解此微分方程组得:

$$k_i(t) = at - t^b + \sqrt{2dNt + 2d(pm_1 - rm_3)t^2} + C,$$
$$t > 0,\ 0 \leqslant k_i(t) \leqslant N - 1 \quad (8)$$

其中 $a = (pm_1 - qm_2)\frac{1}{N}$; $b = \frac{1}{N}\frac{rm_3}{pm_1 - rm_3}$; $d = \frac{pm_1 + qm_2}{N^2}$; C 为任意常数.

假设开始时刻 K 重组播网络中没有建立连接, 所以可设方程初值为 $k_i(1) = 0$, 从而确定常数 C.

图 2 给出了当 $N = 100$, $m_1 = m_2 = m_3 = 1$ 的情况下, 概率 p, q, r 分别取不同值时节点连接度的变化情况, 从图中可以看出, 连接度以近似线性的方式随时间增长. 如果不对网络的选路和连接做任何限制, 则网络中的节点可能产生很大的节点连接度, 造成数据包的丢失和网络的拥塞. 针对这种情况, 文章第三部分给出了一种以控制节点连接度为基础的负载均衡算法.

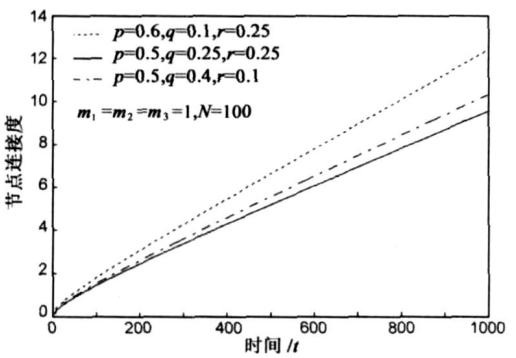

图 2 节点连接度随时间变化情况

3 K 重组播网络中的负载均衡路由算法

Ad Hoc K 重组播网络中的每个节点可能同时是不同组播业务的根节点、转发节点和目的节点, 节点之间是一种相互平等的关系. 正是由于 Ad Hoc K 重组播网络本身所具有的这种特性, 使得网络本身除了具有一般组播网络的网络特性外, 还具有某种对等网络的特性. 在这样的网络中如何进行资源的合理分配, 达到各种组播业务间的协调运作是一件十分具有挑战性的问题. 显而易见, 在实际的 Ad Hoc 网络中, 网络节点的处理能力肯定是受限的, 节点的连结度不可能无限制增大. 当某网络节点收到的连接请求大于它的节点连结度时, 必然有一些连接请求不能得到满足. 所以, 一个好的路由算法不仅能够搜寻一条从源节点到目的节点的路由, 而且应该避免某些节点或链路拥塞而另一些节点或链路空闲的情况. 尤其对于 K 重组播网络来说, 要想在同一个网络中运行多种组播业务就需要对有限网络资源充分利用, 尽量使得网络负载均衡的分布在各个节点中.

目前 Ad Hoc 网络中提出的负载均衡算法主要有 MSR(Multi-Path Source Routing)[6] DLAR(Dynamic Load-Aware Routing)[7] WALB(Workload-Based Adaptive Load Balancing)[8], PALB(Prediction based Adaptive Load Balancing)[9] 等. 这些方案考虑了路由流经网络节点的竞争情况, 提高了数据包投递的成功率. 但这些算法都只适用于普通单一业务的 Ad Hoc 单播或组播网络, 对于 K 重组播网络来说, 为了网络中不同组播业务之间的良好运行, 需要设计一种新的负载均衡算法. 本文设计了一种以动态节点连接度作为衡量指标的负载均衡路由算法 KMRA.

一般的负载均衡算法考虑节点缓存中数据包队列长度或者数据包延迟时间作为衡量节点负载的指标. 但对于 K 重组播网络来说, 在考虑节点负载的同时还要考虑不同组播业务的协调问题, 所以本文采用节点连接度作为衡量节点负载和路由选择的参数. 节点连接度的变化情况仍然与建模分析中相同, 只有可能在 p, q, r 三种情况下发生变化. p, q, r 概率的具体取值根据实际中的具体通信状况而由节点自身决定. 网络中的每一个节点都设置一个节点连接度的初始门限值(thld), 并根据节点本身的处理能力, 事先规定此门限值的最大值(thMax)和最小值(thMin), 根据实际的网络情况, 节点的门限值可以在 thMax 和 thMin 之间动态变化, 但不能超过 thMax 的上限和 thMin 的下限.

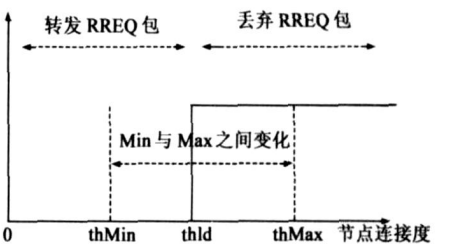

图 3 节点判决机制

KMRA 算法的步骤如下: 当要建立一个组播连接时, 源节点和其他按需路由协议一样向周围邻居节点以泛洪的形式发送路由请求数据包(RREQ), 接收到此数据包的节点根据自身当前的节点连接度来判断是否对 RREQ 数据包进行响应. 若当前节点连接度大于等于 thld, 则节点不对 RREQ 做出响应, 丢弃收到的 RREQ 数据包; 反之, 节点对 RREQ 包进行响应, 转发 RREQ 包. 通过 RREQ 包的层层转发, 最终建立一条从源节点到目的节点的组播树. 判决机制如图 3 所示. 因为负载突发情况可能导致极短时间内大量数据包到达某一节点, 所以本文利用节点缓存中数据包的长度(queue-long)和当前节点中一个数据包的平均滞留时间(time-resort)综合确定 thld 的动态值. 规定当节点状态(Load_state)为 0 时转发 RREQ 数据包, 当节点状态为 1 时丢弃收到的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

RREQ 数据包, 具体算法流程如图 4 所示:

```
Intializing:
        Thld= (th_max + th_min)/2;
        Load_state ← 1;
        Update queue-long and time-resort parameters periodically;
Transmit Mechanism;
  While(node has received a packet) do
        If queue-long × time-resort ≤ C  Then
          Thld= Thld+ 2;
        If node_degree < thld
          Load_state ← 0;
        end if
        else
          Load_state ← 1;
        end if
        else
          Thld= Thld-2;
      end while
```

图 4　算法流程图

4　算法性能仿真分析

为了对 KMRA 协议性能有更好的分析, 我们在计算机上模拟了一个 1200m × 1200m 的区域, 在此区域中随机均匀的分布 50 个节点, 每个节点的覆盖范围均为以 250m 为半径的圆. 移动模型采用 random-waypoint[10], 设运动中节点的暂停时间为 100ms, 由文献[11] 可知采用 random-waypoint 时不能将节点的最小运动速度设为 0, 所以在此仿真试验中设节点运动速度在 5m/s 与 20m/s 之间随机选取. 随机选定网络中的四个节点分别作为组播业务 1-4 的四个源节点, 组播树建立后, 组播业务 1-4 的源节点分别以 2 数据包/s, 3 数据包/s, 4 数据包/s, 5 数据包/s 的数据率发送数据包, 并设定网络中每个节点之间相互平等. 仿真时每个数据包的大小均为 512 字节, 设定常数 C 为 200(ms* packet), 即每个数据包的平均滞留时间为 50ms, 缓存中数据包长度为 4. 仿真时间为 400s. 在仿真中分别对 KMRA、MAODV[12] 和 AMRIS[13] 三种组播算法进行了比较.

定义: 数据包转发成功率= 到达目的节点的数据包总数/源节点发出的数据包总数;

组播路径建立成功率= 成功建立组播树的次数/源节点发出 RREQ 数据包总次数;

图 6 显示了在不同的节点平均运动速度下三种组播协议的数据包转发成功率, 随着节点运动速度的增大, 三种协议的数据包转发成功率都有不同程度的降低. 但使用 KMRA 协议的数据包转发成功率仍然明显高于其它两个协议, 说明 KMRA 协议能够很好的适用于这种 K 重组播网络在状态动态变化下的数据包传输. 这是因为在 KMRA 算法中充分考虑了不同组播业务之间的相互协调性, 以节点连接度作为衡量节点是否满负荷的依据, 因而能够更好的反映网络的实际通信情况.

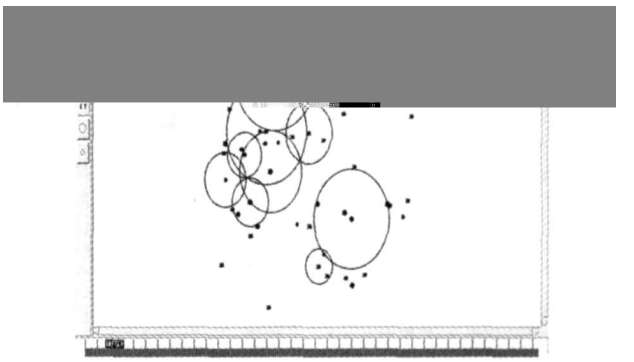

图 5　网络仿真拓扑环境

图 7 显示了在网络环境中运行 KMRA 算法, 节点平均运动速度 10m/s 的情况下对四种组播业务路径建立成功率的一个统计情况. 从图中可以看出, 当延迟约束条件大于 140ms 时, 由于算法采用负载均衡的冲突避免机制, 四种组播业务的建路成功率均能达到 50% 以上, 实现了多种组播业务的良好共存. 说明算法很适合动态环境下多组播树的实时建立.

图 8 显示了分别运行 MAODV、KMRA 算法情况下

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

不同节点的负载情况, 从图中可以看出, 由于采用了以节点连接度为基础的负载均衡机制, KMRA 算法有效的平衡了各节点之间的负载, 避免了传输冲突和 hot 节点的产生, 消除了节点负载突发的现象, 对于能量和网络资源受限的Ad Hoc 组播网络来说有重要的意义.

5 结论

本文首先介绍了一种 K 重组播网络的概念, 并在文献[2, 3]的基础上对此概念进行了延伸. 通过利用连续理论的分析方法对 K 重组播网络的特性进行了分析, 得出了节点连接度随不同网络特性的变化情况. 在此基础上, 提出了一种适用于K 重组播网络的 KMRA 负载均衡算法. 仿真结果表明, 该算法非常适用于本文所提出的 K 重组播网络环境, 与其它组播协议相比, 能够在动态环境下以较高的成功率建立组播树, 保持较高的数据包发送成功率. 同时, 该算法引入负载均衡机制后有效的平衡了各节点之间的负荷, 消除了节点载荷突发的现象. 以后拟对算法在更大规模自组织网络中的负载均衡和资源优化方面展开更深入的研究工作.

参考文献:

[1] Macker J, Corson S. Mobile ad hocnetworks(MANET) [DB/OL]. http://www. ietf. org/html/charters/manet-charter.html. IETF Working Group Charter, 1997.

[2] Yuanyuan Yang, Jianchao Wang. Nonblocking k-fold multicast networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2003, 14(2): 131- 141.

[3] Zhenhao Zhang, Yuanyuan Yang. Performance analysis of k-fold multicast networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(2): 308- 314.

[4] Papavassiliou S, Zhu J. A continuum theory-based approach to the modeling of dynamic wireless sensor networks[J]. Communications Letters, 2005, 9(4): 337- 339.

[5] A-L Barabasi, R Albert, H Jeong. Mean-field theory for scale-free random networks[J]. Physica A, 1999, 27(2): 173- 187.

[6] L Zhang, Z Zhao, Y Shu. Load balancing of multipath source routing in ad hoc networks[A]. IEEE International Conference on Communications, ICC2002[C]. New York: IEEE Press, 2002. 3197- 3201.

[7] S J Lee, M Gerla. Dynamic load-aware routing in Ad hoc networks[A]. IEEE International Conference on Communications, ICC2001[C]. Amsterdam: IEEE Press, 2001. 3206- 3210.

[8] Lee Y, J Riley G F. A workload-based adaptive load-balancing technique for mobile ad hoc networks[A]. IEEE Wireless Communication and Networking Conference, WCNC2005[C]. New Orleans: IEEE Press, 2005. 2002- 2007.

[9] Shouyi Yin, Xiaokang Lin. Adaptive load balancing in mobile Ad hoc networks[A]. IEEE Wireless Communication and Networking Conference, WCNC2005[C]. New Orleans: IEEE Press, 2005. 1982- 1987.

[10] J Broch, D Maltz, D Johnson, Y-C Hu, J Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless Ad Hoc network routing protocols[A]. ACM/IEEE MOBICOM' 98[C]. Dallas: ACM Press, 1998. 85- 97.

[11] Yoon J, Liu M, Noble B. Random waypoint considered harmful[A]. INFCOM2003[C]. San Francisco: IEEE Press, 2003. 1312- 1321.

[12] Royer E M Perkins C E. Multicast Operation of the Ad hoc on-demand distance vector routing protocol[A]. ACM/IEEE Mobicom' 99[C]. Washington: ACM Press, 1999. 207- 218.

[13] C W Wu, Y C Tay, C-K Toh. Ad hoc Multicast Routing protocolutilizing Increasing id-numberS (AMRIS) functional specification[Z]. Internet Draft, draft-ietf-manet-amrisspec-00. txt. 1998-11-10.

作者简介:

王 博 男, 1982 年生于甘肃兰州, 2004 年毕业于北京交通大学, 获学士学位. 现于北京交通大学电子信息工程学院攻读博士学位. 主要研究方向包括 Ad Hoc 网络、下一代移动网络结构与协议. E-mail: wangbolulu@163.com

任 彦 男, 1981 年生于山西太原, 北京交通大学博士研究生. 主要研究方向是无线传感网络路由、覆盖控制与拓扑控制.
E-mail: yren@center.njtu.edu.cn

张思东 男, 1945 年生于山东寿光, 北京交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代移动互联网与 Ad Hoc 网络.
E-mail: sdzhang@center.njtu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net