

无线自组网基于移动预测和能量均衡的拓扑控制算法研究

陈 辉 巨永锋

(长安大学电子与控制工程学院 西安 710064)

摘 要 为了延长无线 Ad hoc 网络的生存期,降低节点传输过程中的功率消耗,提出了一种基于能量均衡和节点运动的分布式拓扑控制算法,它使用能够衡量节点能量损耗量和当前能量值以及根据节点运行方向和速度来评价当前链路稳定状态的路径权值函数,根据节点剩余能量的实时变化动态优化网络的拓扑结构。仿真结果表明,算法可以构建具有连通性的网络拓扑结构,与其它算法相比,能够均衡整个无线自组网节点的能量,优化网络吞吐率、端到端时延并显著地延长网络的寿命,从而保证网络长时间的可靠运行。

关键词 无线自组网,能量均衡,拓扑控制,移动预测

中图分类号 TP393.03 **文献标识码** A

Mobility Prediction and Energy-balance Topology-control Algorithm for Ad hoc Networks

CHEN Hui JU Yong-feng

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract In order to reduce the power consumption of nodes in transit and extend the lifetime of the network, this paper proposed the dynamic topology control algorithm EMTCA (Energy balance and Mobility prediction Topology Control Algorithm). The link weight is considered by both the energy consumption and distance of two nodes to a certain speed movement. Network topology is optimized dynamically by remaining energy in node. The simulation experiment results show that EMTCA algorithm ensures a the network topology connectivity, extends the network lifetime so that reliable operation of the network is ensured.

Keywords Ad hoc network, Energy balance, Topology control, Mobility prediction

无线自组网是一种多跳、无固定节点的动态网络^[1],节点常常处于移动状态,并且节点的运动、能量和带宽通常都是受限的。如何提高节点和网络整体的正常工作时间,减少通信干扰,是当前研究关注的热点,采用拓扑控制优化网络的拓扑结构,可以减少网络节点能量消耗^[2]。

近年来,国内外的研究人员提出了多种拓扑控制算法, N. Li^[3]提出了 LMTS 拓扑控制算法,该算法是基于图论中的 LMT 在网络拓扑中的应用。SINGH. S^[4]提出使用最小流失率 MDR (Minimum Drain Rate) 和条件最小流失率 CMDR (Conditional Minimum Drain Rate) 作为网络路由评价参数,以扩展节点电池的使用时间和路径的工作时间。

在无线自组网中,节点通常是处于运动状态的,相邻节点之间的联通可能随着节点的运动而终止,链路发生断裂,路径失效^[5]。目前的路由协议会重启路由发现机制^[6],更新路由表,但这样会较大地增加分组延迟,对网络的传输效率影响很大。如何保证有效路径可用时间,文献^[7]提出使用备份节点的机制,在备份节点中保存一部分的路由信息,可用于链路出错时的恢复。文献^[8]也提出了通过接收传输功率的强度来计算链路的有效时间。通过预测链路的失效时间,提前进行路由重建操作。

现有的算法^[9]为了减少能量消耗,缩短节点传输距离,从而延长网络工作时间,关注节点的传输能量消耗。在保证网络连通的前提下,考虑到节点移动对链路稳定性的影响和网络中节点能量的平衡消耗,本文提出了一种基于能量均衡和节点移动预测的无线自组网拓扑控制算法 EMTCA (Energy balance and Mobility prediction Topology Control Algorithm),该算法通过平衡网络节点能量和预测节点之间链路的工作时间,有效延长了网络的工作时间。

1 能量损耗模型和节点移动模型

无线自组网模型设定为网络中有 N 个节点,这 N 个节点构成了二维平面中的节点集 V ,网络可以简化为一个有向图 $G=(V, E)$ 。其中, V 是点集合, E 是边集合。

1.1 能量损耗模型

假设网络的每个节点都有唯一编号并且节点使用全向天线,发射功率 p 可以自由调节,即 $0 \leq p \leq p_{\max}$ 。网络节点均具有相同的最大功率 $p_{\max}$ 。每个节点都有初始能量,并可以随时提供剩余能量信息。 $e=[u, v]$ ($u, v \in V$) 是 E 中的任意一条边, E_{em} 表示从节点 u 发送一个数据分组到节点 v 的能量消耗。节点采用 free space 无线传输模型^[10],模型参数 $\beta=$

到稿日期:2012-08-01 返修日期:2012-10-25 本文受国家自然科学基金(60806043)资助。

陈 辉(1970—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络协议与算法, E-mail: 420042396@qq.com; 巨永锋(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为交通控制与管理、智能测控技术及应用。

2, 发送数据节点和接收数据节点的功率关系为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (1)$$

式中, G_t 表示发射天线的增益, G_r 表示接收天线增益, 天线之间的距离为 d , λ 表示波长, L ($L \geq 1$) 为系统损耗因子。

EMTCA 算法的目的是降低网络中节点的总能量消耗和通过对链路失效的预测来减少丢失发送的数据分组, 节点 u 在时间段 Δt 内的能量消耗为:

$$E_u(\Delta t) = E_u(t - \Delta t) - E_u(t) \quad (2)$$

式中, $E_u(t - \Delta t)$ 和 $E_u(t)$ 表示节点 u 在当前时刻之前 Δt 时刻和当前时刻的剩余能量。

节点 u 在当前的能量剩余评价指数为:

$$EC_u(t) = \frac{E_u(t) - E_u(\Delta t)}{E_u^{\max}} \quad (3)$$

式中, $E_u(\Delta t)$ 表示当前时刻之前的 Δt 时间段节点 u 的能量消

$$dis(t + \Delta t) = \sqrt{[(x_a + v_a \cos \alpha \Delta t) - (x_b + v_b \cos \beta \Delta t)]^2 + [(y_a + v_a \sin \alpha \Delta t) - (y_b + v_b \sin \beta \Delta t)]^2} \quad (4)$$

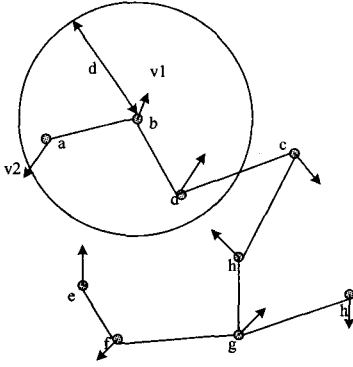


图1 节点运动模型图

假设节点一直保持匀速运动, 直到碰到测试区域的边界后改变方向继续运动。在当前时刻之后的 Δt 时刻, 节点的距离可根据式(4)计算, 如果 $dis(t + \Delta t) \leq d$, 节点之间的链路仍然有效, 否则链路将失效, 需要重新建立路由。

2 EMTCA 拓扑控制算法

EMTCA 算法的目标是均衡网络节点能耗和有效降低链路失效。在构建拓扑时, 综合考虑通信节点剩余能量和节点的运动速度和方向, 对节点移动中发生的路径断裂进行预测, 在路径失效之前就使用备份路径或者重新建立链路, 达到了能量均衡效果的同时避免了网络中某些关键节点担当数据转发任务时能耗过大的问题, 而且可以在较大程度上降低路径失效率, 从而延长了节点工作时间和网络寿命, 降低了数据分组的传输时延。

2.1 定义

定义 1(相邻节点链路稳定性指数 LSI, Link stability index) 设节点 u, v 分别以均匀速度 v_u, v_v 沿着固定的方向移动, 节点之间的相对距离可能随着节点的运动发生变化, 而节点之间的距离的变化取决于节点的运动速度和运动方向, 因此定义相邻节点链路稳定性指数:

$$LSI_{uv} = \frac{dis_{uv}(t) + \alpha[dis_{uv}(t) - dis_{uv}(t + \Delta t)]}{d} \quad (5)$$

LSI 是关于时间、节点运动速度和方向的函数。该指数越大, 说明链路断裂的可能性越低。

定义 2(相邻节点 (u, v) 间链路权值) 相邻节点 (u, v) 间

耗, $E_u^{\max}$ 表示节点的初始能量(最大能量)。

1.2 节点运动模型

无线自组网络中的节点是自组织的移动节点, 假设每个节点都有自己的运动方向和速度, 任何两个相邻节点之间可以依据式(1)创建数据链路的条件。只有在一定的距离范围内, 节点才可以直接通信, 当链路建立以后, 随着节点的移动, 相邻节点的距离随时发生变化, 当节点间相邻距离超过最大传输距离时, 链路发生中断, 通过此链路的数据丢失。因此, 如果可以预测链路失效时间, 在链路失效之前就进行拓扑重建可以有效地提高数据传输效率^[11]。

如图 1 所示, 假设节点 a, b 的坐标为 $a = (x_a, y_a)$, $b = (x_b, y_b)$, 运动速度为 v_1, v_2 , 节点 a 的运动方向为 α , 节点 b 的移动方向为 β , 节点 b 的数据传送距离为 d , 当前时刻节点 t 之后 Δt 的 ab 之间的距离为:

的链路权值取决于相邻节点的能量、相互位置以及相互运动的趋势。

$$Weight(u, v) = \alpha \left[P_r(d) \frac{E(u)}{E_0(u)} \right]^x + \beta \left[P_r(d) \frac{E(v)}{E_0(v)} \right]^y + \gamma (LSI_{uv})^z \quad (6)$$

在式(6)中, $\alpha + \beta + \gamma = 1$, x, y 是权值, E_0 是节点的初始能量, 节点 i, j 的当前剩余能量用 $E(i), E(j)$ 表示。

定义 3(路径总权重) 在从起始节点 u 到终点 v 的路径上, 经过节点 $n_1, n_2, \dots, n_{k-1}$, 表示为 $path(u, v) = \{u = n_0, n_1, n_2, \dots, n_k = v\}$, $(n_i, n_{i+1}) \in E$, 该路径上的总权值可表示为各节点的链路权值的和。

$$Weight_{path}(u, v) = \sum_{i=0}^{k-1} Weight(u_i, u_{i+1}) \quad (7)$$

2.2 EMTCA 算法

EMTCA 算法设计的目的是均衡无线自组网中节点的能量, 延长网络生命周期, 预测相邻节点之间的链路稳定性, 对将要失效的链路及时更新路由, 减少数据分组发送失败的数量, 降低端到端延时。在构建网络拓扑过程中, 节点获取局部网络拓扑信息^[12], 以保证拓扑结构强连通性和最小代价特性。算法包括信息搜集、创建网络拓扑结构、网络拓扑优化和网络拓扑维护等 4 个主要阶段^[13]。

(1) 信息收集阶段

当节点加入网络时, 首先广播 $Hello()$ 数据分组, 该数据分组中有节点的主要信息, 具体包含节点的位置、当前能量以及节点当前运动的方向和速度等。当网络中的其他节点收到 $Hello()$ 数据分组后, 返回 $Answer()$ 数据分组, 并将节点信息加入当前节点的邻节点信息表中。收到反馈的 $Answer()$ 数据分组后, 源节点也将信息加入邻节点信息表中。这两个节点的路径就可以建立, 根据获取的节点信息和节点相互速度及位置计算节点间路径权重 $Weight()$ 。

(2) 拓扑构建

EMTCA 算法的目标是构建能够预测链路失效和延长网络生命周期的网络拓扑, 节点使用最大发射功率发现物理邻节点, 对于任意节点 $u \in V$, 计算 u 节点与相邻节点 v 的权值 $Weight(u, v)$, 得到一个带权重的无向图 $G(V, E_0)$ 。根据各条边的权重, 每个节点构建本地最小生成树, 所有节点的最小

生成树构成了网络的拓扑结构 $G_{\max}^*(V, E_{\min}^*)$, 对 E_0 中的每一条边 $e(u, v)$, 计算在拓扑结构 $G_{\max}^*$ 中的最短路径的距离 $path(u, v)$, 若 $path(u, v) > t * |uv|$, 则将 e 加入 $E_{\min}^*$, 最后构建得到符合 t -spanner 属性的网络拓扑 $G_{\min}^*(V, E_{\min}^*)$ 。构架拓扑算法的伪代码如下。

Input: a set of Nodes V , each v

Input: the node set $\{V\}$, $r_{\max}$

1. build the max power network topology $G(V, E_0)$
2. calculate LSI_{uv} in $G(V, E_0)$
3. calculate $weight_{path}(u, v) \ E_{uv} \in E_0$
4. $E_{\min} = \emptyset, G_{\min} = (V, E_{\min})$
5. Loop $i=0$ to $i < V$. size do
6. build the LMST $G_{vi} = (V_{vi}, E_{vi})$
7. $E_{\min} = E_{\min} \cup E_{vi}$
8. EndLoop
9. Loop $i=0$ to E_0 . size do
10. get $e_i = (u, v) \in E_0$
11. calculate $path(u, v)$ in $G * \min$
12. if $(path(u, v) > t * |e_i| = t * |uv|)$, it follows that $E_{\min} = E_{\min} \cup e_i$
13. EndLoop
14. output: $G_{\min} = (V, E_{\min})$

(3) 拓扑优化阶段

拓扑优化阶段包括两方面: 链路双向化和传输功率调节。链路双向化是通过在拓扑构建中出现的单向链路进行双向化处理; 传输功率调节是以相邻的一跳邻居节点最远的链路距离能够传输为标准, 并按照标准的 110% 功率设定发送功率, 其目的是为了保证在节点移动过程中, 即使相邻节点的运动相互远离, 也仍然可以保证在一定时间阶段内其链路上能有效地传输数据, 而不会立刻发生链路断裂。

(4) 拓扑维护阶段

为了有效避免节点因能量耗尽无法与相邻节点通信, 或者相邻节点移动导致距离超出传输半径会使相邻链路断裂, 在拓扑结构中节点定期进行拓扑维护, 计算相邻链路 $link_e$ 的链路稳定指数 LSI 和链路权值 $Weight_{path}$, 根据链路权值(链路的稳定程度)决定是否需要重新创建链路(链路拓扑构架), 链路权值的最低取值为 W 。通过该步骤, 可以预测将要失效的链路, 提前建立后备链路以保证拓扑结构中的节点之间的正常通信。

链路维护策略伪代码:

1. Loop $i=0$ to $i < V$. size do
2. Foreach link in router table of V_i
3. If $Weight_{path} < W$
4. rebuild the the Link
5. EndIf
6. EndLoop

3 仿真实验

3.1 仿真场景和参数

为了验证 EMTCA 算法的有效性, 利用 NS-2 仿真算法的性能, 在该网络模拟平台上, 仿真考察了 AODV, GPSR^[14] 和 EMTCA 算法的性能。

仿真环境参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

参数	取值
区域	2000m×2500m
最大发射功率 $P_{\max}$	650mW
初始能量 E_i	50J
最大传输距离	250m
数据分组发送速率	10packets/s
节点最大运动速率 $V_{\max}$	10m/s
数据分组大小 L	512 Byte
仿真时间	600s

在仿真环境中, 随机产生 10 个 CBR 业务流。仿真时间为 600s。算法 Hello 周期设为 5s, 在计算链路权值的式(6)中, $x=1, y=10, \alpha=0.34, \beta=0.23, \gamma=0.43, W=0.67$ 。

3.2 仿真结果及分析

仿真试验中, 主要考察了节点平均传输功率、网络生命周期、分组投递率和路由开销等参数。为保证仿真结果的稳定性, 进行 10 次实验, 以平均值作为最终结果统计。

节点平均传输功率是网络节点工作周期内平均消耗的能量, 表示网络的整体能耗情况, 该值越低, 表示算法的能量控制越好, 网络的正常生命周期也会越长。图 2 表示不同算法在不同节点规模下的节点平均传输功率性能, 3 种主要拓扑算法的平均传输功率均随着节点数量的增加而递减, 原因是随着节点增加, 相邻节点之间的链路长度相应减小, 链路之间传输数据所需的功率也随之降低。EMTCA 算法采用了能量均衡算法对链路的维持时间进行有效预测, 降低了因节点运动产生链路断裂后重新创建链路的能量消耗, 因此平均节点功率较低。

通过有效的网络节点能量均衡, EMTCA 算法降低了剩余能量较低的节点参与路由和数据传输的概率, 所以与其他算法相比, 较好地实现了能量的均衡消耗, 使平均节点功率最小。

网络生命期是整个拓扑网络正常工作的周期, 在本算法中将网络生命定义为直到网络中有 30% 的节点由于能量耗尽而停止工作的时间。从图 3 的仿真结果看出, EMTCA 算法可以提高网络生命周期, 暂停时间为 0 表示节点连续运动, 暂停时间越长表示节点静止状态持续时间越长。EMTCA 算法基于节点运动预测和能量均衡策略, 通过较低的节点平均发射功率, 避免了网络中某些节点过多参与数据收发而导致过早地耗尽能量, 提高了网络的生命期。

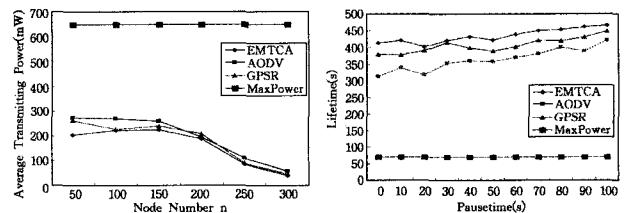


图 2 节点数量与平均传输功率 图 3 暂停时间与网络生命时间

分组平均投递率表示源节点发出的数据分组能被目的节点接收的数量比率, 该数值越高, 则网络的可靠行越好。图 4 和图 5 显示了分组投递率的数据。图 4 显示了随着网络工作时间变化的分组投递率, 网络开始工作时, 节点的能量充足, 没有拥塞的情况, 因此投递率非常高, 随着工作时间延长, 3 种算法的投递率都逐步下降, 但 EMTCA 算法的投递率下降较慢, 原因是该算法有效的能量均衡可以避免部分节点过早耗尽能量而失效。通过移动预测和链路重建机制, EMTCA

算法采用主动式修复策略,以有效地提高分组投递率。图5显示了各种算法随着暂停时间变化的分组投递率,EMTCA算法的数据较平缓,原因也是该算法的能量均衡和移动预测机制。

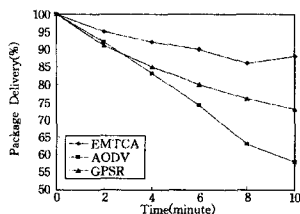


图4 随时间变化的分组投递率

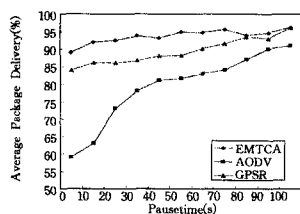


图5 随暂停时间变化的平均分组投递率

图6显示了节点数量与路由控制开销之间的关系。随着节点数量增加,链路复杂性急剧增加,因此路由开销也增加,EMTCA算法需要进行移动预测和能量均衡控制,因此所需的路由开销也比其他算法多一些。EMTCA算法的总平均路由开销为1.81%,AODV算法的总平均路由开销为1.55%,虽然增加了0.26%,但是与平均传输功率、网络生命期和分组投递率等其他性能提高相比较,也是值得的。

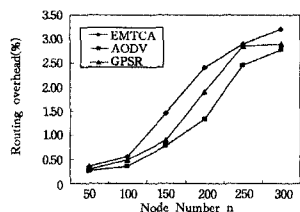


图6 不同算法的路由开销

通过仿真不同节点规模下网络的性能比较,可以发现EMTCA具备比较优秀的性能,可以较好地适应移动网络拓扑的需要,牺牲了一定的路由开销带来了网络平均生存周期和分组投递率的较大提升。

结束语 节省节点的能量,延长网络工作时间是无线Ad hoc网络设计的主要问题,EMTCA算法通过评价链路的稳定性,在路由选择过程中选取稳定性更高的链路和主动式路由修复,有效地避免了由于节点移动导致的链路断裂对数据传输的影响,同时使用能量均衡机制避免了部分节点过度的能量消耗。通过仿真实验也表明,与其他算法相比,该算法在更好地适应Ad hoc网络节点移动变化和节点的能量有效使用的同时,减少了链路失效,提高了分组投递率,延长了网络的生命周期。

参考文献

- [1] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained Ad Hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8-27
- [2] Candes E J, Romberg J, Robust T T. Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 52(2): 489-509
- [3] Li N, Hou J, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 3(4): 1195-1206
- [4] Singh S, Woo M, Raghavendra C. Power-aware routing in mobile ad hoc networks [C]//Proceeding of Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking, Mobicom 98. IEEE, 1998: 181-190
- [5] Dongkyunk, Garcia, Acevesj, et al. Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(2): 161-173
- [4] Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002, 1(13): 147-159
- [5] Blough D, Leoncini M, Resta G, et al. The k-neighbors protocol for symmetric topology control in ad hoc networks[C]//Proc. of ACM MobiHoc. Annapolis, USA, June 2003: 141-152
- [6] 沈中, 常义林. 无线 Ad hoc 网络中保留最小能量路径的拓扑控制算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2006, 3(33): 342-349
- [7] Tian Ye, Sheng Min, Li Jian-dong, et al. Energy-aware dynamic topology control algorithm for wireless ad hoc networks[C]//Proc. of IEEE Global Communications Conference (IEEE Globecom). New Orleans, Dec. 2008: 1-5
- [8] 王文艳, 王东. 拓扑控制对 Ad hoc 网络能耗及生存期的影响分析[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(18): 83-85
- [9] 王炫, 李建东. 拓扑控制对 Ad Hoc 网络性能的影响[J]. 计算机工程与应用, 2006, 6(33): 44-48
- [10] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice(2nd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004
- [11] Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless networks[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [12] 刘少伟, 罗丹彦. 能量均衡的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. 电子科技大学学报, 2010(39): 89-94
- [13] 陈辉, 巨永锋. 基于能量均衡的 Ad hoc 网络拓扑控制技术[J]. 计算机与数字工程, 2012(40): 1-5
- [14] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless Networks[C]//Proceeding of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM press, 2000: 243-254
- [15] 彭海英, 蔚承英, 唐红. 无线自组网分级结构的性能与可扩展性研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2007, 19(2): 172-176
- [4] Han K H, Ko Y B, Kim J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks[J]. Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, 2004, 60(4): 2979-2983
- [5] Verbist F, Festjens N, Steenhaut K, et al. Hop count discovery protocol for gradient based routing in wireless sensor networks [C]// Communications and Electronics, 2006: 102-105
- [6] Chang S-S, Huang C-H, Chang K-C. A Minimum Hop Routing Protocol for Home Security Systems Using Wireless Sensor Networks[J]. Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1483-1489
- [7] 段文芳, 齐建东. 无线传感器网络最小跳数路由算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(22): 88-90
- [8] Sun Li-min, Zhu Hong-song, Duan Bin. Analysis of Forwarding Mechanisms on Fine-Grain Gradient Sinking Model in WSN[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2007, 51(2): 145-159
- [9] OMNeT++[EB/OL]. <http://www.omnetpp.org/>
- [10] 李应娣, 单志龙. 无线传感器网络定向扩散路由协议研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(9): 40-43

(上接第85页)