

# 基于可靠链路层模型的节能路由协议

鲍彦茹, 陈海明, 舒炎泰, 邱晓红

(天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072)

**摘要:** 针对不可靠的 Ad Hoc 网络, 提出一种基于可靠链路层的节能路由协议。该路由协议在寻路过程中, 综合考虑了最大化网络生命期和最小化每个包的能量花费。该协议考虑了链路的可靠性, 采用功率控制技术, 能够恰当处理包丢失问题。通过大量仿真试验, 并与已有的路由协议进行对比, 表明该协议在保证网络性能的前提下能有效节省能量、延长网络生命期。

**关键词:** Ad Hoc 网络; 节能; 路由协议; 功率控制

## Energy-aware Routing Protocol Based on Reliable Link Layer Model

BAO Yan-ru, CHEN Hai-ming, SHU Yan-tai, QIU Xiao-hong

(School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072)

**【Abstract】** This paper presents an Reliable Energy-Aware Routing Protocol (REARP) which is based on reliable link layer model. The REARP tries to maximize the lifetime of the whole network, and at the same time, minimize the total energy cost for each packet. Moreover, the REARP appropriately handles packet losses by systematically integrating the reliability and power control techniques. Extensive simulations are conducted to evaluate the performance of the new routing algorithms compared to a number of existing routing algorithms.

**【Key words】** Ad Hoc networks; energy-aware; routing protocol; power control

### 1 概述

Ad Hoc 网络是一种没有基础设施支持的移动网络, 网络中的节点均由移动主机构成, 而且每个节点能自适应于网络拓扑结构的变化。传统的 Ad Hoc 路由算法主要考虑了如何减少传输延迟和提高带宽的利用率。

由于移动节点一般都采用电池供电, 所提供能量有限, 部分节点由于能量的耗尽而停止工作会极大地损害整个 Ad Hoc 网络的性能, 因此, Ad Hoc 网络中节能路由协议的研究已经成为一个新的研究热点。

目前, 国内外已经提出一些节能路由算法。节能路由协议通常围绕 2 个目标来设计: 一种是尽量减少传输数据包的总能量花费; 一种是尽量延长整个网络的生命期。Singh 等人提出了 Minimize Energy Consumed / Packet (MTPR) 算法, 该算法在路由选择时, 以传输功率作为选择路由的标准, 选取可选路径中总的传输功率最小的路径。Banerjee 等提出 PARO 算法, 以迭代的方式, 不断增加源和目的节点间的中转节点, 来减少路径上的总能量花费。

上述 2 种算法目的都是最小化数据包能量花费, 这类算法的一个严重缺陷是, 网络中各节点的能量花费不平衡, 数据包总是沿着能量花费最小的路径传输, 从而造成该路径上因为节点能量的耗尽而引起的路径中断, 缩短了网络的生命期。

因此, Singh 等人同时提出了 MBCR (Minimum Battery Cost Routing) 和 MMBCR (Min-Max Battery Cost Routing) 算法。MBCR 算法在所有可选路径中选择剩余电池能量最大的路径。MMBCR 算法则把路径中能量最少的节点作为关键节点, 在可选路径中选择关键节点能量最大的路径。

Wattenhofer 等人提出了一种分布式基于锥的拓扑控制算

法, 通过减少发送功率和通信干扰范围来延长整个网络的生命期。Sankar 等人把最大化网络生命期问题转化为最大流问题, 从而给出了一种分布式路由算法<sup>[1]</sup>。

国内研究人员提出的 SDDRP 算法, 通过引入能量水平标识来区分各条路径的能量花费, 并依据该标识选择合适的路径传输数据包, 以达到均衡各节点的能量花费、延长网络生命期的目的。

### 2 无线网络模型

假设无线网络中节点  $v_i$  满负荷时电池容量为  $F_i$ , 当前剩余电池容量为  $R_i$ 。每个节点发送功率可变, 且最大发送功率为  $P_{max}$ 。于是, 无线网络模型可以用一个有向图  $G = (V, E)$  来表示, 其中  $V$  表示网络中的节点集合,  $E$  表示网络中节点间的链路集合。

假设  $p(i, j)$  表示节点  $v_i$  向节点  $v_j$  传输数据的实际发送功率, 且其动态可变。假设节点  $v_i$  和节点  $v_j$  之间的包错误率  $\varepsilon_{i,j}(p)$  只依赖于节点间实际发送功率  $p(i, j)$ 。

### 3 节能路由协议 REARP

#### 3.1 主要思想

在多跳无线网络中, 由于节点可移动以及无线频率干扰, 包错误率往往达到了 15%~25%, 导致频繁的重传操作。然而大多数节能路由协议忽略了这部分能量消耗。Li 等人针对这种不可靠通信链路, 提出了一种可靠的节能路由算法<sup>[2]</sup>。该

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60472078, 90604013)

**作者简介:** 鲍彦茹(1976-), 女, 博士研究生, 主研方向: 移动自组网络, 算法设计与分析; 陈海明, 硕士研究生; 舒炎泰, 教授、硕士; 邱晓红, 硕士研究生

**收稿日期:** 2007-12-26 **E-mail:** baoyanru@tju.edu.cn

算法力求传输每个包花费最小能量，却造成了各节点能量花费不均衡，缩减了网络生命期。本文提出一种新的基于可靠链路层的节能路由算法REARP，综合考虑了最大化网络生命期和最小化每个包的能量花费。当节点电量充足时，选择最小能量花费的路径；当节点电量不足时，选路时就要增加考虑节点的剩余电量。

### 3.2 花费函数

假设  $W = v_1 v_2 \dots v_n$  表示网络中一条简单路径，其源节点  $s = v_1$ ，目的节点  $d = v_n$ 。假设在可靠链路层模型下，若节点  $v_i$  向节点  $v_j$  发送包不成功，则节点  $v_i$  将重传该包，直到节点  $v_j$  成功接收该包。事实上，目前几乎所有的数据链路层协议均支持重传机制。例如，IEEE 802.11 定义小数据包可重传 7 次，大数据包可重传 4 次。

设随机变量  $X(i, j)$  表示节点  $v_i$  发送某数据包给节点  $v_j$  所需传输次数，则链路  $(v_i, v_j)$  上数据包传输次数的期望值可表示为

$$E(X(i, j)) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \Pr(X(i, j) = k) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot (\varepsilon_{i,j}(p))^{k-1} \cdot (1 - \varepsilon_{i,j}(p)) = 1 / (1 - \varepsilon_{i,j}(p)) \quad (1)$$

则节点  $v_i$  向节点  $v_j$  可靠的传输数据包所花费能量的期望值为

$$C_{(i,j)} = E(X(i, j)) \cdot p(i, j) = p(i, j) / (1 - \varepsilon_{i,j}(p)) \quad (2)$$

为了均衡网络中各节点能量花费，在上述花费函数中增加对节点剩余能量的考虑，于是有：

$$U_{(i,j)} = C_{(i,j)} \cdot (F_i / R_i)^{g(F_i / R_i)} \quad (3)$$

其中，函数  $g(x) = \begin{cases} 0, & x < T \\ k, & x \geq T \end{cases}$

REARP 算法就是要选择一条路径  $W$ ，使其总的花费函数数值最小：

$$S(W) = \sum_{v_i \in W_{i \rightarrow d}; v_i \neq d} U_{(i,j)} \quad (4)$$

式(3)中子项  $(F_i / R_i)^{g(F_i / R_i)}$  值取决于节点当前剩余能量。当电量充足使得  $F_i / R_i$  小于阈值  $T$  时，该子项值为 1，此时算法只考虑选择花费能量最小的路径；随着电量不断消耗， $F_i / R_i$  值不断增大，当不再小于阈值  $T$  时，该子项值为  $(F_i / R_i)^k$ ，此时剩余电量  $R_i$  值越小，花费函数值就越大，从而算法在考虑选择最小花费路径的同时，避免选择剩余电量不足的路径。

阈值  $T$  的选取对算法性能很重要。若  $T$  非常小，则会过早考虑剩余能量影响，所选路径的能量花费不再是最小的；若  $T$  非常大，则会推迟考虑剩余能量影响，某些节点可能会过早用尽电量导致整个网络瘫痪。 $T$  的选择和电池能量衰减密切相关。

Gold 等人通过实验给出了电池能量衰减模型，指出当电量消耗 80% 时，电池容量会急速衰减。因此， $T$  值应该在 1~5 之间选取。第 4 节给出了  $T$  值选择的详细讨论。

### 3.3 算法实现

式(1)~式(4)表明，路径总能量花费值  $S(W)$  与该路径上每条链路的发射功率相关，要找到最小  $S(W)$ ，须确定每条链路的最优发射功率。首先给出 DPA(Dynamic Power Assignment)

算法(算法 1)用于确定链路的最佳发射功率。

节点  $v$  以最大发射功率  $P_{\max}$  广播其更新的路由条目，节点  $u$  以功率  $P_{\text{rev}}$  接收到来自  $v$  的广播包，接收信噪比为  $\text{SINR}_{\text{rev}}$ ，节点  $u$  的接收阈值为  $P_{\text{threshold}}$ 。设  $PL$  表示链路  $(v, u)$  上的路径衰减，则该链路上最优发射功率  $p(u, v)$  的值应介于  $P_{\text{threshold}} \times PL$  和  $P_{\max}$  之间。 $PL$  值可由  $P_{\max}$  和  $P_{\text{rev}}$  两值计算得到。

#### 算法 1 DPA 算法

Algorithm: Dynamic Power Assignment

Inputs:  $P_{\text{rev}}$ ,  $\text{SINR}_{\text{rev}}$

Constants:  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{threshold}}$

Output:  $p(u, v)$

1:  $u$  receives updated routing entries from neighbour  $v$ , who broadcasts the message at  $P_{\max}$ .

2: From the  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{rev}}$ ,  $\text{SINR}_{\text{rev}}$ , calculate

Noise +  $\Sigma$ interference =  $P_{\text{rev}} / \text{SINR}_{\text{rev}}$

$PL = P_{\max} / P_{\text{rev}}$ .

3: Find the optimal  $p(u, v)$  in the range between  $P_{\text{threshold}} \times PL$  and  $P_{\max}$ , which minimize the value of  $p(u, v) / (1 - \varepsilon_{u,v}(p))$ .

该算法中，在  $P_{\text{threshold}} \times PL$  和  $P_{\max}$  之间寻找最优功率值  $p(u, v)$  的操作可以使用任意的查找算法来实现，比如二分搜索。算法中还采用了跨层机制，实现了链路层与网络层信息交换。

下面给出节能路由算法REARP(算法 2)，该算法基于算法 dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV)<sup>[3]</sup>，简单且避免了环路问题。与DSDV算法选择最小跳数路径不同，REARP选择花费函数值  $S(W)$  最小的路径，而且算法通过调用DPA算法，为路径上每条链路智能分配最优发射功率。

#### 算法 2 REARP 算法

Algorithm: Reliable Energy-Aware Routing Algorithm

Input: pkt // packet containing the updated route entries from the neighbour node  $v$

1: Find the optimum power  $p(u, v)$  for link  $(u, v)$  by calling the DPA.

2: oneHopCost =  $p(u, v) / 1 - \varepsilon_{u,v}(p)$

3: If  $(F_u / R_u > T)$

oneHopCost = oneHopCost \* power $(F_u / R_u, k)$

4: for each routeEntry  $r$  in  $\text{pkg}$  do {

5:  $r.\text{totalcost} = r.\text{totalcost} + \text{oneHopcost}$ ;

6: if  $(r.\text{seq} == \text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{seq} \ \&\&$

$r.\text{totalcost} < \text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{totalcost})$ {

7:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{totalcost} = r.\text{totalcost}$ ;

8:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{nextHop} = v$ ;

9:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{optPower} = p(u, v)$ ;

10: ScheduleTriggerUpdate  $(\text{routeTable}[r.\text{dest}])$ ;

11: }else if  $(r.\text{seq} > \text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{seq})$  {

12:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{seq} = r.\text{seq}$ ;

13:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{totalcost} = r.\text{totalcost}$ ;

14:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{nextHop} = v$ ;

15:  $\text{routeTable}[r.\text{dest}].\text{optPower} = p(u, v)$ ;

16: ScheduleTriggerUpdate  $(\text{routeTable}[r.\text{dest}])$ ;

17: }

// ignore old sequence entries and bad metrics

18: }

## 4 性能分析

### 4.1 仿真环境

本文通过仿真试验将 REARP 与 DSDV 算法性能进行了比较,主要考察了网络生命期、所消耗传输功率 2 个方面。另外,由于 REARP 算法性能与阈值  $T$  的选取相关,本文给出了不同阈值  $T$  下 REARP 的性能变化。

仿真试验在 Qualnet 3.7<sup>[4]</sup> 中实现。在  $1000 \times 1000$  的仿真场景中,随机分布  $n(20 \leq n \leq 100)$  个节点,每个节点当前电池能量为 500~1000 单位之间的随机值。每个节点的最大发送功率为 15.0 dBm。场景中设置了 3 条 CBR 数据流,每个流每秒发送一个 512 B 的数据包,从仿真开始的第 10 秒发出第一个数据包,并一直存在到仿真结束。相同场景下通过改变 SEED 值得到 10 组数据结果。

### 4.2 仿真结果

许多文献中给出了不同网络生命期的定义,本文中定义为第一个电池能量耗尽节点的生命期。图 1 给出了不同路由下网络生命期比较。REARP 路由下网络生命期延长了 12%。

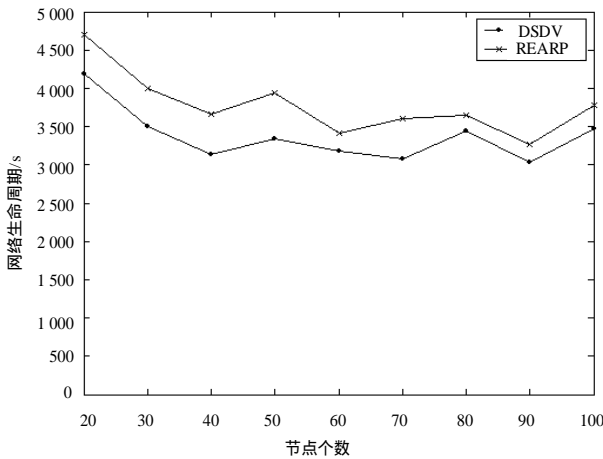


图 1 网络生命期比较

图 2 给出了 2 种算法的 TP/P 比较。

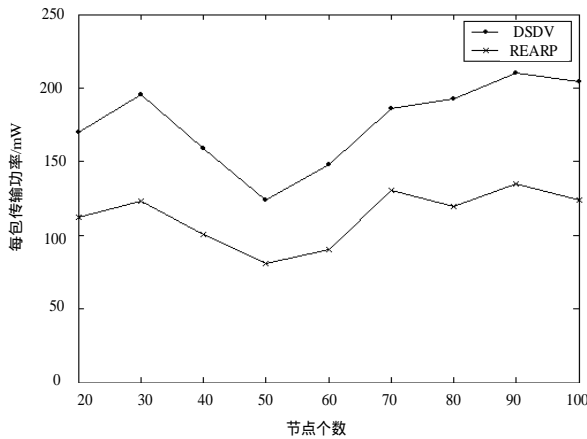


图 2 TP/P 值比较

每包传输功率(TP/P)定义为从源节点到目的节点传输一个数据包所花费传输功率之和。相比于 DSDV, REARP 所选路径中更多采用短链路,从而节省了传输功率花费。故 REARP 的 TP/P 值是 DSDV 的 64%。

图 3 给出了阈值  $T$  对算法性能影响,由图可见,随着阈值  $T$  增长,网络生命期和 TP/P 值均成下降趋势。事实上,网络生命期值越大越好,TP/P 值越小越好。因此,要权衡考虑这 2 个方面来选择阈值  $T$ 。根据大量仿真试验的结果,本文选择阈值  $T$  为 2.5。

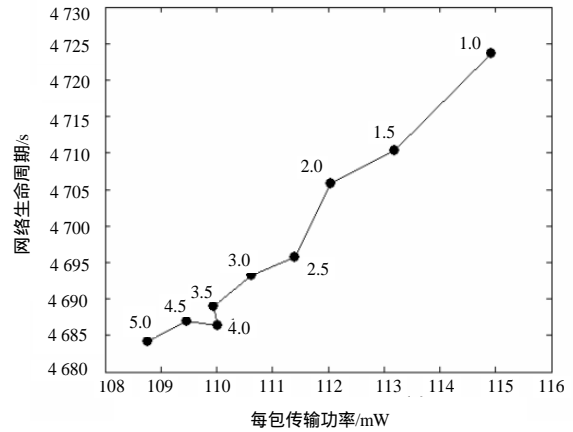


图 3 20 节点场景下性能随不同阈值的变化

## 5 结束语

本文给出了一种新的节能路由算法,该算法既考虑了尽量减少包传输的能量花费,同时考虑了尽量延长网络生命期。而且,算法采用了功率控制技术,并计算了可靠传输的能量花费。仿真试验表明 REARP 在保证网络性能的同时,还能有效延长网络生命期。

进一步的研究工作主要包括:研究链路错误率受发送功率外其他因素影响情况下的最小能量花费路由算法;研究考虑节点移动性情况下的能量有效路由;研究 Ad Hoc 网络中能量有效的组播和广播路由算法。

### 参考文献

- [1] Sankar A, Liu Zhen, Maximum Lifetime Routing In Wireless Ad-hoc Networks[C]//Proc. of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hongkong, China: [s. n.], 2004.
- [2] Li Xiangyang, Chen Haiming, Shu Yantai, et al. Energy Efficient Routing with Unreliable Links in Wireless Networks[C]//Proc. of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Vancouver, Canada: [s. n.], 2006.
- [3] Perkins C, Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-sequenced Distance-vector Routing(DSDV) for Mobile Computers[C]//Proc. of Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications. London, UK: [s. n.], 1994.
- [4] Scalable Network Technologies Inc.. Qualnet User's Manual, Version 3.7[Z]. 2004.