

能量优先分级变化的多路径路由选择算法^{*})

于继明 卢先领 杨余旺 孙亚民 鞠玉涛 郑 亚 杨静宇

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

摘 要 本文提出了一种无线自组网络多路径路由选择算法——能量优先分级变化的多路径路由选择算法 EPMRA (Energy Priority-Variety Multi-Path Routing Algorithm in Ad Hoc Networks)。EPMRA 根据路由跳数、剩余能量参数、能量消耗量参数,利用网络完成数据传输任务时的历史数据,在多条路由中,根据参数动态计算选择健壮、可靠性高、负载均衡的路由,使量消耗更均匀,传输更靠性,延长无线网络的生命周期。TOSSIM 环境下的仿真结果显示, EPMRA 算法在节能、稳定性及延长网络生命周期等方面有很好的性能。

关键词 无线自组网络,能量优先分级,路由协议

Energy Priority-Variety Multi-path Routing Algorithm in Ad Hoc Networks

YU Ji-Ming LU Xian-Ling YANG Yu-Wang SUN Ya-Ming JU Yu-Tao ZHENG Ya YANG Jing-Yu

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract The paper proposes a multi-path routing algorithm for Mobile Ad-hoc Networks, that is Energy Priority-Variety Multi-Path Routing Algorithm. EPMRA fulfills the historical data transmission by network on the basis of routing hops, remains energy parameters and energy consumption parameters. Furthermore, EPMRA can select a robust, reliable and load-balance routing from multi-path routings according to the real-time parameter. Therefore it can assure energy consumption more even, transmission more reliable and longer lifecycle for the wireless network. Simulation results under TOSSIM show that the algorithm has better performance in energy conservation, stability, extending network lifecycle.

Keywords Sensor networks, Energy priority classification, Routing protocol

1 相关工作

随着微机电技术、传感器技术、通信技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和网络技术的发展,具有易分布、低功耗的无线传感网络应用成为可能,在商业、军事等领域具有极大的应用前景。无线自组网络在能耗、路由、安全、数据融合、系统结构等方面还有很多关键问题需要进一步深入研究,成为 Ad Hoc 网络应用与发展的障碍。在上述问题中,能量问题几乎与所有的其他问题相关,如系统结构设计、MAC 层设计、路由算法、功率控制、跨层设计等。节能高效的可靠路由研究引起研究人员的广泛重视,目前人们已经做了大量的研究。文[1]提出了 energy aware routing(EAR),使用局部最佳路径得到节能路由,与 directed diffusion routing(DD)^[1]路由相比,延长网络寿命 40%以上;文[2]采取数据包融合的方法,把来自不同节点的传感数据,根据标志融合在一起,再转发到健壮路径上,与传统的网络处理方法相比,可以延长网络寿命达 90%左右;文[3,6]提出了能量高效的分簇路由选择算法(LEACH),根据作者用 100 个节点仿真的结果,网络寿命可以提高一倍以上,并在此基础上,提出了低能耗自适应的无线自组网络分簇协议结构^[6]。文[4]研究节能路由策略,考虑跳数、各节点剩余电量及传输能量等参数来选择路由来

延长网络的寿命;文[5]提出了 EARP 协议,减少路由请求过程及能量消耗;文[7]利用位置关系,设定最小的能量消耗算法来节省能量;文[8]从电池化学特性入手,在 MAC 层最大化地利用电池能量,总体上使电池能量使用率达到电池能量的 70%,和 IEEE802.11 及 Distributed Wireless Ordering Protocol (DWOP)相比,降低 21%左右的传输能量;文[9]提出一种基于到下一跳能量最小的路径算法,来最大程度地延长网络寿命。上述路由协议是基于单路径协议来研究的,本文考虑网络的总体能耗、负载均衡及可靠性参数,提出 EPMRA 多路径路由算法,提高系统的吞吐量,最大程度地延长网络寿命。文章第 2 部分说明算法相关参数的定义,并提出 EPMRA 路由优先算法模型;第 3 部分对路由算法进行描述;第 4 部分,对算法进行理论分析及仿真;最后是结论。

2 参数定义及说明

无线自组网在有些应用环境,如战场应用环境下,如何减少能量消耗、确保数据分组传输可靠性是考虑问题的关键。无线自组网节点多,数据冗余大,可通过消除冗余数据,减少通信的数据量,达到节能的目的。文[2]就是通过减少能耗、融合数据来解决这一问题。但是,文[2]不能保证数据传输可靠性。本文根据电池能量消耗的化学特性^[8],考虑能量消耗、

^{*} 本文得到国防科工委预研基金、国家自然科学基金(60472060)资助。于继明 博士研究生,CCF 会员,研究方向:计算机网络和通讯;卢先领 博士研究生,研究方向:计算机网络和通讯;杨余旺 博士,副教授,研究方向:网络通信与模式识别;孙亚民 教授,博士生导师,研究方向:计算机网络和通讯;鞠玉涛 博士,副教授,研究方向:宇航推进技术;郑 亚 教授,博导,研究方向:宇航推进技术;杨静宇 教授,博导,主要研究方向人工智能、机器人等。

负载均衡、数据传输跳数等变化量,提出无线自组网络多路径路由选择算法—能量优先分级变化的多路径路由选择算法 EPMRA(Energy PRI Multi-path Routing Algorithm in Ad Hoc Networks)。算法结合能量消耗参数、路由跳数等计算得到多条路由的动态变化的优先级,根据优先级数据,在开始一个任务时,动态选择能耗低、稳定性强、负载均衡(优先级高)的路由。

为了对算法做一个清楚的描述,先对相关的环境和状态定义做简单的说明。

假设从源节点 S 到目的节点 D 有 N 个节点, m 条不相交路由,如图 1 所示。

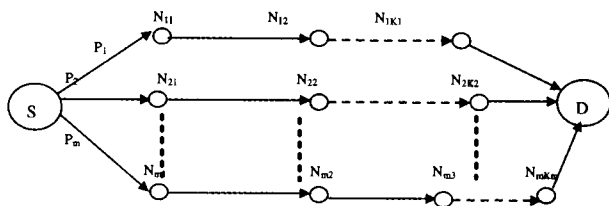


图 1 由源目节点(S,D)之间的多条不相交路径

无线自组网络中,网络能量的消耗主要是数据的发送和接收^[10],如图 2 所示。

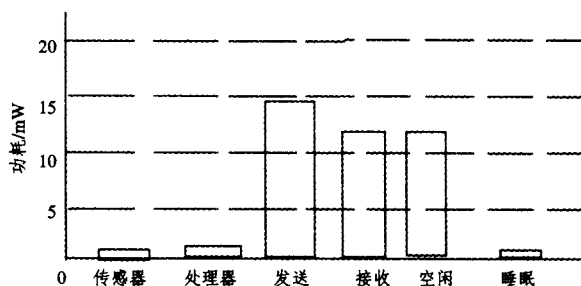


图 2 传感节点各模块能量消耗情况

根据图 2 可知,信息传输要比数据计算处理消耗更多电能。传输 1bit 信息 100m 距离需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量^[10]。因此,如果利用历史数据,减少数据传输量,将是节省能量的有效途径。在节点每次完成任务一个后,把能量消耗和剩余能量变量作为历史数据,作为下一收任的路由选择输入参量动态选择路由是 EPMRA 算法的思想依据。

图 1 中,每一个节点有三种工作状态:初始状态、中间状态(工作状态)、坏死状态。假定开始时各节点的初始状态相同,初始能量参数为 α_0 (为固定值);网络开始工作后,节点进入中间状态,处于工作状态时能量参数为 α_w ;节点不能正常使用时,其能量参数为 α_e 。

节点工作时,任何一个节点 N_i 到下一跳节点 N_{i+1} 之间工作 1 秒(仿真环境取能量消耗参数为 1mW/秒,传输 250kbit),数据能量消耗参数假设为 λ (λ 是和数据传输时能量消耗相关的参量),则每次 N_i 工作 T_i 秒后能耗参数为:

$$E_i(T_i) = T_i * \lambda \quad (1)$$

如图 1 所示,对于由 S 到 D 的 m 条路径,在发射功率为定值情况下,如果跳数越多,总能耗越大,在路径($P_1, P_2, \dots, P_m$)中,假设 P_k 跳数最少,只考虑能量消耗,由于 P_k 这条路径跳数少,总能耗低;考虑能量消耗和可靠性, P_k 虽少,不一定是好的路径。因此,考虑 m 条路径中,各节点的剩余能量、总能量消耗和跳数三方面的折衷,取得优先级高的路由,可保

证数据沿该路由能稳定高效的传输。我们定义节点的能量消耗参数为:

$$E_1 = T_{11} * \lambda + T_{12} * \lambda + \dots + T_{1k1} * \lambda$$

$$E_2 = T_{21} * \lambda + T_{22} * \lambda + \dots + T_{2k2} * \lambda$$

...

$$E_m = T_{m1} * \lambda + T_{m2} * \lambda + \dots + T_{mkm} * \lambda$$

则第 i 条路径(跳数为 k_i)的总的能量消耗参数 E_i 为

$$E_i = (T_{i1} * \lambda + T_{i2} * \lambda + \dots + T_{ik_i} * \lambda) = \lambda \sum_{j=1}^{k_i} T_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, k_i) \quad (2)$$

节点 N_{ij} 在工作 T 秒后的剩余能量参数 α_w 为:

$$\alpha_w = \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{ij} * \lambda}{\alpha_0} \quad (i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, k_i) \quad (3)$$

在每个节点每次完成一个任务 Task 时,及时按(3)式更新自己节点的剩余能量参数 α_w 。定义第 i 条路径的能量剩余参数为:

$$R_i = \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{i1} * \lambda}{\alpha_0} * \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{i2} * \lambda}{\alpha_0} * \dots * \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{ik_i} * \lambda}{\alpha_0} = \prod_{j=1}^{k_i} \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{ij} * \lambda}{\alpha_0} \quad (i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, k_i) \quad (4)$$

上式中, T_{ij} 为节点 N_{ij} 开始工作后所工作的总时间。若某个节点的能量接近临界状态 α_e 时,能量消耗参数收敛很快,变量(4)可保证路径的能量相对均衡,保证传输的可靠性。

综合路径的总能耗、跳数,定义路由优先级参数为:

$$Pr(i) = \frac{R_i}{E_i * H_{hop}} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

其中, H_{hop} 表示 $S \rightarrow D$ 的跳数, R_i 表示路径 i 剩余能量参数, E_i 表示路径 i 的能量消耗参数。

代入(2)、(4)得第 i 条路径的优先级参数为:

$$Pr(i) = \frac{\prod_{j=1}^{k_i} \frac{(\alpha_0 - \alpha_e) - T_{ij} * \lambda}{\alpha_0}}{H_{hop} * \sum_{j=1}^{k_i} T_{ij} * \lambda} \quad (i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, k_i) \quad (6)$$

3 路由协议描述

EPMRA 算法属于按需路由算法,是在 DSR 协议的基础上,增加了多路径处理机制。路由过程分为路由发现、路由维护和路由更新三个部分。路由请求帧(RREQ)包含以下部分:

任务 ID	源 ID	目的 ID	跳数 Hop	能量优先参数
-------	------	-------	--------	--------

各部分的意义如下:

任务 ID: 标识一个唯一的任务 Task;

源 ID: 标识本任务的发起节点;

目的 ID: 标识当前任务的目的节点;

跳数: 记录从源节点开始,到目的节点,当前经过了几跳;

能量及优先参数: 包括节点经过 N_{ij} 时各分步 R_i 、 E_i 及 $Pr(i)$ 的值。

路由各部分描述:

(1)路由发现:源节点发送 RREQ 数据请求,各中间节点在接收到路由请求信息后,更新自己的相关数据,并向下游节

点发送请求包。目的节点接收到自源节点来的多条不相交路径,并根据路径的优先级参数和反馈信息,得到当前的路径信息,并经过一条最优路径回送到源节点。源节点 S 发起任务 Task 时,根据当前任务的大小,在多条不相交路径中选择优先级最高的一条路径 P_i,传输数据,并在完成任务的同时,各节点重新更新自己的相关参数,源节点和目的节点更新路径的优先级参数。

(2)路由维护:源节点 S 在完成任务时,各节点重新更新自己的相关参数,源节点和目的节点更新路径的优先级参数,以备下一任务选择使用。

(3)路由更新:个别节点能量耗尽或者其它原因不能正常工作,出现路由空洞时,邻居节点把到此节点的能量消耗参数 λ 设为无穷大,并通知相关路径上的节点更新路由优先参数,如果某路径失效时,通知相关邻居节点把此条路由从路由表中删除。

为了减少路由的查询延迟,提高路由效率,所以采用路由缓冲技术。

4 算法分析及仿真

4.1 算法理论分析

由上述算法可知,在开始阶段,和 DSR 路由算法相比,开销基本一样,只多了计算能耗参数,计算消耗的能量相对于发射和接收来说,几乎可以忽略不计。源目节点之间在生成多条路由的同时,计算得到各路径优先级,隐式地反映各路径的健壮状况,源节点 S 可根据任务和传输要求来选择合适的路径来传输数据。据此算法,在完成每个任务时,都会选择当前能量均衡的、健壮、跳数尽量少路径来传输数据,避免了能量相对少的网络路径,使能量的消耗相对均衡。在每个任务完成后动态修改当前的优先级别,保证路径的状态信息是最新的,避免源节点 S 到目的 D 的某一条路径被过度使用,造成个别路径上节点的能量过快的耗尽,导致网络的负载不均和部分网络瘫痪,出现路由空洞或者网络拓朴变化增加网络路由发现过程,降低网络效率。本算法是多路径动态优先算法,能根据当前状态取得最佳路径,因此,适合于可靠性要求较高的环境,特别适用于任务数据量相对较大,延迟较小的情况,如传输图像的网络环境。在完成任任务,进行路径选择时,选择是优先级好的路由,与能量消耗情况及剩余能量相关,因此,路径的选择相应与能量消耗均匀一致,不会因为某条路径过度使用造成此路径上节点能量过快消耗而造成网络因能量消耗不均引起部分网络瘫痪或者整个网络失效,可达到节能高效、延长网络寿命的目的。

4.2 仿真环境说明

使用 TinyOS 的 TOSSIM 仿真平台,2.4 GHz 发射频率,MAC 层使用 IEEE 802.15.4 协议。相关仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真环境相关参数表

节点分布范围	1000m * 1000m
能耗参数 λ	10dBm(一跳)
测试时间	80 分钟
测试次数	4
节点数	20
发射频率	2.4G

20 个节点随机分布情况及路径如图 3。

仿真随机得到从源节点 6 到目的节点 19,经过路由查询过程,得到如下两条不相交路径:

- P₁: N6→N18→N9→N19
- P₂: N6→N1→N10→N14→N19

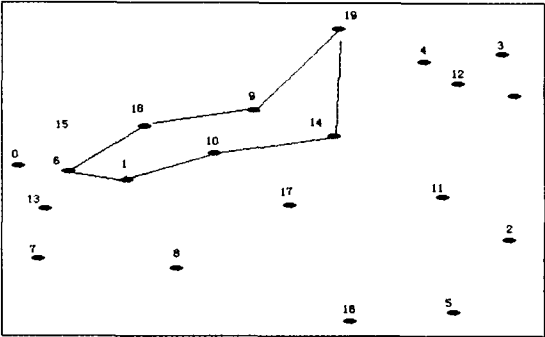


图 3 20 个节点随机分布示意图

每 20 分钟从节点 6 向节点 19 发送 64k 字节数据进行仿真,路径 P₁ 和 P₂ 上各节点不同时刻得到剩余能量参数(%),如图 4 所示。

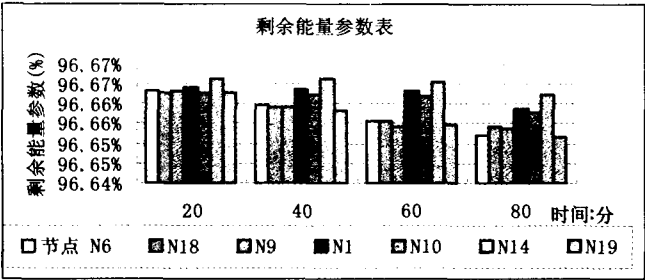


图 4 剩余能量参数图表

从图中可以看出,随着时间推移,能量的消耗相对比较均衡,没有出现个别节点的过度消耗,整个网络系统的负载比较均衡。

仿真得到两条路径在不同时刻的优先级参数如表 2 所示。

表 2 P₁ 和 P₂ 路径在不同时刻的优先级数据

径路	20	40	60	80
P1	25.32	12.04	7.93	6.59
P2	20.05	12.01	8.70	5.59

根据上表数据,得到两条路径的优先级变化情况,如图 5 所示。

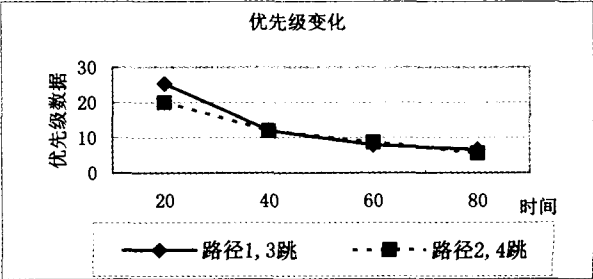


图 5 两条路径优先级变化图

图中反映出路径的优先级别会随着当前能量及跳数等实时变化情况。

不同时刻,不同节点的传输能量消耗参数变化情况,如图6所示。

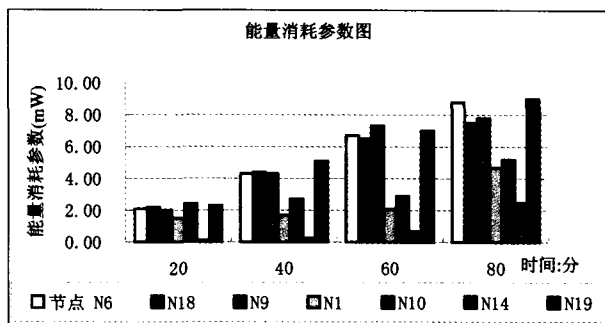


图6 不同时刻能量消耗参数变化图

图中反映出节点在经历多个任务之后,能量的消耗相对比较均衡。

4.3 仿真结果分析

根据上面仿真结果可知,不同路径的跳数、各路径上当前各节点的能量消耗参数及剩余能量参数等数据均动态变化,路由的健壮性及优先级也相应变化。上图中得到的两个优先序列分别为(按降序排列): P_1, P_1, P_2, P_1 。即第1、2、4次路径 P_1 的优先级高,第3次路径 P_2 优先级高。当有四个任务时,分别按 P_1, P_1, P_2, P_1 顺序来选择路由。路径上节点的能量消耗相对比较均衡,避免了部分节点能量过快耗尽引起网络性能下降或者网络路由发现频繁。在开始任务前选择路由时,利用历史数据增加少量的计算,可得到健壮性好、能耗均匀的路由,使网络整体系统的能量消耗分布较均匀,客观上使整个网络保持相对较好的运行状态,增强数据传输稳定性,这样的情形对延长网络的工作寿命也有好处。

结论 本文提出了能量优先分级变化的多路径路由选择协议。算法根据网络中能量消耗、剩余能量、路由跳数等参数的动态变化对路由的可靠性、健壮性的影响变化,定义优先级。算法综合考虑这三个参数的变化,利用历史数据,增加少量计算实时得到路径的优先级,根据优先级变化选择稳定健

壮的路由,客观上使网络的能量均匀消耗,增加路由的健壮性和可靠性,并能延长网络工作寿命。

参考文献

- Shah R C, Rabaey J M. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. IEEE, 2002. 350~355
- Srivastava M B. Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks. <http://fleece.ucsd.edu/~curts/papers/MILCOM01.pdf>
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000. 1~10
- Kokkinos P C, Papageorgiou C A, Varvarigos E A. Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05), PP 1. 6 IEEE, 2005
- Mann R P, Namuduri K, Pendse R. Energy Aware Routing Protocol (EARP) for Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In: IEEE Communications Society Globecom 2004 Workshops, IEEE, 2004. 419~427
- Heinzelman W B, Chandrakasan P, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE, 2002. 660~670
- Rodoplu V, Meng T H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, IEEE, 1999, 17(8): 1333~1344
- Jayashree S, Manoj B S, Murthy C S R. A Battery Aware Medium Access Control (BAMAC) Protocol For Ad Hoc Wireless Networks. IEEE, 2004. 995~999
- Chang J H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, IEEE, 2004, 12(4)
- Sun Liming, Li Jianzhong, Cheng Yu, Zhu Hongsong. Wireless Sensor Networks. TsingHua Publisher, 2005. 7~8
- Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks, MobiCO, August 2000

(上接第29页)

参考文献

- Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey On Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40 (8): 102~114
- Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: Proceedings of INFOCOM 2002, New York NY, June 2002. 1567~1576
- Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie G. Protocols for Self-Organization of Wireless Sensor Network [J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(10): 16~27
- Miller M J, Vaidya N H. A MAC Protocol to Reduce Sensor Network Energy Consumption Using a Wakeup Radio [J]. IEEE Trans. On Mobile Computing, 2005, 4(5): 228~242
- Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, Srivastava M. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002, 1(1): 70~80
- Dhanaraj M, Manoj B S, Ram C S. A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-hop Latency in Wireless Sensor Networks [C]. IEEE PerCom 2005, IEEE Computer Society, 2005
- Zorzi M, Rao R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance [J]. IEEE Trans. On Mobile Computing, 2003, 2(4): 337~348
- Zorzi M, Rao R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003, 2(4): 349~365
- Su Weilian, Akyildiz I F. Time-Diffusion Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions On Networking, 2005, 13(2): 384~397
- Jung J, Park T, Kim C. A Forwarding Scheme for Reliable and Energy-Efficient Data Delivery in Cluster-based Sensor Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(2): 112~114