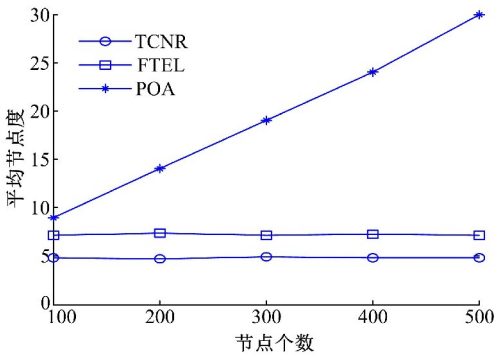


图 2　平均节点度对比

Fig.2　Comparison of average node degree

3.3　网络健壮性对比

网络在数据传输过程中通常会伴随着节点失效，当节点失效后，拓扑中剩余最大连通分支的数目可以作为网络健壮性的衡量标准。为了对比 3 种网络的健壮性，在 1000 m×1000 m 的区域随机布撒 100 个节点，依照 TCNR、FTEL 和 POA 三种拓扑控制算法运行拓扑，在每轮数据传输过程中，节点均与其邻居节点进行数据交换，节点按照一阶能耗模型计算剩余能量[12]，节点在能量耗尽和拥塞时均按照死亡节点处理，最后统计网络中剩余最大连通分支节点数目，剩余最大连通数目越大表示网络健壮性越好，得到的网络健壮性对比图如图 3 所示。由图 3 可以看出，3 种拓扑结构在网络运行 1000 轮的情况下，TCNR 拓扑剩余最大连通数目将近 80%，POA 拓扑剩余最大连通分支将近 50%，FTEL 拓扑剩余最大连通分支仅剩 22%左右，说明 TCNR 算法通过拓扑控

制有效提高了拓扑结构的健壮性。

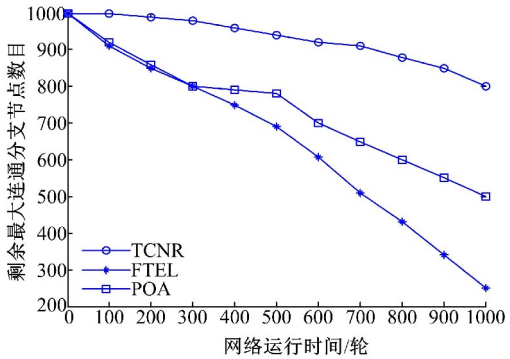


图3 网络健壮性对比

Fig.3 Comparison of network robustness

3.4 网络生命期对比

网络的生存时间通常定义为首节点失效的时间,也就是说,在数据传输过程中,拓扑中出现首个节点失效的时间可以作为网络生命期的衡量标准。因此,在仿真实验中将拓扑出现首节点失效的时间记为网络的生存时间,图4给出了TCNR、FTEL和POA三种模型的网络生存时间,从图4中可以看出,TCNR算法拥有最长的网络生命期,相对POA算法的网络生命期提升了将近30%,相对FTEL提升了将近50%,说明TCNR拓扑通过控制网络节点度有效均衡了网络能耗,延长了网络生命期。

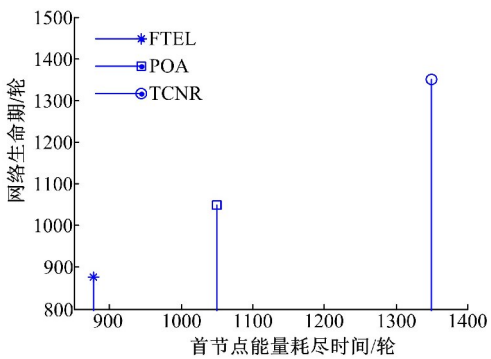


图4 网络生命期对比

Fig.4 Comparison of network life cycle

4 结束语

通过构建节点可靠度模型以及理论分析得出了在节点可靠度最大且网络生存时间最长的条件下的最优节点度,进而依据最优节点度提出了一种基于节点度调整的拓扑控制算法TCNR。最后,通过仿真验证了该拓扑的节能性和可靠性。利用TCNR模型,仅通过改变最优节点度取值就可以产生综合性能优化的拓扑,为WSN拓扑控制算法奠定了良好的基础。今后研究工作的重点是,在实际应用环境下测试本文工作的有效性以提高其实用性。

参考文献:

[1] Lin T Y, Santoso H A, Wu K R. Global sensor deployment and local coverage-aware recovery schemes for smart environments [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(7): 1382-1396.

[2] Mahboubi H, Moezzi K, Aghdam A G, et al. Distributed deployment algorithms for improved coverage in a network of wireless mobile sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 163-174.

[3] Mahboubi H. Distributed deployment algorithms for efficient coverage in a network of mobile sensors with no identical sensing capabilities [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8): 3998-4016.

[4] Mahboubi H, Aghdam A G. Distributed deployment strategies to increase coverage in a network of wireless mobile sensors[C]// Proceedings of 2013 American Control Conference (ACC), Washington, 2013: 17-19.

[5] Zhu H L, Luo H, Peng H P, et al. Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 41(4): 1828-1835.

[6] Qi X Q, Ma S Q, Zheng G Z. Topology evolution of wireless sensor networks based on adaptive free-scale network [J]. Journal of Information and Computational Science, 2011, 8(3): 467-475.

[7] 张德干,戴文博,牛庆肖.基于局域世界的WSN拓扑加权演化模型[J].电子学报, 2012, 40(5): 1000-1004.
Zhang De-gan, Dai Wen-bo, Niu Qing-xiao. Structure of WSN topological weighted evolution model based on local domain [J]. Acta Electronic Journal, 2012, 40 (5): 1000-1004.

[8] 王亚奇,杨晓元.一种无线传感器网络簇间拓扑演化模型及其免疫研究[J].物理学报, 2012, 61(9): 090202.
Wang Ya-qi, Yang Xiao-yuan. Study on cluster evolution model and its immunity of wireless sensor networks [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 090202.

[9] 尹荣荣, 刘彬, 刘浩然, 等.无线传感器网络中无标度拓扑的动态容错性分析[J].物理学报, 2014, 63

(11):110205.

Yin Rong-rong, Liu Bin, Liu Hao-ran, et al. Dynamic fault tolerance analysis of scale-free topologies in wireless sensor networks [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63 (11): 110205.

[10] Bartolini N, Calamoneri T, Portat T FL, et al. Autonomous deployment of heterogeneous mobile sensors [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(6): 753-766.

[11] Chen I R, Speer A P, Eltoweissy M. Adaptive fault-tolerant QoS control algorithm for maximizing system lifetime of query-based wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2011, 8(2): 161-176.

[12] Ren H, Meng Q H. Game-theoretic modeling of joint topology control and power scheduling for wireless heterogeneous sensor networks [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2009, 6(4):610-625.

[13] Miyao K, Nakayama H, Ansari N, et al. LTRT: an efficient and reliable topology control algorithm for ad-hoc networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 8(12):6050-6058.

[14] Nahir A, Orda A, Freund A. Topology design of communication networks: a game-theoretic perspective [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(2):405-414.

[15] 尹荣荣, 刘彬, 李雅倩, 等.能量异构无线传感器网络容错拓扑研究[J].电子与信息学报, 2012,34(9): 2180-2186.

Yin Rong-rong, Liu Bin, Li Ya-qian, et al. Study on fault tolerant topology of energy heterogeneous wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34 (9): 2180-2186.

[16] 刘浩然,尹文晓,韩涛,等.一种优化传感器无线网络生命周期的容错拓扑研究[J].物理学报,2014,63(4):80-86.

Liu Hao-ran, Yin Wen-xiao, Han Tao, et al. Wireless sensor network fault tolerant topology for lifetime optimization[J]. Acta Phys Sin, 2014,63(4): 80-86.

[17] 郝晓辰, 刘伟静, 辛敏洁, 等.一种无线传感器网络健壮性可调的能量均衡拓扑控制算法[J].物理学报, 2015,64(8):080101.

Hao Xiao-chen, Liu Wei-jing, Xin Min-jie, et al. An energy balance topology control algorithm for robustness of wireless sensor networks [J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(8): 080101.