

一种基于拓扑结构的网络两终端可靠性评估方法

何明¹ 陈国华^{1,2} 江俊^{1,3} 梁文辉^{1,4}

(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)¹ (中国人民解放军 65655 部队 赤峰 024000)²

(中国人民解放军 66033 部队 长子 046604)³ (中国人民解放军 61345 部队 西安 710004)⁴

摘要 为了评估一个大规模的实时长距离通信网络的可靠性,提出一种基于拓扑结构的网络两终端可靠性的计算方法。在化简网络拓扑结构的基础上,充分考虑链路和节点的可靠性,通过转置矩阵的积来表示两终端可靠性。实验结果表明,有向链路对不同网络性能测量产生影响,虽然失效频率和链接失效率很相似,但两终端可靠性多项式的复零点的位置相差很大,同时,转置矩阵的尺寸随着网络增大而增大。该方法对于优化网络、合理分配平均维修时间有实际应用价值。

关键词 网络可靠性,拓扑结构,两终端,评估

中图法分类号 TN915 **文献标识码** A

Method for Evaluating on Two-terminal Reliability Based on Topology

HE Ming¹ CHEN Guo-hua^{1,2} JIANG Jun^{1,3} LIANG Wen-hui^{1,4}

(Institute of Command Automation, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China)¹

(65655 Armies, PLA, Chifeng 024000, China)² (66033 Armies, PLA, Changzi 046604, China)³

(61345 Armies, PLA, Xi'an 710004, China)⁴

Abstract In order to evaluate the reliability of a large-scale real-life long-haul communication network, a method for computing network two-terminal reliability based on topology was presented. On basis of simplifying the topology, considering the reliability of edges and node, the two-terminal reliability was expressed by transfer matrices. The experiment results show that the edges being directed will have influence on various measures of network performance. Although the failure frequency and the failure rate of the connection are quite similar, the locations of complex zeros of the two-terminal reliability polynomials exhibit strong differences. And the size of transfer matrices will become bigger with the increasing of network. The method is valuable for optimizing network and assigning the mean time of reparation.

Keywords Network reliability, Topology, Two-terminal, Evaluation

网络规模庞大、行为复杂等因素对网络的分析和设计都带来了巨大困难。同时,人们越来越关心网络正常工作的能力,因此,网络的可靠性便成为网络设计和分析中必须考虑的重要因素。通信网可靠性的研究始于 1956 年,以 Moore 和 Shannon 发表了关于不可靠的延时器件设计可靠电路问题的研究^[1] 论文为标志,此后通信网的可靠性逐步引起了人们的重视,学术界提出了不少有关通信网可靠性的测度,主要分为:网络的抗毁性 (Invulnerability)、网络的生存性 (Survivability)、网络的有效性 (Availability)、网络的可行性 (Feasibility)。其中,网络的抗毁性和生存性是基于网络拓扑结构的可靠性测度,而网络的有效性和可行性是基于网络业务性能的可靠性测度。

针对分析的范围不同,网络可靠性的意义也有所不同,主要包括两终端可靠性、k 终端可靠性和全终端可靠性,其中,两终端可靠性是指网络中任意两节点之间存在一条连通路径的概率,即网络中任意给定的节点对中的两节点均处于工作状态,且两节点之间至少存在一条路径的概率。

1 国内外研究发展现状

终端可靠性的评价方法分为模糊法和精确法。现有的精确评估法分为两类:第一类包括网络状态列举^[2]、网络最小路集或最小割集列举^[3]。网络状态列举方法只能用于非常小的网络,网络最小路集或最小割集列举方法比第一种方法更为高效,它们根据容斥原理对集合中的不相关元素进行统计得到可靠性值,但是也只能用于最多 20 个节点的低密度小型网络分析。第二类是基于网络拓扑化简,将网络中的一些特殊结构,如串并结构、多边形结构^[4]、三角形结构^[5]等,用简单的结构去替代,并得到相应的可靠性值,直至整个网络缩减为 1 条链路。但由于大多数网络仅有一部分可进行类似的拓扑化简,因此,研究者提出了因子分解的方法^[6],即将问题分解为两个互斥的子问题进行分析,第一个子问题假定部件完全失效,第二个子问题假定部件完全可靠,然后对子问题继续分解直到最简单的问题。随着网络规模的扩大,因子分解法也无法适用。研究者又将二元决策图 (Binary Decision Diagram,

到稿日期:2011-01-26 返修日期:2011-04-09 本文受国家自然科学基金项目(60974086),江苏省自然科学基金项目(BK2010132)资助。

何明(1978-),男,博士后,副教授,硕士生导师,主要研究方向为信息安全,E-mail:blue_horse@126.com。

BDD)^[7]方法引入了网络化简,证明了二元决策图方法的效率,该方法可以用于某些大型网络的可靠性分析。

计算终端可靠性的问题是一个典型的 NP-hard 问题^[8],模糊法求解的最好方法就是求解可靠性值的精确解的上、下界,上、下界之间包含了精确解,如果上、下界的差值足够小,那么可以作为精确解的有效估计。当然,即使差值很大,精确解也会在上、下界之间。研究者提出了大量的求解边界的方法,同样分为两类,第一类是基于网络状态^[9]、网络最小路集及最小割集列举的,其中 Shogun 提出的基于网络强连接部分的算法找到了最紧的边界。但是这类方法随着网络的增大,计算复杂度以指数上升,虽然它们比相应的精确算法有效,但是也只能用于较小的网络^[10]。

在概率上、下文相关环境中计算网络可靠性的问题在理论和实践中都很重要,传统方法(极限判定、分解法和算法、蒙特卡洛评估、可靠性多项式研究等)^[11,12]只给出了网络规模增大时的近似值,甚至还要求网络节点不能失效,链路的可靠概率必须相等。本文考虑一个任意规模的实时长距离通信网络的有向图,提出了一种两终端可靠性的精确计算方法。其解包含了传输顶点的乘积,分别考虑了链路和节点的可靠性。

在该研究领域,目前主要的研究方向是网络的抗毁性和可生存性研究,热点话题是无线 Mesh 网、移动 Ad-hoc 网络、无线传感网等无线通信网的可靠性研究。

2 理论基础

网络模型为:图 $G=(V, E)$ 表示通信网,为无自环的无向连通图, $V=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 代表网络中的节点集合; $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 代表网络中的链路集合。每条链路和每个节点的失效都是随机和相互独立的,并具有一个已知的失效概率。在无向图中,如果终端 t 与节点 u 通过链路 e 相连,可靠性分别为 p_u 和 p_e ,则有:

$$Rel_2(G) = (1 - p_e)Rel_2(G \setminus e) + p_e p_u Rel_2(G \cdot e) + p_e(1 - p_u)Rel_2(G \setminus u) \quad (1)$$

式中, $G \setminus e$ 和 $G \setminus u$ 是 e 和 u 删除后的图, $G \cdot e$ 是通过收缩 e 后 t 和 u 合并后的图。式(1)仅计算了解析事件概率的和,在此需要将分解应用于有向图,通过删除所有起始于 t 的链路,然后再用式(1)维护图即可以做到。

图 1 中,源为 S_0 ,目标为 S_n 或 T_n 。用有向 K_4 阶计算 $R_n = Rel_2(S_0 \rightarrow S_n)$ 的方法构造块细节,如图 2 所示,链路和节点根据可靠性作了修正。

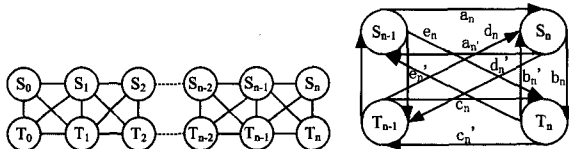


图 1 K_4 阶网络示意图

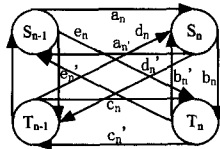


图 2 有向 K_4 阶最后构造块

首先分析图 1 中根据前文的原则,移出不相关链路,即索引为 a_n', b_n', d_n' 的链路。首次应用式(1)是在图 3 中,每个前因子都列在相关次级图的前面。注意 3 个次级图构造是一样的,区别在于链路的可靠性。很明显第二次应用式(1)是计算以 S_{n-1} 或者 T_{n-1} 为终点的两终端可靠性,这需要两终端可靠性 $Rel_2(S_0 \rightarrow T_n)$ 的类似分解,此后得到两个目标 S_n 和 T_n 的递归关系。然而因为两个目标在置换 $a_n \leftrightarrow e_n, c_n \leftrightarrow d_n$ 和 $S_n \leftrightarrow T_n$ 中是同样的,上述并不是必须的。 R_n 可以用 5 个多项式 a_n, \dots, T_n 的和来表示,这对 10×10 的转置矩阵 Rel_2

($S_0 \rightarrow T_n$)也适用。

$$R_n = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) M_n M_{n-1} \dots M_1 M_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

对于 $Rel_2(S_0 \rightarrow T_n)$,左侧的向量应该是 $(0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$,转置矩阵为:

$$M_i = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ u_6 & u_7 & u_8 & u_9 & u_{10} \\ u_{18} & u_{17} & u_{14} & -u_4 - u_9 & -u_5 - u_{10} \\ u_{20} & u_{19} & u_{15} & -u_9 & -u_{10} \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & -x_4 & -x_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

当 $i=0$ 时,设 $a_0=d_0=1, c_0=e_0=0$,这些公式可应用到多数普通有向 K_4 阶,发现在无向的情况下可以设 $a_i'=a_i, b_i'=b_i$ 等。

3 算法实现

3.1 转置矩阵

无论有向图还是无向图,都要置 $T_0 = T_n = 0, b_i = 0 (0 \leq i \leq n)$,这在无向情况下不会改变转置矩阵的秩(仍为 5),但在有向环境下进一步地化简 $a_i'=b_i'=c_i'=d_i'=e_i'=0$,转置矩阵可化简到 3×3 ,即:

$$\tilde{M}_i = \begin{pmatrix} a_i S_i & d_i S_i & a_i d_i S_i \\ e_i T_i & c_i T_i & c_i e_i T_i \\ -a_i e_i S_i T_i & -c_i d_i S_i T_i & \chi_i S_i T_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, $\chi_i = a_i c_i (1 - d_i)(1 - e_i) + d_i e_i (1 - a_i - c_i)$,因此:

$$\tilde{R}_n = (1 \ 0 \ 0) \tilde{M}_n \tilde{M}_{n-1} \dots \tilde{M}_1 \tilde{M}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

很多研究中,链路的可靠性都假设为统一的 p ,目的是得到连接可靠性的普遍行为,可以将节点看作是理想的(设其可靠性为 1)。本文中,仍认为节点是非理想的,可靠性均为 ρ 。有两个独立的参数描述 $Rel_2(S_0 \rightarrow S_n)$,它们可以更好地分析链路和节点,如果仅用这两个参数,就需要奇异转置矩阵。式(2)和式(5)表明两终端可靠性可以表示为矩阵的 n 次幂。例如式(4)可得:

$$\tilde{M}(p, \rho) = \begin{pmatrix} p\rho & p\rho & p^2\rho \\ p\rho & p\rho & p^2\rho \\ -p^2\rho^2 & -p^2\rho^2 & p^2\rho^2(2 - 4p + p^2) \end{pmatrix} \quad (6)$$

3.2 生成函数

由于 $\tilde{M}(p, \rho)$ 连续幂的固有递归性,两终端可靠性也有这个特性,生成函数的形式是存储所有必要信息的简单且有效的方法。定义如下:

$$\zeta(z) = \sum_{n=0}^{\infty} Rel_2(S_0 \rightarrow S_n) z^n \quad (7)$$

该式可以直接计算,在此 $\zeta(z)$ 是 z 的有理分式,即:

$$\zeta(z) = \frac{N(z)}{D(z)} \quad (8)$$

利用式(5)和式(6)(有向配置),可以计算 $Rel_2(S_0 \rightarrow S_n)$ 的第一个值, n 为 2、3、4 等,目的是获取 $\zeta(z)$ 中 z 的扩展。利用转置矩阵多项式 $1/z$ 特性,可以增加这种删节扩展,积在 $z=0$ 附近一系列的扩展得出 $N(z)$ 。计算不需要判定转置矩阵的特征值或者特征向量。

3.3 解析公式

两终端可靠性源自相关生成函数 $\zeta_a(z)$ 和 $\zeta_d(z)$ 的分解有理分式, 因为矩阵的特征值是生成函数极点的倒数。

(1) 无向情况: 对于理想节点 ($\rho=1$) 可以进一步地化简, 因为 $D_u(z)$ 对 z 度数为 2, 因此可得:

$$R_n^{(u)}(\rho=1; n \geq 2) = a_+(\zeta_+^n) + a_-(\zeta_-^n) \quad (9)$$

其中,

$$\zeta_{\pm}^{(u)} = \frac{\rho}{2}(2+2\rho-6\rho^2+3\rho^3 \pm \sqrt{A}) \quad (10)$$

$$a_{\pm} = \frac{\beta \pm (1-4\rho+2\rho^2)\sqrt{A}}{4(1-\rho)^2(1-\rho+\rho^2)^2\sqrt{A}} \quad (11)$$

$$A = 4-8\rho+36\rho^2-100\rho^3+128\rho^4-76\rho^5+17\rho^6 \quad (12)$$

$$B = 2-10\rho+38\rho^2-59\rho^3+40\rho^4-10\rho^5 \quad (13)$$

当 $\rho < 1$ 时, 对 3 个特征值求和, 解析表达式可能会更复杂。

(2) 有向情况: 即使 $\rho \neq 1$, $D_d(z)$ 仍可是 2 维的, 仍可得到两个特征值, 即:

$$R_n^{(d)}(n \geq 2) = a_+(\zeta_+^{(d)})^n + a_-(\zeta_-^{(d)})^n \quad (14)$$

其中,

$$\zeta_{\pm}^{(d)} = \frac{\rho\rho}{2}(2+p\rho(2-4\rho+p^2) \pm \sqrt{A'}) \quad (15)$$

$$a_{\pm} = \frac{\rho}{4}\left(1 \pm \frac{2-p\rho(2-4\rho+p^2)}{\sqrt{A'}}\right) \quad (16)$$

$$A' = 4-4\rho\rho(2-2\rho+p^2) + \rho^2\rho^2(2-4\rho+p^2)^2 \quad (17)$$

4 实验结果分析

不同可靠性多项式的结构可以通过在复平面内研究零点位置来了解它们。在可靠性研究中, 对全终端可靠性多项式 $Rel_1(\rho)$ 的通用方法的研究引入了 Brown-Colbourn 猜想, 根据此猜想, 所有的零点都可以在 $|1-\rho| < 1$ 区域内找到。这对于混联图也是有效的, 该猜想并不局限于通常情况。 $Rel_1(\rho)$ 联系到 Tutte 多项式, 而后者是一个图的常量。

随着 n 的增长, 可靠性多项式的复零点也在增加, 因为转置矩阵的特性, 对应连续的 n 可靠性多项式有递归的关系。 Beraha, Kahane 和 Weiss 研究了通用问题, 可以通过下列简单方式来理解: 如果可靠性多项式是 $\sum_i a_i \lambda_i(\rho)^n$ 的形式 (λ_i 是递归的特征值), 在 n 很大时, 大模数只有两个特征值, 称为 $\lambda_1 \lambda_2$, 因此当 $|\lambda_1(\rho)| = |\lambda_2(\rho)|$ 时可靠性多项式将归零。等式定义了复平面内一个曲线集, 所有的零点聚在 $n \rightarrow \infty$ 的极限。

$Rel_2(\rho)$ 在复平面上零点的位置也是一个值得研究的问题, 即使其不是图的不变式。本文新提出的额外参数, 节点可靠性 ρ 对曲线的影响很大, 在曲线上 $Rel_2(\rho)$ 的零点聚集于 $n \rightarrow \infty$ 。事实上, 结构变化出现在 ρ 的临界值, 而临界值可由特征值表达式推导出。

从图 3 和图 4 中可以看到两终端可靠性多项式复零点的位置, 其中, 图 3 中 $n=100$, ρ 从 1 到 0.1; 图 4 中 $n=50$, ρ 从 1 到 0.1。这些零点的结构在有向和无向情况下很不相同。在两种配置中, 部分环境中实正半轴的确是曲线的极限。无向环境中没有实线段严格表示 $\rho_{c1} = \frac{8}{9}$ (最近曲线的单交集在实轴位于 $\rho = \frac{3}{2}$), 无法获取确切其他 ρ 的临界值。在有向环境中, 该线段接近并突破右半平面, $\rho_{c2} \approx 0.51242$ (度数为 10 的多项式的根)。随着 ρ 的减小, 两种结构都循环加上额外的线

段, 该线段为 $\rho^{-\frac{1}{3}}$, 限制在渐进值 $|p_{circle}|$ (循环) 和 p_{\pm} (线段在实正半轴的端点) 上, 同时拓展率也是独特的。

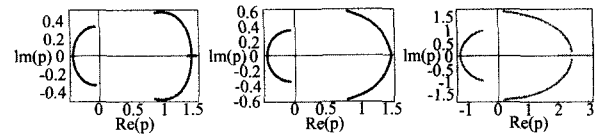


图 3 无向阶的复零点位置

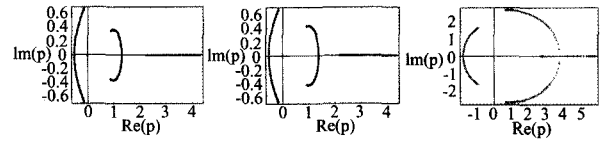


图 4 有向阶的复零点位置

可见 $\zeta_{\pm}^{(u)}$ 和 $\zeta_{\pm}^{(d)}$ 中的节点是理想的。很明显, ζ_+ 几乎总比 ζ_- 大, 尤其在 ρ 位于 1 附近时。 $\zeta_+^{(u)}$ 和 $\zeta_+^{(d)}$ 在 $0 \leq \rho \leq 1$ 的范围是很接近的, 但第二个特征值在有向环境下要大很多。随着 n 的增长, 第二个特征值的影响会削弱, 因此两终端可靠性显示出渐进指数分布性质 $R_n \propto \zeta_+^n$, 比例因子为 ζ_+ , 即最大系数的特征值。甚至当 $n \approx 10$ 时, 渐进限制仍有很好的近似性。

移动 Ad-hoc 网的可靠性不仅依赖于节点、链路可靠性, 还依赖于网络拓扑的冗余度以及节点在网络中的分布。无线 Mesh 网络具有高移动性和链路低效率, 导致网络的可靠性下降和端到端时延的增加。因此, 此方法在满足假设条件下可适用。

结束语 针对网络可靠性的发展趋势问题, 本文提出了基于拓扑结构的网络两终端可靠性的计算方法, 并在理论基础、算法实现、实验分析等方面进行了全面阐述。同时, 在计算网络可靠度的精确解方面进行了有益的探讨。主要工作包括:

(1) 从 1956 年至 2009 年对网络可靠性的研究发展进行了分析、探讨;

(2) 提出了基于 K_4 阶网络模型的精确可靠性求解方法;

(3) 实现了两终端可靠性算法。

未来的发展方向是, 在设备失效概率范围很大的情况下, 计算尽可能接近的上下界, 考虑地面作业期间的网络行为也很重要, 因为这种情况下某些设备更没有保障。传统方法不能有效地评估一个任意规模的实时长距离通信网络的可靠性, 本文提出的基于拓扑结构的网络两终端可靠性的计算方法, 能够对优化网络、合理分配平均维修时间有实际应用价值。

参考文献

- [1] Moore E F, Shannon C E. Reliable circuits using less reliable relays[J]. Journal of the Franklin Institute, 1956; 191-208, 281-298
- [2] Yoo Y B, Deo N. A comparison of algorithms for terminal-pair reliability[J]. IEEE Tran. Reliability, 1988, 37(2); 210-215
- [3] Ahmad S H. Simple enumeration of minimal cutsets of acyclic directed graph[J]. IEEE Trans. Reliability, 1988, 27(5); 484-487
- [4] Choi M S, Jun C H. Some variant of polygon-to-chain reductions in evaluating reliability of undirected network[J]. Microelectron. Reliab., 1995, 35(1); 1-11
- [5] Gadani J P. System effectiveness evaluation using star and delta transformations[J]. IEEE Trans. Reliability, 1981, 30(1); 43-47

- [6] Theologou O, Carlier J. Factoring and reductions for networks interests with imperfect vertices[J]. IEEE Trans. Reliability, 1991, 40(2):210-217
- [7] Hardy G, Lucet C, Limmios N. K-terminal network reliability measures with binary decision diagrams[J]. IEEE Trans. Reliability, 2007, 56(3):506-515
- [8] Ball M O. Computational complexity of network reliability analysis; An overview[J]. IEEE. Trans. Reliability, 1986, 35(3):230-239
- [9] Reed D A, Lu C D, Mendes C L. Reliability challenges in large systems [J]. Future Generation Computer Systems, 2006, 22(3):293-302
- [10] Hui K-P. Reliability Estimation [D]. Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences, University of Adelaide, 2005
- [11] Shpungin Y. Combinatorial Approach to Reliability Evaluation of Network with Unreliable Nodes and Unreliable Edges [J]. International Journal of Computer Science, 2006, 1(3):177-183
- [12] Cancela H, Khadiri M E, Rubino G. Rare Event Analysis by Monte Carlo Techniques in Static Models [M]. Rare Event Simulation using Monte Carlo Methods, John Wiley & Sons Ltd., 2009:145-170
- [13] Gebre B, Ramirez-Marquez J. Element substitution algorithm for general two-terminal network reliability analyses[J]. IIE Transactions, 2007, 39(3):265-275
- [14] Dominiak S, Bayer N Dr, Habermann J. Reliability Analysis of IEEE 802. 16 Mesh Networks [C]// Broadband Convergence Networks, 2007. BcN '07. 2nd IEEE/IFIP International Workshop. Munich, May 2007:1-12

(上接第 91 页)

也随之增加。这是因为网络节点数目越多会导致越深的网络拓扑结构,这就增加了网络中任意节点到协调器所使用的平均跳数。文章所提出的 OEETR 协议相对于 TR 和 ETR 协议能够缩减大概 55%和 15%的路由跳数,由于 OEETR 发掘了更多的路由捷径,使得 OEETR 比 ETR 在路由跳数上有明显减少。

同样由图 6 可以看出,随着网络中部署节点的增加,路由路径上所消耗的能量也随之增加。这是因为路由跳数的增加要比可能的单跳距离的减少对能耗的影响显得更加重要。在实际中,稠密部署网络节点并不是为了提高能量效率,确切地说是为了能够提供必需的测量密度或者所需的无线连通性冗余,以应对诸如节点失效或者通信衰竭等问题。在该仿真实例中,OEETR 显示出能够比 TR 和 ETR 缩减大概 40%和 10%的能量消耗,相对于 ETR 来说,OEETR 可以使用更短的路由捷径,路由跳数更少,能量消耗降低。

然后,本研究把部署在网络中的节点个数固定为 $N=200$,而节点的最大无线通信范围在 $T_r=50\text{m}$ 到 $T_r=400\text{m}$ 之间变化。处理仿真数据后得到的对比结果如图 7、图 8 所示。

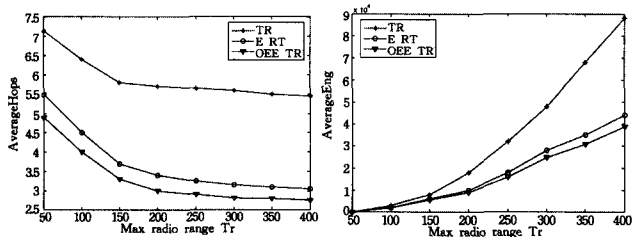


图 7 平均路由跳数

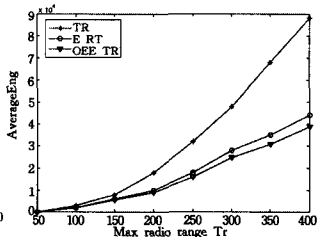


图 8 平均能量消耗

由图 7 可以看出,对于 TR, ETR 和 OEETR 来说,增加节点的最大无线通信范围 T_r 将会导致路由跳数的减少。这是因为越大的 T_r 将引起越稀疏的网络拓扑结构,这减少了网络中任意节点到协调器所使用的平均跳数。进一步说,对于所提出的 OEETR 协议, T_r 越大,意味着网络中一个节点所具有的潜在邻居节点个数越多,因此,也相对增加了找到更多路由捷径的机会。提出的 OEETR 协议显示出能够比 TR 和 ETR 协议缩减 45%和 12%的路由跳数。

根据图 8 可知,对于能量消耗来说,随着 T_r 的增大, TR, ETR 和 OEETR 协议的能量消耗也随之增加。这是因为 T_r 越大,节点通信的单跳最大距离越会增加,其对能量消耗的影响

显示出比对路由跳数的减少更加重要。在 T_r 的变化过程中, OEETR 协议显示出比 TR 和 ETR 具有更好的能量效率,能量消耗分别减少大概 25%和 10%。

结束语 本研究提出了无线传感器网络单跳扩展增强树型路由协议,它充分使用邻居表信息来弥补树形路由协议的不足,以增强树型路由协议为基础,把当前路由由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点及它们的邻居节点均考虑进路由由决策过程,尽可能地发掘出更多潜在的路由捷径,并使用最短的路由捷径传输数据包。本研究给出了单跳扩展增强树型路由协议的判定方法,并应用到 ZigBee 无线传感器网络中。仿真结果显示了该协议的网络性能,单跳扩展增强树型路由协议较树型路由和增强树型路由协议更加节省路由跳数和能量消耗。

参考文献

- [1] Chong C, Kumar S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and Changes[C]//Proceedings of the IEEE 91. 2003:1247-1256
- [2] Zhao F, Guibas L. Wireless Sensor Networks; An Information Processing Approach[Z]. Elsevier-Morgan Kaufmann, Boston, 2004
- [3] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[Z]. Ad Hoc Networks, Elsevier, March 2005: 325-349
- [4] Luo J, Xue L, Ye D X. Research on multicast routing protocols for mobile ad-hoc networks[Z]. Computer Networks, Elsevier, April 2008:988-997
- [5] Yang G S, Wang Z J, He X Y, et al. An Improved ETR Protocol with Energy Awareness for Wireless Sensor Networks[C]// 2009 Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2009:117-123
- [6] 尹安,汪秉文,胡晓娅,等. MintRoute-HNLB:一种支持负载均衡的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 77-80
- [7] 班艳丽,柴乔林,王琛. 基于能量均衡的 ZigBee 网络树路由算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(11):2791-2794
- [8] ZigBee Specification Version 1. 0[S]. ZigBee Alliance, 2005
- [9] Qiu W Z, Skafidas E, Hao P. Enhanced tree routing for wireless sensor networks[Z]. Ad Hoc Networks, Elsevier, May 2009: 638-650
- [10] Park J, Sahni S. An online heuristic for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(8):1048-1056