

## 节点失效对无线传感器网络覆盖与连通可靠性影响的模型研究

傅质馨 徐志良 黄成 吴晓蓓  
(南京理工大学自动化学院 南京 210094)

**摘要:** 针对节点失效引起无线传感器网络监测性能下降的问题, 该文以节点随机均匀部署的网络为研究对象, 从节点失效的角度提出了评价网络覆盖与连通两个基本监测性能的量化指标, 建立了评价模型, 通过设计节点失效算法对随机失效与恶意入侵两种节点失效类型进行了计算机模拟, 利用仿真结果比较了网络监测性能在不同失效类型时的变化情况, 总结出经验公式, 为网络参数的选取提供了依据。

**关键词:** 无线传感器网络; 节点失效; 监测性能; 覆盖; 连通

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)11-2744-07

## Research on the Impact of Node Failure on the Reliability of Coverage and Connection for Wireless Sensor Networks

Fu Zhi-xin Xu Zhi-liang Huang Cheng Wu Xiao-bei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In this paper, we consider the impact of node failure on the monitoring reliability of wireless sensor networks. The quantitative criterions of two basic network monitoring performance, coverage and connection, are proposed from the perspective of node failure focusing on the case of stochastic and uniform node deployment. The performance criterion model is given. Two node failure forms, stochastic failure and vicious failure are discussed and simulated by the designed node failure algorithms. The impact of node failures on the network monitoring reliability are analysed based on the simulation results. Experience formulas which are helpful for choosing the network parameters are also summarized.

**Key words:** Wireless Sensor Networks (WSNs); Node failure; Monitoring performance; Coverage; Connection

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的任务不是传统网络的传输数据, 而是达到某种监测目的, 网络应在尽量长的时间内完成特定的监测任务<sup>[1]</sup>。由于单个节点结构简单、能量有限, 常因环境干扰、能量耗尽等原因而失效, 对网络监测信息的准确性、完整性和时效性造成直接影响, 甚至导致网络崩溃不能继续满足应用需求, 因此节点失效的相关研究受到了人们的关注, 大致可分为两个方面: (1)在网络初始部署时对节点失效进行预防, 如利用节点的多重覆盖与多重连通来提高网络的抗毁性<sup>[2]</sup>, 或通过设计拓扑控制算法减少节点在数据传输中的能量损耗, 延长网络寿命<sup>[3,4]</sup>; (2)在网络运行过程中对失效节点进行检测、判断失效类型并采取有效的修复措施<sup>[5,6]</sup>。此外, 有些研究者对WSNs在目标跟踪<sup>[7]</sup>、事件监测<sup>[8]</sup>等应用中的节点失效问题进行了分析。WSNs是面向应用的网络, 在不同应用中网络节点部署方式各异, 网络性能受节点失效

的影响也不同, 所以节点失效问题的研究有必要结合特定的应用背景及具体的节点部署方式。本文针对WSNs在环境较为恶劣的应用中的节点失效情况进行讨论, 如森林火灾监测、战场态势侦察等。在这些场合中, 人工不便到达、网络规模较大, 节点常采用随机部署的方式, 网络结构不规则, 容易出现监测盲区。由于网络监测性能与部署节点数目、网络参数及节点失效类型密切相关, 因此, 通过一定的量化标准研究网络监测性能在不同节点失效类型情况下随节点数目和网络参数的变化规律, 有助于及时采取有效策略以最大程度地恢复或改善网络的监测能力。本文重点分析了节点随机均匀部署情况下, 节点失效对网络覆盖与连通这两个基本监测性能的影响, 给出了相应的评价指标, 提出了性能评价模型。同时, 通过大量的计算机模拟实验比较了随机失效与恶意入侵两种节点失效类型对网络性能的影响, 得出了一般公式, 为选取合适的网络参数提供了依据。

### 2 WSNs 的覆盖与连通

覆盖问题是 WSNs 设计和规划首先面临的基本

问题, 传感器节点覆盖的范围表明了节点的感知能力, 能够准确探测并采集其感知范围(设  $S = \pi r^2$ ,  $r$  为节点感知半径)内的信息, 及时了解环境变化的情况。连通问题即节点具有通讯能力, 可将采集到的信息通过通讯范围(设  $C = \pi R^2$ ,  $R$  为节点通讯半径)内的其他节点, 以无线多跳方式传递到基站进行信息融合并上传给终端用户。通常取  $R \geq 2r$  [9], 本文为便于研究设  $R = 2r$ , 且所有节点的  $r$  与  $R$  分别相同。由于覆盖实现对被测对象的监视及数据采集, 而连通能够将采集的数据传递给基站或观察者, 因此覆盖与连通反映了网络的监测质量, 是衡量网络性能的重要因素。

**定义1** 有效节点  $i$  的覆盖邻居节点集:  $N_s^i = \{i \in N_a, x \in N \mid d(i, x) \leq 2r, x \neq i\}$ , 其中  $N_a, N$  分别表示有效节点集合与网络节点集合,  $N_s^i$  中的有效节点构成节点  $i$  的有效覆盖邻居节点集  $N_{as}^i$ , 失效节点构成失效覆盖邻居节点集  $N_{fs}^i$ 。基于  $R = 2r$  的假设, 本文的覆盖邻居节点也为连通邻居节点, 有效节点  $i$  的连通邻居节点集为  $N_c^i$ , 对应的有  $N_{ac}^i, N_{fc}^i$ 。

### 3 节点失效对网络覆盖与连通可靠性影响的评价模型

#### 3.1 评价指标

(1) 失效节点率 本文定义网络运行中某一时刻的失效节点率  $f$ , 即失效节点数  $n_f$  与网络节点数  $n$  的比值(如式(1)), 意义在于从整体上反映节点失效对网络监测性能的影响。

$$f = n_f / n \quad (1)$$

(2) 针对覆盖可靠性的评价指标

(a)  $a_{as}$  定义为网络所有剩余有效节点的有效覆盖面积  $A_{as}$  与被测区域总面积  $A$  的比值, 表示当前时刻网络的有效覆盖率, 反映了节点失效情况下网络对被测区域的覆盖有效性。

$$a_{as} = A_{as} / A \quad (2)$$

$A_{as} = \bigcup_{i=1}^{n_a} S^i, i \in N_a$ , 为所有剩余有效节点的覆盖范围并集。

(b) 令  $a_{as}(s_d)$  表示当前时刻网络的覆盖程度,  $s_d = 0, 1, 2, \dots, n$ 。

$$a_{as}(s_d) = A_{as}(s_d) / A \quad (3)$$

$a_{as}(s_d)$  定义为网络中至少能够被  $s_d$  个有效节点重复覆盖的区域总面积  $A_{as}(s_d)$  与被测区域总面积  $A$  的比值。特别地,  $a_{as}(0)$  为网络覆盖盲区面积与被测区域总面积的比值, 即网络的无效覆盖率。可知,  $a_{as}(1) = 1 - a_{as}(0) = a_{as}$ 。  $a_{as}(s_d)$  能够从整体上反映当前时刻网络区域被重复覆盖的可靠程度, 对于不同  $s_d$  值

若  $a_{as}(s_d)$  相同, 则  $s_d$  越大网络覆盖的鲁棒性越强。

(3) 针对连通可靠性的评价指标

(a) 设  $n_{ac}^i$  为有效节点  $i$  的有效邻居节点数,  $n_{ac}$  定义为所有剩余有效节点的有效连通邻居节点数与网络节点数的比值, 表示当前时刻网络中每个有效节点的有效连通邻居节点平均数。当节点部署相对均匀时,  $n_{ac}$  的变化可以反映节点失效时网络整体连通的有效性。

$$n_{ac} = \sum n_{ac}^i / n, i \in N_a \quad (4)$$

(b) 令  $n_{ac}(c_d)$  表示当前时刻网络的连通程度,  $c_d = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

$$n_{ac}(c_d) = \sum n_{ac}^i(c_d) / n, i \in N_a \quad (5)$$

若有效节点  $i$  至少有  $c_d$  个有效连通邻居节点, 则用  $n_{ac}^i(c_d)$  表示该节点满足这一条件, 且  $n_{ac}^i(c_d) = 1$ ,  $n_{ac}(c_d)$  为节点失效时网络中满足这一条件的有效节点总数与网络节点数的比值。特别地,  $n_{ac}(0)$  表示孤立节点数与网络节点数的比值。  $n_{ac}(c_d)$  能够从整体上反映当前时刻网络连通的可靠程度, 对于不同  $c_d$  值若  $n_{ac}(c_d)$  相同, 则  $c_d$  越大网络连通的鲁棒性越强。

综上, 对于随机均匀部署的 WSNs, 节点失效对网络覆盖与连通性能影响的评价模型可以表示为一个 5 元集合:

$$\text{Eval} = \langle f, a_{as}, a_{as}(s_d), n_{ac}, n_{ac}(c_d) \rangle \quad (6)$$

其中  $f$  是网络监测性能下降的最直观反映,  $a_{as}$  与  $n_{ac}$  从横向上分别反映网络覆盖与连通的能力, 而  $a_{as}(s_d)$  与  $n_{ac}(c_d)$  从纵向上分别反映网络覆盖与连通的冗余程度, 体现了网络的抗毁性与鲁棒性。该模型从这几个方面将抽象的网络信息转换为网络特征参数, 由此可以有效地反映网络状态的变化, 为网络性能的研究提供方便。

#### 3.2 评价指标的设定与计算

根据 WSNs 的应用背景可定义不同的失效节点百分数来确定网络寿命 [1]。本文设失效节点百分数达到 50%, 即  $f = 50\%$  时网络生存期结束。同时设  $a_{as} \geq 75\%$ ,  $n_{ac} \geq 3$  时网络能够满足应用需求。  $s_d$  与  $c_d$  的取值决定了  $a_{as}(s_d)$  与  $n_{ac}(c_d)$  的大小且与具体应用环境相关, 对于人工方便到达的地区, 如农田牧场、楼宇建筑等, 节点失效后可及时增加新节点来改善网络性能, 只需部署少量冗余节点,  $s_d$  与  $c_d$  较小。对于灾情现场、战场区域等环境恶劣的地区, 在节点失效后难以及时增加新节点, 需要部署较多冗余节点,  $s_d$  与  $c_d$  较大。本文重点考察  $s_d$  与  $c_d$  取不同值时  $a_{as}(s_d)$  与  $n_{ac}(c_d)$  的变化情况, 不具体设定  $s_d$  与  $c_d$  的值。

利用网络基站收集到的节点信息可以很方便地

计算出  $f$ ,  $n_{ac}$ ,  $n_{ac}(c_d)$ 。而由于节点随机布撒形成的覆盖区域形状不规则,  $a_{as}$  与  $a_{as}(s_d)$  不易得到解析解, 目前常采用将网络区域划分为单元网格的方法近似计算<sup>[10]</sup>, 本文也采用这种方法。

### 4 节点失效仿真模拟算法

#### 4.1 节点失效类型

节点失效可分为随机失效(Stochastic Failure, SF)与恶意入侵(Vicious Failure, VF)两种类型)。SF 主要由不可避免的外界环境因素干扰或节点自身正常工作时能量耗尽造引起, 在所有 WSNs 的应用场合中都存在; VF 主要由入侵者蓄意破坏造成, 如不断发送干扰信号使节点无法正常工作, 或让节点采集、处理大量无用信息导致能量很快耗尽, 主要针对战场侦察及安全防御等领域。对于 SF, 可事先采取有效的预防措施或根据经验对节点失效的程度进行人为估计, 而 VF 情况较为复杂难以预料, 因此在一定意义下 VF 比 SF 对网络性能的影响更大。对于 VF, 破坏网络监测能力的手段主要有: (1)攻击覆盖关键节点(Coverage Key Node, Cov-KN), 即攻击有效覆盖范围大的有效节点使网络出现较大的覆盖盲区, 降低网络覆盖程度, 破坏网络覆盖性; (2)攻击连通关键节点(Connectivity Key Node, Con-KN), 即攻击连通邻居节点数多的有效节点使节点间的通讯距离增大, 增加传输能耗, 破坏网络连通性。

#### 4.2 节点失效仿真模拟算法

本文设计了节点失效仿真算法利用计算机模拟上述两种节点失效类型, 算法流程分别如图 1(a)、1(b)所示。下面以图 1(a)流程为例说明仿真步骤, 图 1(b)流程类似。

(1)初始化。设定网络区域大小、网络节点数目、节点覆盖半径、节点失效率。同时为了提高计算准

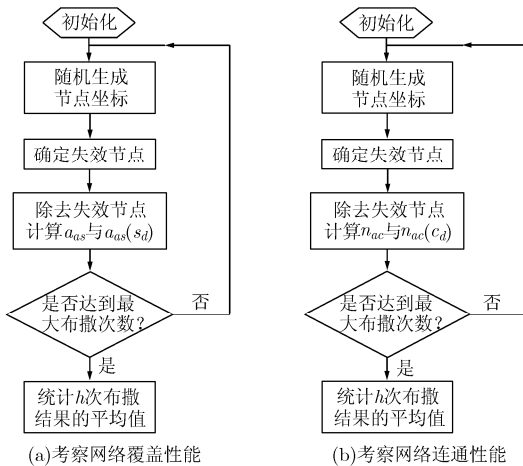


图 1 节点失效模拟算法流程

确度, 设定节点布撒次数, 随机布撒一次节点, 计算  $a_{as}$ ,  $a_{as}(s_d)$ , 再次重新布撒, 进行循环实验, 直至达到设定的最大布撒次数  $h$ , 最后计算  $h$  次布撒结果的平均值;

(2)生成节点位置坐标, 模拟节点随机均匀部署于网络监测区域内的情况;

(3)对于 SF, 随机选取节点作为失效节点。对于 VF, 选取 Cov-KN 作为失效节点。

(4)除去失效节点, 计算  $a_{as}$  与  $a_{as}(s_d)$ ;

(5)判断是否达到设定的最大布撒次数, 是则统计  $h$  次布撒结果的平均值, 否则转(2)。

### 5 仿真分析

基于节点失效模拟算法, 本文在 MATLAB 平台下对节点随机均匀部署的情况进行仿真实验, 设网络区域为  $100 \text{ unit} \times 100 \text{ unit}$ ,  $\text{unit}$  为单位长度。在每种仿真情况下节点循环随机布撒 1000 次, 仿真图形中实线 “——” 为 SF, 虚线 “……” 为 VF。

#### 5.1 网络覆盖

情况 1 设  $r = 10 \text{ unit}$ ,  $f = 0\% - 50\%$ ,  $n$  由 20 以间隔 20 递增到 100, 考察  $a_{as}$  的变化。图 2(a) 中 SF 与 VF 的每个  $n$  值  $a_{as}$  都随  $f$  增加而减小, 这是因为当  $r$  与  $n$  固定时,  $f$  增加, 节点覆盖区域减少,  $a_{as}$  减小。表 1 列出了 SF 与 VF 的每个  $n$  值在  $f$  分别为 0% 与 50% 时  $a_{as}$  的减少量  $\Delta a_{as}$ , 即每条曲线两端点值的差, 并计算  $\Delta a_{as}(\text{SF}) - \Delta a_{as}(\text{VF})$  的值。 $\Delta a_{as}(\text{SF})$  与  $\Delta a_{as}(\text{VF})$  的值随着  $n$  增加都呈先增大后减小的趋势, 这是因为当  $n$  开始增加时, 节点覆盖范围增大, 节点失效对网络性能的影响越发明显,  $\Delta a_{as}$  变大, 但  $n$  增加到一定值时, 节点密度增大使得  $s_d > 1$  的区域显著增加, 网络覆盖鲁棒性变强, 节点失效的影响开始减弱,  $\Delta a_{as}$  变小。由于 VF 使较多覆盖范围大的节点受攻击而失效, VF 的  $a_{as}$  比 SF 的变化大, 因此随着  $n$  增大  $\Delta a_{as}(\text{SF}) - \Delta a_{as}(\text{VF})$  的值逐渐增大, VF 对网络性能的影响加剧。由曲线知, 必须使 SF 与 VF 时  $f < 15.5\%$  才能在  $n > 60$  时满足  $a_{as} \geq 75\%$ 。因此, 若  $r$  固定可部署新节点控制  $f$  的值使  $a_{as}$  达到要求, 这为确定新节点的部署周期提供了依据。

情况 2 设  $n = 100$ ,  $r = 5 - 20 \text{ unit}$ ,  $f$  由 0% 以间隔 10% 递增到 50%, 考察  $a_{as}$  的变化。图 2(b) 中 SF 与 VF 的每个  $f$  值  $a_{as}$  都随  $r$  增加而增大, 这是因为当  $n$  与  $f$  固定时,  $r$  增加节点覆盖区域增大,  $a_{as}$  增加。在  $f < 20\%$  时, 失效节点较少, SF 与 VF 的曲线基本重合, 但当  $f > 30\%$  时, 由于较多覆盖范围大的节点受攻击而失效, 因此 VF 的曲线增长

表 1  $r = 10 \text{ unit}$ ,  $f = 0\% - 50\%$  时 SF 与 VF 的  $a_{as}$  比较

$\Delta a_{as}$	$n = 20$	$n = 40$	$n = 60$	$n = 80$	$n = 100$
$\Delta a_{as}(\text{SF})$	0.1853	0.2436	0.2372	0.2101	0.1772
$\Delta a_{as}(\text{VF})$	0.2084	0.2782	0.2868	0.2679	0.2356
$\Delta a_{as}(\text{SF}) - \Delta a_{as}(\text{VF})$	-0.0231	-0.0346	-0.0496	-0.0578	-0.0584

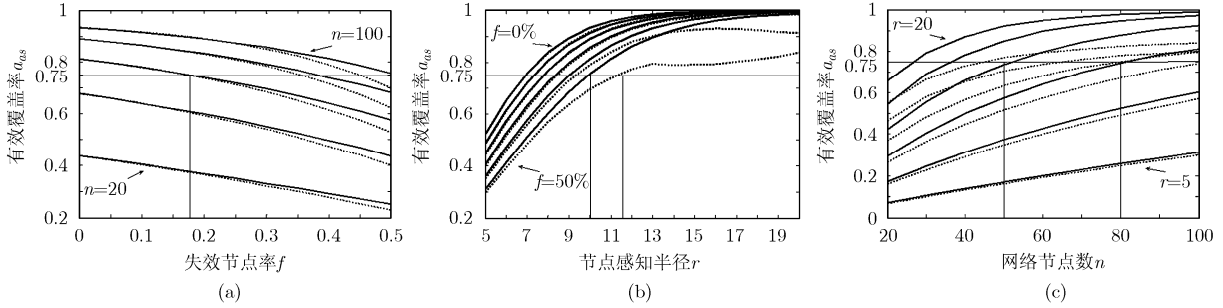


图 2

较为缓慢,  $a_{as}$  也比 SF 的低。当  $f < 50\%$  时, SF 的  $a_{as}$  在  $r = 10 \text{ unit}$  时超过 75% 并随着  $r$  的增加逐渐上升到 100%, 而 VF 的  $a_{as}$  在  $r = 11.5 \text{ unit}$  时达到 75% 后, 尽管  $r$  继续增加但基本稳定于 80%。因此, 若  $n$  固定可通过设定  $r$  在  $f$  不超过一定值时使  $a_{as}$  达到要求。

**情况 3** 设  $f = 50\%$ ,  $n = 20 - 100$ ,  $r$  由 5 unit 以间隔 3 递增到 20 unit, 考察  $a_{as}$  的变化。图 2(c) 中 SF 与 VF 的每个  $r$  值  $a_{as}$  都随  $n$  的增加而增大, 这是因为当  $r$  与  $f$  固定时,  $n$  增加节点密度增大,  $a_{as}$  增加。图中 VF 的  $a_{as}$  比 SF 的小, 且随着  $r$  增大, VF 的  $a_{as}$  随  $n$  增加增长缓慢, 与 SF 的  $a_{as}$  差值逐渐增大。这说明当  $r$  增加到一定程度时, VF 对  $a_{as}$  的影响逐渐加剧。由图知, 必须使 SF 时  $n > 50$ , VF 时  $n > 80$  才能在  $r > 14 \text{ unit}$  时满足  $a_{as} \geq 75\%$ 。因此, 若  $r$  固定可选取适当的  $n$  在  $f$  不超过一定值时使  $a_{as}$  达到要求。

图 3 为  $s_d$  由 1 到 5 时的  $a_{as}(s_d)$  曲线, 参数设置及对应的曲线描述和结论如表 2 所示。

5.2 网络连通

**情况 1** 设  $r = 10 \text{ unit}$ ,  $f = 0\% - 50\%$ ,  $n$  由 20 以间隔 20 递增到 100, 考察  $n_{ac}$  的变化, 如图 4(a)。表 3 列出了 SF 与 VF 的每个  $n$  值在  $f$  为 0% 与 50% 时  $n_{ac}$  的减少量  $\Delta n_{ac}$ , 即每条曲线两端点值的差, 并计算  $\Delta n_{ac}(\text{SF}) - \Delta n_{ac}(\text{VF})$  的值。对于同一  $n$  值,  $\Delta n_{ac}(\text{VF})$  比  $\Delta n_{ac}(\text{SF})$  大, 这是因为 VF 使较多有效邻居节点数大的节点失效。横向分别比较  $n$  变化时  $\Delta n_{ac}(\text{SF})$ ,  $\Delta n_{ac}(\text{VF})$  及  $\Delta n_{ac}(\text{SF}) - \Delta n_{ac}(\text{VF})$  的值, 3 组数值都呈递增趋势。这是由于当  $r$  固定时,  $n$  增大, 节点密度增加, 每个有效节点的有效邻居节点

数增多, 而  $f$  增加使得这些有效节点的有效邻居节点数明显减少, 随着  $n$  增大网络受失效节点的影响逐渐加剧。由图知, 当  $r = 10 \text{ unit}$ , 必须使 SF 时  $f < 25\%$ , VF 时  $f < 15\%$  才能在  $n > 40$  时满足  $n_{ac} \geq 3$ 。因此, 若  $r$  固定可部署新节点来控制  $f$  的值, 在  $f$  不超过一定值的情况下仍使  $n_{ac}$  达到要求。

观察图 4(a) 可以看出, 同一种失效情况的曲线簇变化规律基本相同, 因此考虑分别建立 SF 与 VF 在  $r = 10 \text{ unit}$  时  $n_{ac}$  随  $f$  与  $n$  变化的经验公式。以 SF 的曲线簇为例, 整个过程分为两步: (1) 采用最小二乘法思想分别对  $n$  取 [20, 100] 内不同值时  $n_{ac}(\text{SF})$  随  $f$  变化的曲线进行拟合, 得到多项式拟合系数; (2) 观察 (1) 中拟合系数的变化趋势, 分别以各系数为自变量,  $n$  为因变量建立回归模型, 再次利用最小二乘法思想对各个回归模型参数进行拟合, 确定回归方程, 最终得到以  $n_{ac}(\text{SF})$  为因变量,  $f$  与  $n$  为自变量的经验公式。

首先进行第 1 步, 表 4 列出了  $n$  分别为 20, 40, 60, 80, 100 时的拟合系数与相应的误差标准方差。由此可得  $n$  取 [20, 100] 内不同值时  $n_{ac}(\text{SF})$  随  $f$  变化的关系式:

$$n_{ac}(\text{SF}) = a_i f + b_i, f \in [0\%, 50\%] \tag{7}$$

第 2 步 由于  $a_i$ ,  $b_i$  都与  $n$  呈现较为明显的一次线性关系, 因此分别建立回归模型:

$$a_i = pn + q, n \in [20, 100] \tag{8}$$

$$b_i = kn + l, n \in [20, 100] \tag{9}$$

表 5 列出了式 (8), 式 (9) 中待定参数的拟合值及相应的误差标准方差。

由此得到  $n_{ac}(\text{SF})$  随  $f$  与  $n$  变化的经验公式:

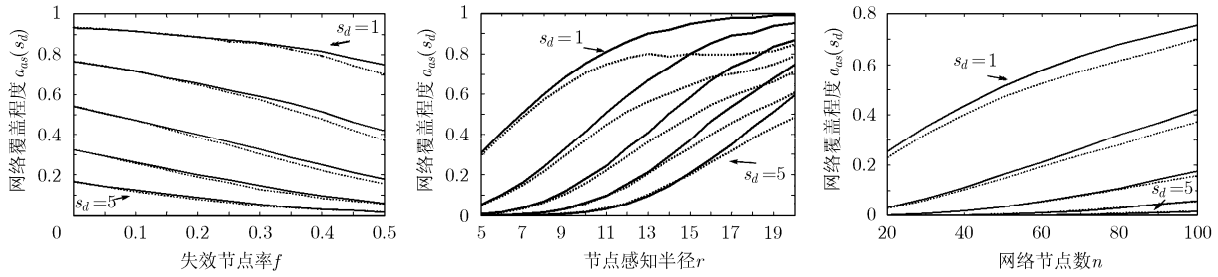


图3

表2 网络覆盖程度的仿真结果比较

参数	(a) $r = 10 \text{ unit}, n = 100, f = 0\% - 50\%$	(b) $f = 50\%, n = 100, r = 5 - 20 \text{ unit}$	(c) $r = 10 \text{ unit}, f = 50\%, n = 20 - 100$
曲线描述	对每个 $s_d$ 值 SF 与 VF 的 $a_{as}(s_d)$ 都随 $f$ 增加而减小	对每个 $s_d$ 值 SF 与 VF 的 $a_{as}(s_d)$ 都随 $r$ 增加而增大	对每个 $s_d$ 值 SF 与 VF 的 $a_{as}(s_d)$ 都随 $n$ 增加而增大
仿真分析	$r$ 与 $n$ 固定, $f$ 增加, 节点间相互重叠区域减少, $a_{as}(s_d)$ 递减	$f$ 与 $n$ 固定, $r$ 增加, 节点间相互重叠区域增多, $a_{as}(s_d)$ 增大	$r$ 与 $f$ 固定, $n$ 增加, 节点密度增大, $a_{as}(s_d)$ 增大
结论	为了保证网络的覆盖性能, 必须控制 $f$ 的值	若要提高网络的覆盖性能, 必须增大 $r$ 的值	增大 $n$ 值可有效提高网络的覆盖性能

表3  $r = 10 \text{ unit}, f = 0\% - 50\%$  时 SF 与 VF 的  $n_{ac}$  比较

$\Delta n_{ac}$	$n = 20$	$n = 40$	$n = 60$	$n = 80$	$n = 100$
$\Delta n_{ac}(\text{SF})$	0.9960	2.0460	3.1130	4.1590	5.2100
$\Delta n_{ac}(\text{VF})$	1.5056	2.8480	4.1650	5.4360	6.7250
$\Delta n_{ac}(\text{SF}) - \Delta n_{ac}(\text{VF})$	-0.5096	-0.8020	-1.0520	-1.2770	-1.5150

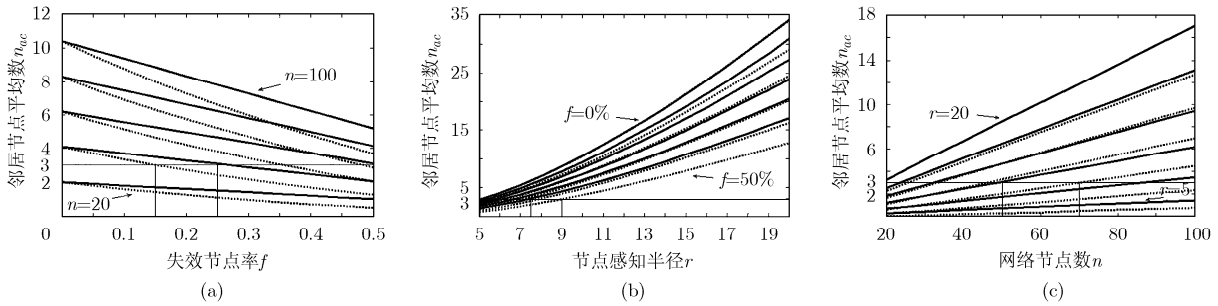


图4

表4  $r = 10 \text{ unit}$  时 SF 拟合系数(1)

拟合系数	$n = 20$	$n = 40$	$n = 60$	$n = 80$	$n = 100$
$a_i$	-1.9989	-4.1162	-6.2004	-8.2982	-10.4109
$b_i$	1.9992	4.1063	6.2030	8.3050	10.4120
$J_i$	0.0139	0.0200	0.0177	0.0244	0.0160

表5  $r = 10 \text{ unit}$  时 SF 拟合系数(2)

拟合系数	$p$	$q$	$k$	$l$
	-0.1050	0.0969	0.1051	-0.1022
$J'_i$	0.0162		0.0054	

$$n_{ac}(\text{SF}) = (-0.1050n + 0.0969)f + (0.1051n - 0.1022), \quad f \in [0\%, 50\%], n \in [20, 100] \quad (10)$$

同理得

$$n_{ac}(\text{VF}) = (0.0535n + 1.6265)f^2 + (-0.1556n - 1.2793)f + (0.1048n - 0.1085), \quad f \in [0\%, 50\%], n \in [20, 100] \quad (11)$$

需要说明的是, 在回归模型参数拟合的过程中, 在保证拟合精度的基础上, 为了使经验公式简化应尽量选取较低次的拟合多项式, 因而本文在第2步中按以下原则确定多项式次数: 设采用  $m$  次与

$m + 1$  次多项式拟合所得结果误差标准方差分别为  $J(m)$ ,  $J(m + 1)$ , 若有  $J(m) \leq 0.1$  且  $|J(m) - J(m + 1)| \leq 0.05$ , 则采用  $m$  次多项式拟合。

**情况 2** 设  $n = 100$ ,  $r = 5 - 20$  unit,  $f$  由 0% 以间隔 10% 递增到 50%, 考察  $n_{ac}$  的变化。图 4(b) 中 SF 与 VF 的每个  $f$  值  $n_{ac}$  都随  $r$  增加而增大, 这是因为当  $n$  与  $f$  固定时,  $r$  增加, 节点通讯范围增大, 有效节点的有效邻居节点数增多,  $n_{ac}$  增加。由于较多有效邻居节点数大的节点受攻击而失效, 因此 VF 的  $n_{ac}$  比 SF 的少。 $f = 10\%$  时 SF 与 VF 的曲线重合, 随着  $f$  增大两组曲线簇中对应的 SF 与 VF 曲线的差值逐渐增大, 尤其是当  $r$  增大到一定值后差别更为明显, 这说明 VF 对网络性能的影响随着  $r$  的增加逐渐加剧。由图知, 当  $n = 100$ , 必须使 SF 时  $r > 7.5$  unit, VF 时  $r > 9$  unit 才能在  $f < 50\%$  时满足  $n_{ac} \geq 3$ 。因此, 若  $n$  固定可通过设定  $r$  在  $f$  不超过一定值时仍使  $n_{ac}$  达到要求。

仿照情况 1 的步骤分别建立 SF 与 VF 在  $n = 100$  时  $n_{ac}$  随  $r$  与  $f$  变化的经验公式:

$$n_{ac}(\text{SF}) = (-0.0548f + 0.0536)r^2 + (-0.7426f + 0.7773)r + (2.3905f - 2.5914),$$

$$f \in [0\%, 50\%], r \in [5, 20] \quad (12)$$

$$n_{ac}(\text{VF}) = (-0.0682f + 0.0514)r^2 + (-0.9345f + 0.8018)r + (3.2671f^2 + 0.8563f - 2.7298),$$

$$f \in [0\%, 50\%], r \in [5, 20] \quad (13)$$

**情况 3** 设  $f = 50\%$ ,  $n = 20 - 100$ ,  $r$  由 5 unit 以间隔 3 递增到 20 unit, 考察  $n_{ac}$  的变化。图 4(c) 中 SF 与 VF 的每个  $r$  值  $n_{ac}$  都随  $n$  增加而增大, 这是因为当  $r$  与  $f$  固定,  $n$  增加节点密度增大, 有效节点的有效邻居节点增多,  $n_{ac}$  递增。同样, VF 的  $n_{ac}$  比 SF 的少, 但当  $r$  值较小时两者对应的曲线值相差不大, 这是因为  $f = 50\%$  时, 虽然  $n$  不断增加但失效节点较多, 而  $r$  值较小时节点通讯范围有限, 尽管 VF 使有效邻居节点多的节点失效对  $n_{ac}$  的影响也不明显。由曲线知, 若  $f = 50\%$ , 必须使 SF 时  $n > 50$ , VF 时  $n > 70$  才能在  $r > 11$  unit 时满足  $n_{ac} \geq 3$ 。因此, 若  $f$  固定可抛撒足够的  $n$  在  $f$  不超过一定值时使  $n_{ac}$  达到要求。

仿照情况 1 的步骤分别建立 SF 与 VF 在  $f = 50\%$  时  $n_{ac}$  随  $r$  与  $n$  变化的经验公式:

$$n_{ac}(\text{SF}) = (0.0003r^2 + 0.0035r - 0.0129)n + (-0.0094r + 0.0371),$$

$$n \in [20, 100], r \in [5, 20] \quad (14)$$

$$n_{ac}(\text{VF}) = (0.0002r^2 + 0.0036r - 0.0159)n + (-0.0104r - 0.2043),$$

$$n \in [20, 100], r \in [5, 20] \quad (15)$$

图 5 为  $c_d$  由 1 以间隔 2 变化到 9 的  $n_{ac}(c_d)$  曲线, 参数值、曲线描述和结论如表 6 所示。

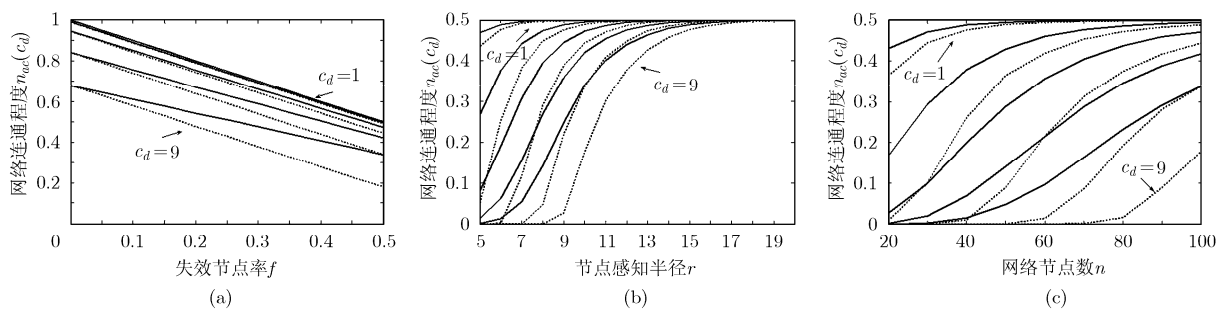


图 5

表 6 网络连通程度的仿真结果比较

参数	(a) $r = 10$ unit, $n = 100$ , $f = 0\% - 50\%$	(b) $f = 50\%$ , $n = 100$ , $r = 5 - 20$ unit	(c) $r = 10$ unit, $f = 50\%$ , $n = 20 - 100$
曲线描述	对于每个 $c_d$ 值 SF 与 VF 的 $n_{ac}(c_d)$ 都随 $f$ 增加而减小	对于每个 $c_d$ 值 SF 与 VF 的 $n_{ac}(c_d)$ 都随 $r$ 增加而增大	对于每个 $c_d$ 值 SF 与 VF 的 $n_{ac}(c_d)$ 都随 $n$ 增加而增大
仿真分析	$r, n$ 固定, $f$ 增加有效节点的有效邻居节点数减少, 网络连通程度降低, $n_{ac}(c_d)$ 递减	$n, f$ 固定, $r$ 增加节点通讯范围增大, 有效节点的有效邻居节点数增多, $n_{ac}(c_d)$ 增加	$r, f$ 固定, $n$ 增加节点密度增大, 有效节点的有效邻居节点数增多, $n_{ac}(c_d)$ 增加
由于 VF 使有效邻居节点数多的节点失效, 所以 3 种情况下 VF 的 $n_{ac}(c_d)$ 均比 SF 小			
结论	必须控制 $f$ 的值才能保证网络的连通性能	必须使 $r$ 达到一定值才能保证网络的连通性能	为了提高网络的连通性能, 必须使 $n$ 达到一定值

## 6 结论

本文针对在环境较为恶劣的应用场合中, 节点采用随机均匀部署方式时的传感器网络监测能力可靠性问题进行研究, 从节点失效的角度提出了评价网络覆盖与连通两个基本监测性能的量化指标, 给出了性能评价模型。通过大量的计算机模拟实验分析了节点失效对网络监测可靠性的影响, 总结出经验公式, 为选取合适的网络参数提供了依据。根据不同的应用背景, 研究其他节点部署方式时的网络监测性能可靠性是进一步的工作。

### 参考文献

- [1] Karl H and Willig A著, 邱天爽, 唐洪, 李婷, 等译. 无线传感器网络协议与体系结构[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 第2章.
  - [2] Thai M T, Wang F, and Du D Z. Coverage problems in wireless sensor networks: designs and analysis[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2008, 3(3): 191-200.
  - [3] Forghani A and Rahmani A M. Multi state fault tolerant topology control algorithm for wireless sensor networks[C]. Second International Conference on Future Generation Communication and Networking(FGCN), Hainan Island, China, 13-15 Dec. 2008, 1: 433-436.
  - [4] Cardei M, Yang S, and Wu J. Algorithms for fault-tolerant topology in heterogeneous wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(4): 545-558.
  - [5] Asim M, Mokhtar H, and Merabti M. A fault management architecture for wireless sensor network[C]. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Crete Island, 6-8 Aug. 2008: 779-785.
  - [6] Zahedi S, Szezodrak M, and Ji P, *et al.* Tiered architecture for on-line detection, isolation and repair of faults[C]. IEEE Military Communications Conference(MILCOM), San Diego, CA, USA, 16-19 Nov. 2008: 1-7.
  - [7] Ding M, Liu F, and Thaeler A, *et al.* Fault-tolerant target localization in sensor networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, 2007(1): 1-9.
  - [8] Banerjee T, Xie B, and Agrawal D P. Fault tolerant multiple event detection in a wireless sensor network[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008, 68(9): 1222-1234.
  - [9] Zhang H H and Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks*, 2005, 1: 89-124.
  - [10] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络移动节点位置并行微粒群优化策略[J]. *计算机学报*, 2007, 30(4): 563-568.
- Wang X, Wang S, and Ma J J. Parallel particle swarm optimization based mobile sensor node deployment in wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(4): 563-568.

傅质馨: 女, 1983年生, 博士生, 研究领域为无线传感器网络.

徐志良: 男, 1962年生, 教授, 研究领域为计算机控制、检测技术.

黄成: 男, 1975年生, 博士生, 助教, 研究领域为检测技术与自动化装置、无线传感器网络.

吴晓蓓: 女, 1958年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为智能控制、无线传感器网络.