

无线 Mesh 网骨干层 2-终端可靠性计算策略

赵蕴龙¹⁾ 单宝龙¹⁾ 高振国²⁾ 门朝光¹⁾ 马延龙¹⁾

¹⁾(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

²⁾(哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要 无线网络环境下的网络可靠性取决于网络中的多种因素. 因此, 在计算无线网络的 2-终端可靠性时, 应该考虑到网络中的各个组成部分对可靠性的影响. 文中根据无线 Mesh 网的结构特性, 提出了一种无线 Mesh 网骨干层的 2-终端可靠性计算策略. 该策略充分考虑到无线网络环境下节点故障和节点间的无线链路故障对网络的 2-终端可靠性的影响, 因此能够更加合理地评价实际环境中的无线 Mesh 网骨干层的 2-终端可靠性. 仿真实验证明, 该策略能够有效提高无线 Mesh 网性能.

关键词 无线 Mesh 网; 2-终端可靠性; 连接矩阵; 路径生成树

中图法分类号 TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.00424

2-Terminal Reliability Computing Strategy for Backbone of Wireless Mesh Networks

ZHAO Yun-Long¹⁾ SHAN Bao-Long¹⁾ GAO Zhen-Guo²⁾ MEN Chao-Guang¹⁾ MA Yan-Long¹⁾

¹⁾(College of Computer Science & Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

²⁾(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract Network reliability in wireless environment depends on many factors, so when calculating the 2-terminal reliability of wireless networks, they should be taken into account. This paper presents a 2-terminal computing strategy, which is used for backbone of Wireless Mesh Networks. The proposed strategy is based on the structural features of Wireless Mesh Networks, and gives full consideration to effects of the wireless node fault and the link fault between the pair nodes. Therefore, it can provide a reasonable evaluation for Wireless Mesh Network backbone layer in actual wireless environment. At last it is proved through the simulation that the given strategy can effectively improve the wireless network performance.

Keywords wireless mesh networks; 2-terminal reliability; connection matrix; route spanning tree

1 引 言

随着人们对无线通信技术需求的日益增加, 无线网络的可靠性要求已经成为网络设计、规划和铺

设阶段中的核心问题. 一个无线网络所提供的服务的可靠程度需要通过一系列的计算参数来量化得到. 这些可以测量的值被称为网络可靠性测度(network reliability measures). 典型的网络可靠性问题是计算由一组节点所组成的通信网络在一段时间内

收稿日期: 2008-09-20; 最终修改稿收到日期: 2009-01-14. 本课题得到国家自然科学基金(60703090)、黑龙江省博士后基金资助. 赵蕴龙, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算机体系结构、计算机网络、移动计算、可信计算等. E-mail: zhaoyunlong@hrbeu.edu.cn. 单宝龙, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为计算机网络和移动计算. 高振国, 1976 年生, 博士, 副教授, 研究方向为认知无线网络、移动计算、网络仿真等. 门朝光, 1963 年生, 博士, 教授, 研究领域为移动计算和可信计算等. 马延龙, 1980 年生, 硕士, 研究方向为无线网络和移动计算.

的可靠性. 根据参与通信的节点数目的不同, 可分为 3 种主要的网络可靠性问题: 2-终端网络可靠性、 K -终端网络可靠性以及全终端网络可靠性^[1-2].

在有线网络环境下, 网络的可靠性分析多数是假设网络节点静止不动, 随时都可能出现故障, 并且它们的位置已知^[3]. 此外, 节点间的链路被认为是不可替代的, 并且其可靠度已知. 无线网络环境下的可靠性分析计算与有线网络截然不同. 无线网络特性决定了在无线网络环境下更容易出现节点故障以及链路断路. 例如, 由于无线广播特性的限制, 无线信道更容易受到环境干扰、天气条件、地形情况以及通信安全等因素的影响而出现通信中断^[4]. 另外, 无线终端设备的能量限制、通信距离限制以及改变位置能力限制等都会影响通信的可靠性, 这是部件本身的因素对无线网络的影响^[5]. 因此, 不能直接把有线网络的可靠性计算方法直接应用到无线网络环境下.

现在已经有一些人开展了无线环境下的 2-终端可靠性问题的研究. 文献[6]根据通用对象请求代理架构(Common Object Request Broker Architectures, CORBA)规范研究了无线环境的 2-终端问题, 并提出了一种新的计算可靠性的方法, 以解决 CORBA 规范中不同网络结构下的通信可靠性问题. 但是文中所介绍的方法必须针对 CORBA 规范下的无线网络, 并且在其所介绍的方法中只针对无线网络节点失效的情况, 而且没有考虑无线链路对计算网络 2-终端可靠性的影响. 文献[7]中则提出了两个算法, 分别用于计算 2-终端可靠性和传感器网络中所允许的数据延迟的最大范围, 文中考虑到了静态的传感器节点的失效对 2-终端可靠性的影响, 但是没有考虑链路失效对 2-终端可靠度计算的影响. 文献[8]提出一个计算从网络源点到汇点(ST)可靠性算法, 这个算法本质上是通过不交和运算生成一些新网络来计算其 ST 可靠性或生成可靠性表达式, 所得到的新网络数量结构简单, 容易计算, 但该算法没有充分考虑无线 Mesh 网络环境下无线链路对网络的影响. 在无线 Mesh 网络环境下, 网络的可靠性是由网络中的多种因素构成的, 其中包括节点的位置变化、节点工作状态变化、链路的连接状态以及其他网络组成部分等^[9]. 因此, 在研究无线 Mesh 网络环境下的 2-终端可靠性问题时, 要考虑到网络中的各个组成部分(主要是无线路由器和无线链路)对整个网络的影响.

本文主要论述无线 Mesh 网中骨干层的 2-终端

可靠性计算问题. 其中通信的两个节点分别称为源节点和目的节点. 其他节点则是源节点与目的节点之间的中继节点, 负责形成源节点与目的节点间的路径. 在无线环境下, 节点间的无线链路随时都有可能失效, 因此需要在源节点和目的节点之间增加冗余节点, 用以提供多跳路径来完成通信. 另外, 根据无线 Mesh 网骨干层的特点, 网络中的节点是相对静止的, 并且不存在能量限制, 但是也会由于环境和处理能力的限制而使中继节点在某个特定时间段内不能被通信的两个节点所使用. 因此, 在计算 2-终端可靠性时, 假设网络节点的可靠性是随时间而动态变化的, 而节点间的链路会由于链路两端节点的工作状态以及环境等因素的限制也变得不可靠.

2 问题描述及相关假设

2.1 问题描述

在一个无线 Mesh 网骨干层 $G(N, E)$ 中, 有 N 个节点, E 条边. 设通信的两个节点分别为 s 和 d , 源节点为 s , 目的节点为 d . 每个节点正常工作的概率为 p_n . 节点失效(即不能作为源节点和目的节点通信链路上的中继节点)概率符合参数为 ρ 的指数分布. E 中的边 e 正常工作的概率为 p_e , 该值取决于链路两端节点的正常工作概率. 因此, 当一条链路的两个端点分别为 n_i 和 n_j 时, 其概率为

$$p_e = Pr(e \text{ 存在} | n_i, n_j \text{ 正常工作}) \quad (1)$$

问题转化为计算源节点与目的节点之间存在可用的通信链路的概率 $Rel_{s,d}(G)$. 这个值会随着时间和节点工作状态的变化而变化. 由于 E 中的每条边都有两种状态: 工作或失效, 因此整个网络的状态可以用向量 $\mathbf{S}(t)$ 来描述: $\mathbf{S}(t) = (S_1(t), S_2(t), \dots, S_E(t))$. 其中, 如果 $\mathbf{S}(t)$ 中的第 e 个元素 $S_e(t)$ 为 1, 则表示在 t 时刻边 e 处于工作状态, 如果为 0 则表示边 e 处于失效状态. 因此 t 时刻网络处于 $\mathbf{S}(t)$ 状态的概率为

$$Pr(\mathbf{S}(t)) = \prod_{e=1}^E P_e^{S_e(t)} (1 - P_e)^{1 - S_e(t)} \quad (2)$$

其中, 各种状态 $\mathbf{S}(t)$ 由状态函数 $\phi_{s,d}(\cdot)$ 测得. 这个状态函数用于判断源节点 s 与目的节点 d 之间是否至少存在一条通信链路. 如果状态 $\mathbf{S}(t)$ 中包含至少一条 s 与 d 间的通信链路, 则 $\phi_{s,d}(\mathbf{S}(t)) = 1$; 否则 $\phi_{s,d}(\mathbf{S}(t)) = 0$. 因此 t 时刻的 2-终端可靠性可用下式描述:

$$Rel_{s,d}[G(t)]=\sum_{S(t)}\phi_{s,d}(S(t))Pr(S(t)) \quad (3)$$

2.2 相关假设

假设无线 Mesh 网中骨干层的节点都携带全向天线,并且具有相同的传输半径.在这个网络中,如果两个节点间存在无线链路,则假设这条链路是双向的.当且仅当两个节点处于彼此的传输范围内并且达到一定信号抗干扰和抗噪声能力时,才会在两个节点间存在双向链路.对于通信的两个节点来说,在这两个节点之间至少应该存在一条可用于数据传输的链路.同时这条可用的通信链路中的所有节点和各段链路必须都正常工作.

一条链路正常工作,当且仅当这条链路允许数据从它的一个端节点传输到另一端节点.在任意时刻,网络中的任意组成部分(网络节点或者是无线链路)可以处于工作或失效状态.当一个节点由于环境因素和节点自身的处理能力限制而不能作为中继转发节点时,我们说这个节点处于失效状态.当两个节点都处于彼此的传输范围并且满足抗干扰和抗噪声要求时,我们就说这两个节点间的链路处于工作状态.图 1 中描述了一个具有 5 个节点的无线 Mesh 网骨干层网络拓扑图.

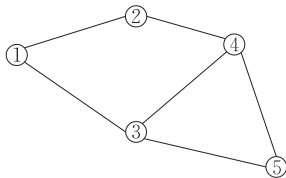


图 1 无线 Mesh 网骨干层网络拓扑图

3 算法描述

本算法中主要包括 3 个部分:生成连接矩阵、连接矩阵的数值替换、 t 时刻 2-终端可靠性计算.

3.1 生成连接矩阵

任意时刻两个节点间是否存在链路取决于这两个节点的相对位置.当两个节点都处于彼此的通信范围内时,这两个节点间就会有一条双向的通信链路.因此可以用一个连接矩阵 $M(t)$ 来表示任意时刻 t 节点间的连接状态.在连接矩阵 $M(t)$ 中,每个元素代表了两个节点间的通信链路,如果通信链路的两个端点分别为 i, j ,则这条通信链路表示为 $c_{i,j}$.因此,在连接矩阵 $M(t)$ 中,第 i 行第 j 列的值与第 j 行第 i 列的值相等(即 $M(t)$ 是对称矩阵).以下是图 1 所对应的连接矩阵:

$$M(t)=\begin{bmatrix} 0 & c_{1,2} & c_{1,3} & 0 & 0 \\ c_{1,2} & 0 & 0 & c_{2,4} & 0 \\ c_{1,3} & 0 & 0 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ 0 & c_{2,4} & c_{3,4} & 0 & c_{4,5} \\ 0 & 0 & c_{3,5} & c_{4,5} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 1})$$

3.2 连接矩阵的数值替换

本算法中涉及到两个主要的替换操作:0-替换和 1-替换.在进行替换操作之前,需要对连接矩阵进行变换操作,得到变换矩阵.以矩阵 1 为例,当这个矩阵需要进行替换操作时,首先要将其与单位矩阵 I_N (N 为无线 Mesh 网中骨干层的网络节点数)相加,然后去掉相加后的矩阵中的第一列和最后一行,从而得到变换矩阵.矩阵 1 变化后的结果如下所示,其中矩阵 2 就是矩阵 1 的变换矩阵:

$$M(t)+I=\begin{bmatrix} 0 & c_{1,2} & c_{1,3} & 0 & 0 \\ c_{1,2} & 0 & 0 & c_{2,4} & 0 \\ c_{1,3} & 0 & 0 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ 0 & c_{2,4} & c_{3,4} & 0 & c_{4,5} \\ 0 & 0 & c_{3,5} & c_{4,5} & 0 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix} 1 & c_{1,2} & c_{1,3} & 0 & 0 \\ c_{1,2} & 1 & 0 & c_{2,4} & 0 \\ c_{1,3} & 0 & 1 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ 0 & c_{2,4} & c_{3,4} & 1 & c_{4,5} \\ 0 & 0 & c_{3,5} & c_{4,5} & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{去掉第 5 行,第 1 列}} \begin{bmatrix} c_{1,2} & c_{1,3} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & c_{2,4} & 0 \\ 0 & 1 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ c_{2,4} & c_{3,4} & 1 & c_{4,5} \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 2})$$

3.2.1 矩阵的 0-替换

0-替换操作是在变换矩阵中(例如上述操作中的矩阵 2)的第一行中选取需要执行 0-替换操作的非“0”元素,将所选取的元素替换成 0.这种替换操作相当于是将网络中的某条链路从网络中去掉,表示这条链路已经处于失效状态.

以图 1 所示无线 Mesh 网骨干层为例,连接矩阵 1 经变换后得到矩阵 2,在矩阵 2 的第一行中有两个非“0”元素 $c_{1,2}$ 和 $c_{1,3}$.现在选择 $c_{1,2}$ 进行 0-替换操作,替换后的矩阵为

$$M_{0\text{-替换}}=\begin{bmatrix} 0 & c_{1,3} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & c_{2,4} & 0 \\ 0 & 1 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ c_{2,4} & c_{3,4} & 1 & c_{4,5} \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 3})$$

3.2.2 矩阵的 1-替换

1-替换操作是将变换矩阵中(例如上述操作中的矩阵 2)的第一行的某个元素替换成 1. 这样做的目的是向目的节点的方向移动一步. 因此, 通过每一次的 1-替换操作就可以发现两个节点间的一段通信链路. 具体操作如下:

1. 选取变换矩阵的第一行中需要执行替换操作的元素, 将该元素替换成 1;
2. 在替换成 1 的元素所在的列中查找值为 1 的元素(不包括刚刚替换成 1 的元素), 设该元素所在的行为 r , 将第 r 行的各个元素值加到第一行相应各个元素上, 得到新的第一行, 然后删除第 r 行;
3. 删除执行 1 替换的元素所在的列.

经过以上操作后就得到执行 1-替换后的矩阵. 以变换矩阵 2 为例, 对第一行中的 $c_{1,2}$ 进行 1-替换, 则替换后的矩阵为

$$\mathbf{M}_{1\text{-替换}} = \begin{bmatrix} c_{1,3} & c_{2,4} & 0 \\ 1 & c_{3,4} & c_{3,5} \\ c_{3,4} & 1 & c_{4,5} \end{bmatrix} \quad (\text{矩阵 4})$$

3.3 t 时刻 2-终端可靠性计算

源节点 s 与目的节点 d 间 t 时刻的 2-终端可靠性是 t 时刻 s 与 d 间所有互不相交的路径的可靠性总和. 这些路径的确定需要根据路径生成树得到. 以下介绍路径生成树的生成规则:

1. 设定 $t=0$;
2. 根据网络拓扑图生成连接矩阵 $\mathbf{M}(t)$, 将 $\mathbf{M}(t)$ 进行变换操作, 生成变换矩阵 \mathbf{M}_{new} .
 - 2.1. 设置层次等级 $Level=0$;
 - 2.2. 选取 \mathbf{M}_{new} 的第一行中的所有非“0”元素作为变换对象. 这些元素的选取顺序是: 若某个非“0”元素所在的列中没有“1”, 则首先选择该元素作为下一步的变换对象; 其他非“0”值则根据它们在第一行中的位置按照序号升序排列, 等待进行相应的变换处理;
 - 2.3. 按照步 2.2 中所选取的元素进行逻辑替换. 替换原则是: 按照元素的选取顺序分别将元素替换为 1, 01, 001, ..., 000...01. 例如, 矩阵 2 中的第一行有 $c_{1,2}$, $c_{1,3}$ 两个非“0”元素, 对这两个元素进行相应的逻辑替换的结果为 $c_{1,2}=1$ 和 $c_{1,2}=0, c_{1,3}=1$;
 - 2.4. 对步 2.3 中所选取的元素逐个进行 0-替换和 1-替换. 根据所选取元素的逻辑取值来决定进行哪种替换. 如果该元素为“1”则表示需要对其进行 1-替换, 如果为“0”则表示需要对其进行 0-替换. 在进行 1-替换时, 如果对应的列中已经没有值为“1”的元素, 则此次 1-替换的结果为 1.
 3. 将层次等级 $Level$ 增 1, 重复步 2, 直到出现以下几种情况: (a) 最后变化后的结果为 1; (b) 变化后结果为 0; (c) 已经到达目的节点;

4. 在所得到的路径生成树中, 确定所有可选路径, 进行 2-终端可靠性计算. 路径选取原则是: 从根节点出发, 到达非“0”叶子节点的过程中所经过的所有节点组成了源节点与目的节点间的一条通信链路. 将所有链路带入式(3)中, 并结合式(1)和式(2)就可以得到源节点与目的节点在 t 时刻的 2-终端可靠性 $Rel_{s,d}(t)$.

5. 增加 t 值, 检查是否已经到达仿真时间, 如果已经到达时间, 则仿真结束; 否则回到步 2, 重复上述操作.

4 实例说明

以图 1 所示的网络为例说明上述过程. 现在假设节点 1 要向节点 5 发送数据, 即源节点为节点 1, 目的节点为节点 5.

在 $t=0$ 时, 首先生成连接矩阵 $\mathbf{M}(t)$ (矩阵 1), 然后对连接矩阵进行变换, 得到变换矩阵(矩阵 2). 初始状态下层次等级 $Level=0$, 在矩阵 2 中的第一行中有两个非“0”元素 $c_{1,2}$ 和 $c_{1,3}$, 根据元素的处理顺序原则决定先处理 $c_{1,2}$, 再处理 $c_{1,3}$. 然后对这两个元素进行逻辑变换, 根据所得到的处理顺序得 $c_{1,2}=1$ 和 $c_{1,2}=0, c_{1,3}=1$, 也可以表示成 $c_{1,2}$ 和 $\overline{c_{1,2}}$ $c_{1,3}$. 因此在层次 $Level=0$ 阶段有两条到达目的节点 5 的路径, 其中一条是从 $c_{1,2}$ 出发的路径, 另一条是当 $c_{1,2}$ 失效时, 从 $c_{1,3}$ 出发的路径. 分别对所选取的元素序列进行相应的 0-替换及 1-替换. 由于 $c_{1,2}$ 代表“1”, 因此对矩阵 2 中的 $c_{1,2}$ 进行 1-替换; 同理对 $\overline{c_{1,2}}$ $c_{1,3}$ 先进行 0-替换再进行 1 替换. 这样, 得到了两个新的变换矩阵, 路径生成树的第 0 层已经生成.

将层次等级 $Level$ 加 1, 进行第二层的操作. 由于第一层操作结束后得到两个变换矩阵, 因此在第二层中需要分别对这两个矩阵进行上述操作. 如此操作下去, 就会得到源节点 1 与目的节点 5 间的各条路径. 得到的路径生成树如图 2 所示.

得到路径生成树以后, 选取树中非“0”叶子节点所在的路径, 根据这些路径, 结合式(1)、式(2)和式(3)即可计算源节点 1 与目的节点 5 在 $t=0$ 时的 2-终端可靠性 $Rel_{1,5}[G(t_0)]$, 如式(4)所示.

$$Rel_{1,5}[G(t_0)] = Pr(c_{1,2}c_{1,3}c_{3,5}) + Pr(c_{1,2}c_{1,3}\overline{c_{3,4}c_{3,5}}c_{2,4}c_{4,5}) + Pr(c_{1,2}c_{1,3}\overline{c_{3,5}}\overline{c_{3,4}c_{4,5}}) + Pr(c_{1,2}\overline{c_{1,3}}c_{2,4}c_{4,5}) + Pr(c_{1,2}\overline{c_{1,3}}\overline{c_{2,4}c_{4,5}}\overline{c_{3,4}c_{3,5}}) + Pr(\overline{c_{1,2}}c_{1,3}c_{3,5}) + Pr(\overline{c_{1,2}}c_{1,3}\overline{c_{3,5}}\overline{c_{3,4}c_{4,5}}) \quad (4)$$

尽管图 1 所示的网络拓扑结构非常简单, 并且得到的可靠性表达式(式(4))中只涉及到 7 条路径,

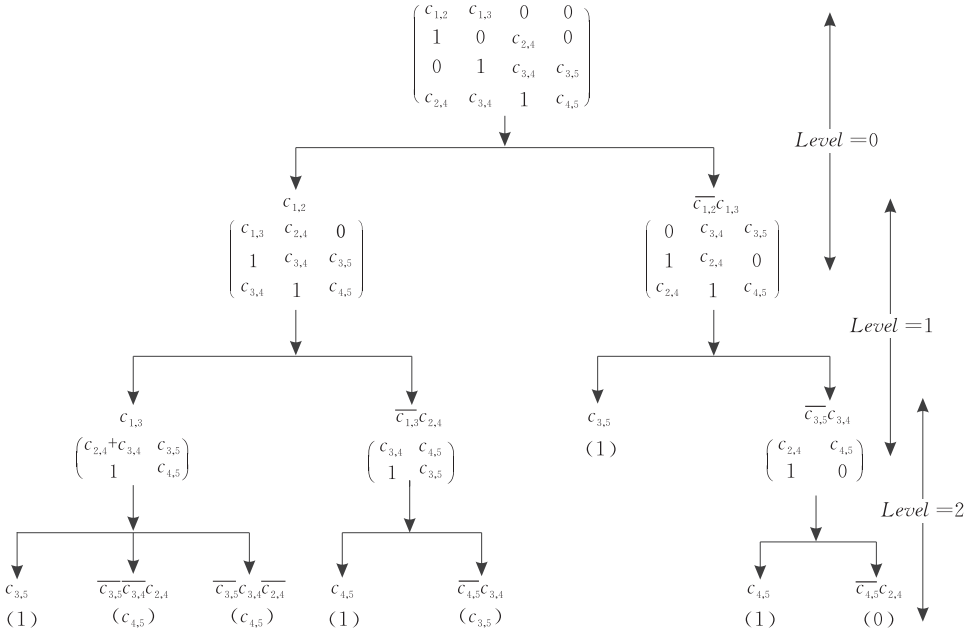


图 2 路径生成树

但是在这个表达式中却完全反映出了源节点与目的节点之间的 64 种 (2^6) 链路组合状态. 因此, 采用本算法能够充分地评价无线 Mesh 网的两个节点间的 2-终端可靠性.

本算法简易且应用性较好, 因此它可以应用到目前大部分已经存在的路由协议中, 并且在提高路由可靠性同时协议开销增加得非常小. 这在后面的仿真实验中可以得到验证.

5 仿真实验与分析

仿真实验时, 将本文提出的 2-终端可靠性算法应用到 AODV 协议^[10], 从节点失效对网络性能的影响和节点链路冗余对 2-终端可靠性的影响这两方面考虑, 将应用本算法的 AODV 协议和 AODV 协议进行比较, 说明该算法的有效性. 以下, 将应用本算法的 AODV 协议称为 AODV-with-2.

首先, 通过仿真实验研究 Mesh 网络骨干层不同的节点失效率对整个网络性能参数(网络的吞吐量、丢包率、端到端的延迟等)的影响; 然后, 利用仿

真实验的结果, 分析影响无线 Mesh 网骨干层的 2-终端可靠性的因素及算法对提高网络可靠性究竟有多大帮助.

本实验采用 NS-2 网络仿真平台, 选取模拟场景为 2000m×2000m 栅格结构, 节点数目为 6、11、和 27, 如图 3 所示. 选择栅格结构的主要目的是保证在仿真的环境下有较高的可靠性, 无线节点的传输范围是 250m. 基于这种结构, 在源节点和目的节点之间建立一条链路至少需要三跳.

无线 Mesh 网的模拟环境和参数如表 1 所示.

表 1 模拟场景参数设置

参数	设定值
模拟场景大小	2000m×2000m
节点个数	6, 11, 27
传输范围	250m
业务类型	CBR (Constant Bit Rate)
仿真时间	500 s
MAC 类型	IEEE802. 11
数据包个数	1000
数据包大小	1000 byte
数据包发送间隔时间	0. 5 s
路由协议	AODV, AODV-with-2

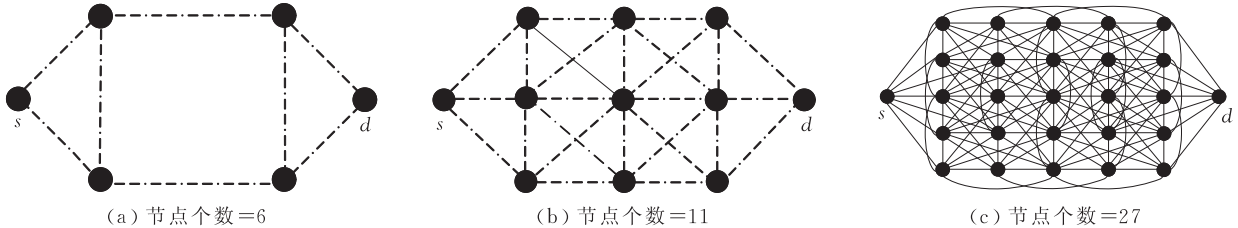


图 3 无线 Mesh 网节点在栅格结构中的摆放

5.1 节点失效对无线 Mesh 网性能的影响

无线 Mesh 网中的任何一个节点失效意味着所有与它相连的无线链路都将失效. 因此, 任何一个节点的失效都将导致网络拓扑结构的改变和影响网络的可靠性. 我们研究节点失效率对网络性能的影响, 将 AODV-with-2 协议和 AODV 协议进行比较, 例如, 包的丢失率和控制信息开销之间的关系. 当节点失效率提高时, 网络中存在大量的控制信息 (如 AODV 协议的 RREQ、RREP), 并且包的丢失率也明显地提高了, 如图 4 所示. 由于节点失效率提高, 路由协议必须通过其余的节点发现新的路径来处理失效节点导致的链路不通. 然而, 在模拟区域布置更多的节点同时改变拓扑结构能够降低节点失效带来的影响. 例如, 如果网络的拓扑结构如图 3(a) 所示, 当整个网络节点的失效率是 0.2 和 0.3 时, 观察图 4(a), 对于 AODV 协议仅有 78.8% 和 65.4% 的

数据可以从源节点传递到目的节点; 而应用本算法的 AODV-with-2 协议, 数据投递率可以提高到 84.8% 和 73.9%. 但是平均开销只增加了 0.024%. 增加节点数目同时改变网络拓扑结构, 网路的拓扑结构如图 3(b) 和图 3(c) 所示, 网络的节点失效率同样是 0.2 和 0.3 时, 对于 AODV 协议从源节点到目的节点的数据投递率分别增加到 86.1% 和 67.3% (如图 4(b) 所示)、89.8% 和 79.5% (如图 4(c) 所示); 而对于 AODV-with-2 协议, 数据投递率分别增加到 94.1% 和 75.2%、95.1% 和 85%. 因此, AODV-with-2 协议的性能有很好的可靠性, 关键是在保持较高的分组投递率的同时, 分组开销并没有增加很多; 另一方, 无线 Mesh 网的可靠性不仅仅取决于组成网络部件的可靠性, 同时也依赖网络拓扑结构中从源节点到目的节点之间链路的冗余度.

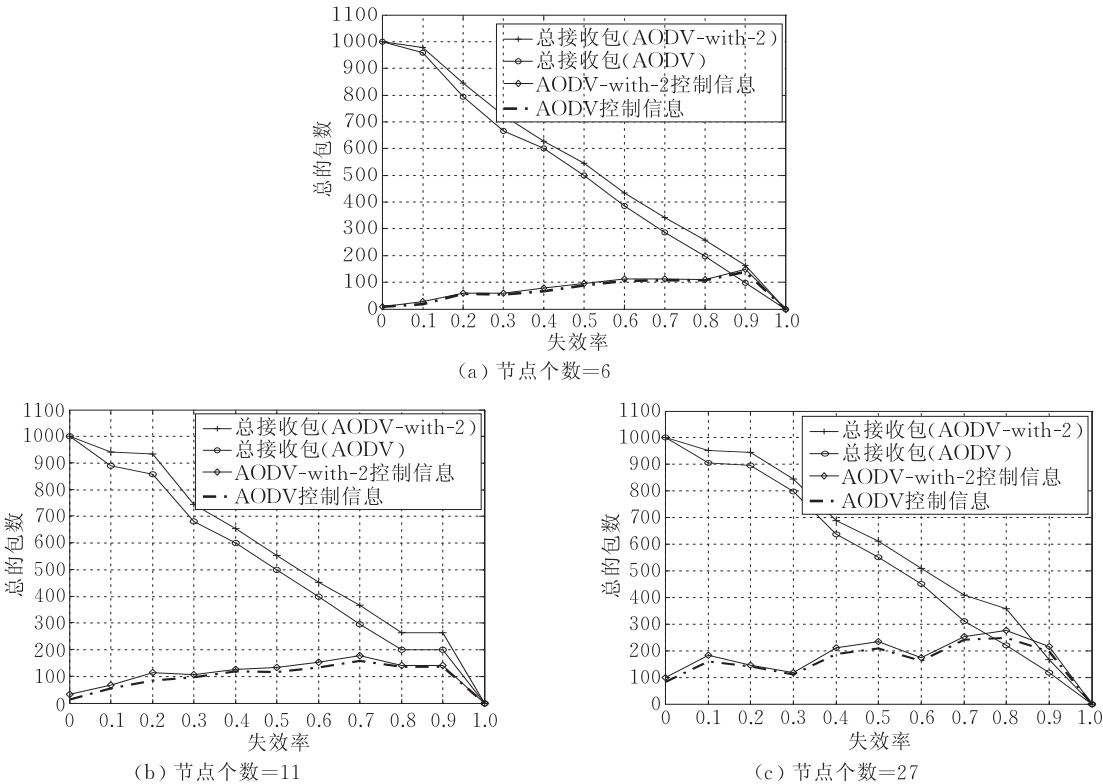


图 4 接收数据包和控制信息

5.2 节点间链路冗余对 2-终端可靠性的影响

分组投递率是指接收数据和发送数据之比. 分组投递率是衡量网络可靠性的重要参数, 可以反映网络的连通性即丢包率. 如图 5, 节点数多的网络拓扑结构、意味着节点之间可能形成的链路也就多, 分组数据包投递率应明显高于节点数少的. 这是因为, 随着模拟时间的进行, 节点的失效率也随之提高, 导

致可用链路减少. 当网络中的某个节点失效时, 源节点发送的数据无法到达目的节点, 端到端的延迟增加到一定程度, 引发数据包丢失. 而在本模拟环境下节点数较多的无线 Mesh 网其源节点和目的节点的冗余链路多, 当某个节点失效时, 不会对其造成太大的影响. 同时可以看到 AODV-with-2 两条实线, 它们的拓扑结构如图 3(b) 和 (c) 所示, 分组投递率高

于 AODV 协议的投递率,这也充分的说明了本算法能够提高网络可靠性.

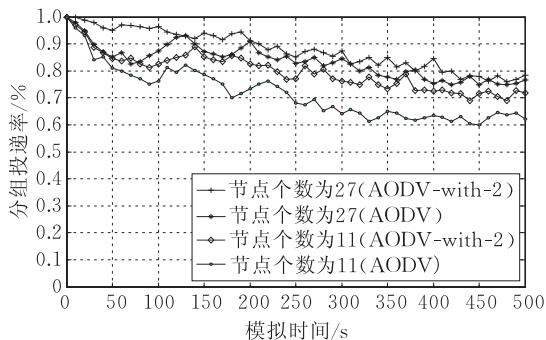


图 5 分组投递率

再观察图 6,在本仿真实验的条件下,网络节点失效个数对整个网络可靠性影响是很大的.网络的可靠性定义为 Rel , $Rel = \alpha \times ET + \beta \times OL + \gamma \times DE$, 其中, ET 是处理时间(指从源节点发送路由请求分组开始,一直到目的节点接收到所有数据的平均处理时间)、 OL 是路由开销、 DE 是端到端的时延,这里取 $\alpha = 0.6$ 、 $\beta = 0.1$ 、 $\gamma = 0.3$,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$. 节点数为 6 的拓扑如图 3(a)所示,当网络失效节点数达到 2 个,整个网络可靠性几乎是零,即网络无法进行正常的数据通信业务.节点数为 27 的拓扑如图 3(c)所示,同样失效节点数达到 2 个,整个网络还保持较高的可靠性.从本图可以看到 AODV-with-2 协议的可靠性高于单纯的 AODV 协议,这也印证了本算法对整个网络可靠性是有一定帮助的.

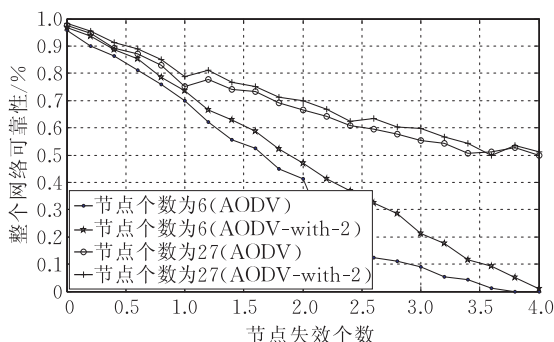


图 6 节点失效个数对网络可靠性的影响

从以上的仿真实验中,可以得出:

(1) 在一定条件下,网络中节点冗余度对网络可靠性影响是很大的,不单单是组成网络部件决定了网络的可靠性.

(2) AODV-with-2 协议明显提高了整个网络的可靠性.

6 结 论

本文提出了一种计算无线 Mesh 网骨干网 2-终端可靠性的算法,该算法是在已有的算法基础上进行改进,可以说是这些算法的一种延伸.在无线 Mesh 网中,节点和链路都可能失效,所以假设它们完全可靠是不现实的,但目前很多算法都是基于这种假设前提的.因此,本文提出的算法克服了已有一些算法的不足,如仅仅考虑静止节点的失效率,充分考虑拓扑结构变化对链路的失效和连通率的影响,运用连接矩阵及其置换策略对其加以刻画;并采用路径生成树的方法来全面、快速查找两节点间可用的路径.该算法对无线 Mesh 网骨干网 2-终端可靠性评估具有一定的针对性和适应性.运用本算法对已有的 AODV 协议进行改进,仿真实验验证了该算法简单有效,对于提高无线 Mesh 网路由性能有很大帮助.

参 考 文 献

- [1] Fulya Altıparmak, Berna Dengiz. Reliability estimation of computer communication networks; ANN modes//Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications. Turkey, 2003; 1353-1358
- [2] Feng Hai-Lin, Liu San-Yang, Song Yue. A method for calculating the bound of all-terminal reliability of communication network. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11): 1868-1870 (in Chinese)
(冯海林, 刘三阳, 宋月. 通信网全端可靠性界的一种计算方法. 电子学报, 2004, 32(11): 1868-1870)
- [3] Rai S, Kumar A, Prasad E V. Computing terminal reliability of computer network. Reliability Engineering, 1986, 16: 109-119
- [4] Agrawal D P, Zeng Qing-An. Introduction to Wireless and Mobile Systems. Pacific Grove, California: Brooks/Cole, 2003
- [5] Liu Ai-Min, Liu You-Heng. Traffic performance analysis of network with unreliable components. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(10): 1459-1462 (in Chinese)
(刘爱民, 刘有恒. 部件不可靠下的通信网业务性能分析. 电子学报, 2002, 30(10): 1459-1462)
- [6] Chen X, Lyu M R. Reliability analysis for various communication schemes in wireless CORBA. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 232-242
- [7] AboElFotouh H M F, Iyengar S S, Chakrabarty K. Computing reliability and message delay for cooperative wireless distributed sensor network subject to random failures. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(1): 145-155

[8] Gao Fei, Zhang Shao-Zhong, Wang Guang-Xing. A rapid algorithm for computing ST reliability of radio-communication networks. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(6): 1035-1039(in Chinese)
(高飞, 张少中, 王光兴. 计算无线通信网络 2-终点可靠性的快速算法. 计算机学报, 2007, 30(6): 1035-1039)

[9] Andrew A D M, Show P, Varshney Upkar. Reliability and

survivability of wireless and mobile networks. Computer, 2000, 33(7): 49-55

[10] Perkins C E, royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing//Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications. New Orleans, LA, 1999: 90-100



ZHAO Yun-Long, born in 1975, Ph.D., associate professor. His research interests include computer architecture, computer networks, mobile computing and dependability computing etc.

SHAN Bao-Long, born in 1982, M. S. candidate. His research interests include computer networks and mobile

computing.

GAO Zhen-Guo, born in 1976, Ph. D., associate professor. His research interests include cognitive wireless networks, mobile computing and network simulation etc.

MEN Chao-Guang, born in 1963, Ph. D., professor. His research interests include mobile computing and dependability computing etc.

MA Yan-Long, born in 1980, master. His research interests include wireless networks and mobile computing.

Background

Wireless Mesh Network (WMN) is a multi-hop wireless network. Deployed in mesh topology, Internet access is provided by wireless multi-hop relay in Wireless Mesh Networks. With the development of wireless communication technology, wireless networks have changed people's daily life dramatically by providing mobile internet access. To extend the coverage of wireless access networks and reduce the deployment cost, wireless mesh networks are introduced.

It has been noticed that the existing researching achieve-

ments on wired networks reliability do not meet the requirement of wireless networks. This paper gives a method which is used for computing the 2-terminal reliability of the backbone for WMN. It has considered the reliability of the MRs, IGWs and wireless links between them in the backbone of WMN, so it is suitable for measuring the 2-terminal reliability between communication nodes in the actual wireless network environment. It is also proven to be efficient through simulations.