

## 无线 Ad Hoc 网络中基于时间广播的功率感知路由\*

文 凯<sup>+</sup>, 郭 伟, 黄广杰

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 610054)

### Time-Based Broadcasting for Power-Aware Routing in Wireless Ad Hoc Networks

WEN Kai<sup>+</sup>, GUO Wei, HUANG Guang-Jie

(National Anti-Interference Communication Technology Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: E-mail: kai.wen@163.net

**Wen K, Guo W, Huang GJ. Time-Based broadcasting for power-aware routing in wireless ad hoc networks.**

*Journal of Software*, 2008,19(12):3218–3227. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3218.htm>

**Abstract:** A TBPR (time-based broadcasting for power-aware routing) protocol is proposed. Since more hops can save more energy in wireless transmission, the TBPR protocol selects more energy efficient routes by comparing accumulated power consumption based on the mechanism of delaying rebroadcast route request packets. This method can reduce energy consumption and prolong the lifetime of network. Simulation results indicate that the TBPR protocol can conserve more energy and reduce energy consumption in wireless Ad hoc networks.

**Key words:** timer-based broadcasting; power-aware; waiting time; accumulated power; wireless ad hoc network

**摘 要:** 提出了一种 TBPR(time-based broadcasting for power-aware routing)协议。TBPR 采用路由请求报文延迟发送机制,并通过比较路径中的累计功率消耗,选择能量消耗较低的路由,以降低网络的能量消耗,延长网络的生存周期。计算机仿真实验表明, TBPR 能够取得较好的节能效果,并降低无线 Ad Hoc 网络中的能量消耗。

**关键词:** 基于时间广播;功率感知;等待时间;累计功率;无线 Ad Hoc 网络

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,无线 Ad Hoc 网络领域的研究受到了广泛的关注。无线 Ad Hoc 网络不同于传统的有线网络或蜂窝网络,它没有固定基础网络设施,网络由多个节点组成并通过无线信道来维持网络的连接。由于无线节点发射功率和无线网络接口传输范围的限制,在无线 Ad Hoc 网络中传输数据往往需要多跳才能实现,故节点具备主机和路由器的功能。

在很多典型的 Ad Hoc 网络应用中,由于重量和体积的限制,网络节点配备的能量源通常都是有限的(如采用可充电或不可充电电池),因此降低网络中节点的功率消耗是非常重要的。无线 Ad Hoc 网络中的能量保护策略主要有以下 4 种主要方法:第 1 种是通过判断节点是否需要参与通信,关闭或开启节点的通信功能;第 2 种是

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60472052,10577007 (国家自然科学基金); the Program for New Century Excellent Talents in University of China (新世纪优秀人才支持计划); the National Key Laboratory of Communication of China under Grant No.51434020105ZS04 (战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室)

Received 2007-04-12; Accepted 2007-08-16

通过拓扑控制的方法构建一个虚拟骨干来保证网络的正常通信,让非骨干节点进入休眠模式以实现节能;第 3 种是通过降低节点的富裕发射功率,提高信号的有效辐射等手段降低节点的能量消耗;第 4 种是在路由选择机制中引入与能量消耗相关的因子,选择能量代价较小的路由,在网络层实现节能.目前,前两种策略的研究处于一个相对稳定的时期,第 3 种策略的研究通常需要其他技术的支持,如智能天线、干扰消除、干扰避免、多包接收等技术,第 4 种策略通常也称为功率感知路由,是该领域内的主要研究热点.本文所研究的 TBPR(time-based broadcasting for power-aware routing)协议属于第 4 种策略,是一种功率感知的路由协议,它通过控制路由请求报文在源-目路径上由近及远地广播,并通过比较不同路径上的累积能量消耗,选取能量消耗较低的路径,降低了网络中数据报文传送所消耗的能量,从而实现延长网络生存周期的目的.

TBPR 协议的理论基础是根据无线电波传输的相关理论:在相同传输路径的情况下,跳数多的路径比跳数少的路径所消耗的能量要小一些,即多跳路由具备节能的特性.TBPR 协议通过利用多跳节能特性,让更多的节点参与到源-目节点的通信中,共同承担网络的负载,缓解了网络中节点负载不均的情况.由于在每次数据传输的过程中,TBPR 协议除了让更多的节点参与通信外,还能保证路径上的总体能量消耗最小,这有利于缓解了传统的路由协议(通常采用最短路径)中某些网络关键节点的能量消耗过快的问题,从而可以延缓因节点过度使用导致网络分裂或网络瘫痪.

本文第 1 节将对功率感知路由协议的研究现状进行综述.在第 2 节中对 TBPR 协议进行详细分析.第 3 节是协议性能的仿真分析,最后是全文总结.

## 1 功率感知路由的研究现状

近年来已提出了较多的功率感知路由协议.功率感知路由协议的主要机制可以分为以下 5 种<sup>[1,2]</sup>:第 1 种是最小化数据包传输所消耗的能量:假设数据包  $j$  在网络传输中经过的节点分别为  $n_1, n_2, \dots, n_k$ ,用  $T(n_i, n_{i+1})$  表示第  $i$  跳的能量消耗,则网络传输数据包  $j$  消耗的总能量为

$$E_j = \sum_{i=1}^{k-1} T(n_i, n_{i+1}).$$

当网络节点功率不可调时,使用该机制的路由协议即为最小跳数的路由协议,该机制最大的缺点是将造成网络中节点能量消耗的不均衡性,部分处于最短路径上的节点会因能量消耗过快而死亡;第 2 种是最大化网络分裂的时间:该机制的理论基础是极大流转极小割截(max flow min cut)定理,对于一个给定的网络拓扑,能找到一个最小集合(割截集),当去掉该集合后就会造成网络的分裂,由于该集合中的节点负责网络中不同区域间的连接,使用该机制的路由协议的目标是尽量延长该集合内的节点寿命,该机制的最大困难是如何保证割截集中的节点能量等速消耗的问题;第 3 种是最小化节点剩余能量的方差:该机制保证节点的剩余能量基本相当,从而使网络的节点尽可能地按比例消耗能量;第 4 种是最小化数据包的代价:该机制与最小化数据包消耗的能量类似,但其不是使用绝对的能量消耗来衡量,而是使用代价函数(等效函数)来评估当前节点的使用代价,该机制可以更好地保护低剩余能量的节点;第 5 种是最小最大化节点代价:该机制是在节点传递了  $N$  个数据包或在间隔  $T$  时间后,最小化节点的最大使用代价.依据上述机制,按照不同的实现方法,文献[3]对功率感知的路由协议进行了分类,情况如图 1 所示.

从图 1 可以看出,功率感知的路由协议可以分为基于活动的路由协议和基于连接的路由协议.基于活动的路由协议可以分为多播/广播路由协议、活动节能路由协议和最大化网络生存时间路由协议.多播/广播路由协议通过将信息发送到多个接收者,提高功率效率,实现节能;活动节能路由协议主要解决的是将传输每个包的能量消耗最小化;最大化网络生存时间路由主要解决的是不同节点能量消耗的均衡问题.基于连接的路由协议是在保证网络有效连接的前提下降低网络能量的消耗,当网络连接性过高时,会造成节点间频繁的干扰,当网络连接性过低时,细微的波动都会影响到网络的性能.根据不同的机制,基于连接的路由协议又可分为拓扑控制和被动节能的路由协议.拓扑控制的路由协议在保证网络连接的前提下,通过对发射功率控制或网络连接图的控制以降低能量消耗;被动节能的路由协议通过关闭空闲的节点实现节能.

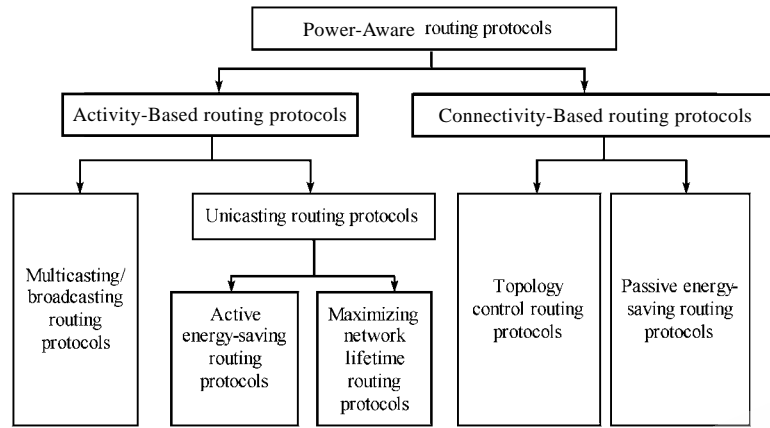


Fig.1 Power-Aware routing protocols

图1 功率感知路由协议

功率感知路由的研究较多,目前能量高效的多播/广播协议有 BIP(broadcast incremental power)<sup>[4]</sup>,EWMA(embedded wireless multicast advantage)<sup>[5]</sup>,EEMRP(the energy-efficient multicasting routing protocol)<sup>[6]</sup>,PAMPA(power-aware message propagation algorithm)<sup>[7]</sup>;活动节能路由协议有 PARO(the power-aware routing optimization protocol)<sup>[8]</sup>,LAPAR(the location-aided power-aware routing protocol)<sup>[9]</sup>,MPR(minimum power routing protocol)<sup>[10]</sup>,PCSR(power control source routing)<sup>[11]</sup>,MCPR(minimum consumed power routing)<sup>[12]</sup>,EAR(energy-aware routing)<sup>[13]</sup>,FAEE(fragmentation-aware energy-efficient)<sup>[14]</sup>;最大化网络生存时间路由协议有 MBCR(minimal battery cost routing),CMMBCR(conditional max-min battery capacity routing)<sup>[15]</sup>,MSR(maximum survivability routing)<sup>[16]</sup>,PSR(power-aware source routing)<sup>[17]</sup>,BEE(battery energy efficient)<sup>[18]</sup>,PAW-AODV(power-aware ad hoc on-demand distance vector routing protocol)<sup>[19]</sup>;被动节能路由协议有 Span<sup>[20]</sup>,CPC(coordination power conservation)<sup>[21]</sup>;基于拓扑控制的协议有 MECN(minimum-energy communication network)<sup>[22]</sup>.

最大化网络生存时间路由协议和活动节能路由协议这两类是目前该领域主要的研究热点.MBCR<sup>[15]</sup>是最大化网络生存时间路由协议中的典型协议,它采用节点的剩余电池能量作为路由度量,节点愿意转发分组的程度是其剩余电池能量的函数.剩余能量越小,节点越不愿意转发分组,因而转发费用越高.这种方法将选择一条使各节点电池费用之和最小的路由作为最佳路由.如果所有节点的剩余电池容量相当,那么该度量将选择最小跳数的路由.该度量的缺点是仅考虑了节点的剩余能量及电池费用函数的总和,故选择的路由中仍然可能包含剩余能量较少的节点.

活动节能路由协议解决的是将每个包的能量消耗最小化,该类协议的研究主要以按需路由协议为基础.根据到达目的地点的 RREQ(route request)报文,采用不同的方法进行多路径的比较,从中选择最小能量消耗的路由.目前这些研究主要集中在路径累计功率消耗的比较上,而对 RREQ 报文在网络中的传递过程没有很好地进行控制<sup>[12]</sup>,以致部分高效节能路由不能建立,该情况如图 2 所示.

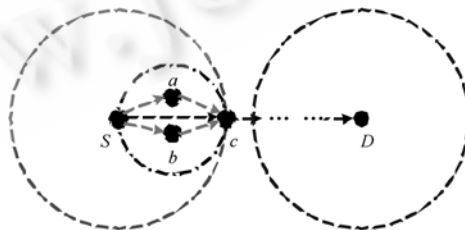


Fig.2 An example for RREQ packet broadcasting

图2 RREQ 报文广播示意

根据图 2,源节点  $S$  需要发送数据报文到目的节点  $D$ ,若节点  $c$  到目的节点  $D$  的路径唯一,则源-目节点间存在以下 5 条可能路径: $S \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots$ .显然, $S \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots$ 和  $S \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots$ 路径将比  $S \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots$ 或  $S \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots$ 消耗更多的能量,但  $S \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots, S \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots$ 间的能量消耗情况则会受节点  $a$  和  $b$  位置分布的影响.根据无线通信理论,保证数据正确接收时的节点最小发射功率可表示为  $P=kd^\alpha$ ,其中  $\alpha$  为距离衰减指数,取值区间为 2~5, $k$  是与最小接收功率相关的常数, $d$  是收发信机间的距离.若分别用  $P_{s \rightarrow c}, P_{s \rightarrow a \rightarrow c}, P_{s \rightarrow b \rightarrow c}$  来表示  $S \rightarrow c, S \rightarrow a \rightarrow c, S \rightarrow b \rightarrow c$  这 3 条路径的功率消耗,则有

$$P_{s \rightarrow c} = kd_{dc}^\alpha, P_{s \rightarrow a \rightarrow c} = k(d_{sa}^\alpha + d_{ac}^\alpha), P_{s \rightarrow b \rightarrow c} = k(d_{sb}^\alpha + d_{bc}^\alpha).$$

当距离衰减指数为 2 时,若节点  $a$  或  $b$  均位于图 2 中以  $d_{sc}$  为直径的点线圆中,则必有  $P_{s \rightarrow a} > P_{s \rightarrow a \rightarrow c}$  或  $P_{s \rightarrow b} > P_{s \rightarrow b \rightarrow c}$ ,这表明路径  $S \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow \dots$ 或  $S \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots$ 比  $S \rightarrow c \rightarrow \dots$ 更节省能量.

在传统的路由建立阶段,节点  $S$  会首先在网络中发送洪泛报文 RREQ,在没有其他冲突存在的条件下,其邻居节点  $a, b$  和  $c$  都将同时接收到该报文,根据 IEEE 802.11 标准中的载波侦听多路访问/冲突检测(carrier sense multi-access/collision avoidance,简称 CSMA/CA)机制,节点  $a, b$  和  $c$  在检测到信道空闲时都将转发该 RREQ 报文,由于 CSMA/CA 机制对节点  $a, b$  和  $c$  均是公平的,则节点  $c$  有 33.33%几率比节点  $a$  和  $b$  先转发 RREQ 报文,在该情况下,比  $S \rightarrow c$  更节省能量的路由  $S \rightarrow a \rightarrow c$  或  $S \rightarrow b \rightarrow c$  是无法建立的.MCPR<sup>[12]</sup>是活动节能路由协议领域内较新的研究成果,该协议基于 AODV(ad hoc on-demand distance vector),MCPR 为 RREQ 报文引入了一个转发等待时间,以期建立如图 2 所示的  $S \rightarrow a \rightarrow c$  或  $S \rightarrow b \rightarrow c$  路由,同时,在目的节点对多路径的能量消耗进行比较,并对最小能量消耗的路径进行应答.MCPR 在 RREQ 报文中增加了两个域,并通过设置 RREQ 报文的转发等待时间等方法较好地实现网络节能,但该算法实现复杂,网络开销较大.针对 MCPR 的不足,本文提出一种 TBPR(time-based broadcasting for power-aware routing)路由协议.该算法实现相对简单,同时有比 MCPR 更低的路由开销,节能效果也比 MCPR 协议要好.

## 2 基于时间广播的功率感知路由协议

### 2.1 MCPR 存在的问题

MCPR 对 AODV 的 RREQ 报文进行了修改,在 RREQ 报文中增加了两个域:Accumulated Consumed Power 和 Wait Time 域.相对于以前的活动节能路由协议而言,主要区别是在为节点转发 RREQ 报文设置了一个转发等待时间,即节点在接收到一个新的 RREQ 报文时,将根据 RREQ 报文中的 Wait Time 域中的值以及接收该报文所估计出的接收电平值,进行本节点转发 RREQ 报文等待时间的设定.该转发等待时间设定的目的是为了使离源节点更近的节点更早地转发 RREQ 报文,在 MCPR 中,中间节点执行如图 3 所示的伪代码以设定 RREQ 报文延迟转发定时器的值.

图 3 中各符号的意义如下: $T_{wait\_rcvd}$  为接收到 RREQ 报文中 Wait Time 域所表示的值, $T_{wait}$  为当前节点设定的 RREQ 报文转发等待时间, $P_{max}$  为节点的最大发射功率电平, $P_{received}$  为接收到的 RREQ 报文功率电平, $P_{req}$  为节点正确接收数据报文时所需的功率电平, $D_1$  和  $D_2$  为预先设定的常数.

通过分析图 3 中的伪代码,我们有如下发现:代码 1~3 行能够很好地符合 MCPR 的思想,但是当  $T_{wait\_rcvd} > 0$  且  $D_1 \times P_{max} / P_{received} < D_1 \times P_{max} / P_{req} - T_{wait\_rcvd}$  (伪代码第 5~8 行)时,远离源节点的节点仍然可能比距源节点更近的节点更早地转发 RREQ 报文,该情况如图 4 所示.图中节点  $i$  为源节点,虚线圆  $A, B$  和  $C$  分别代表节点  $i, j, k$  以最大功率发射时的覆盖区域,节点的最大覆盖半径设定为 3 个单位长度,节点间的距离是: $d_{ij}=d_{jk}=d_{nm}=1(\text{unit})$ ,  $d_{kn}=1.5(\text{unit})$ .

```

1.If ( $T_{wait\_rcvd}=0$ ) then
2.  $T_{wait}=D_1 \times P_{max}/P_{received}$ ;
3. set Timer ( $T_{wait}$ );
4. else
5. if ( $D_1 \times P_{max}/P_{received} > D_1 \times P_{max}/P_{req} - T_{wait\_rcvd}$ ) then
6.  $T_{wait}=D_1 \times P_{max}/P_{received}$ ;
7. else
8.  $T_{wait}=D_1 \times P_{max}/P_{req} - T_{wait\_rcvd} + D_2 \times P_{max}/P_{received}$ ;
9. endif
10. set Timer ( $T_{wait}$ );
11. endif

```

Fig.3 Waiting time setting for RREQ packets in MCPR

图3 MCPR中RREQ报文转发等待时间设定

无线通信环境中,收、发信机间的传播衰减可以表示为 $\zeta=K(1/d^\alpha)$ ,其中 $\alpha$ 为距离衰减指数,取值区间为2~5, $K$ 是常数, $d$ 是收、发信机间的距离.在下面的分析中,为了简单起见,将 $\alpha$ 设定为2,同时用 $t$ 表示RREQ报文转发的真实时间.根据MCPR, $D_1 \times P_{max}/P_{received} = (D_1/K)d^\alpha = K_1 d^\alpha$ , $D_2 \times P_{max}/P_{received} = (D_2/K)d^\alpha = K_2 d^\alpha$ ,其中 $K_1$ 和 $K_2$ 是和 $D_1, D_2, K$ 对应的常数.

1) 在 $t=t_0$ 时,节点 $i$ 发出一个新的RREQ报文,节点 $j$ 和 $k$ 将同时接收到该报文并将各自的定时器设置为 $T_{wait}(j), T_{wait}(k)=4K_1$ .

2) 在 $t=t_0+K_1$ 时,节点 $j$ 的延迟定时器退避到0,转发RREQ报文.节点 $n$ 在接收到来自 $j$ 的RREQ报文后,根据其算法,将 $T_{wait}(n)$ 的值设置为 $8K_1+6.25K_2$ ,该情况下,

$$D_1 \times P_{max}/P_{received} < D_1 \times P_{max}/P_{req} - T_{wait\_rcvd},$$

$$T_{wait} = D_1 \times P_{max}/P_{req} - T_{wait\_rcvd} + D_2 \times P_{max}/P_{received}.$$

3) 在 $t=t_0+4K_1$ 时,节点 $k$ 的延迟定时器退避到0,转发RREQ报文.节点 $m$ 在接收到来自 $j$ 的RREQ报文后,根据其算法,将 $T_{wait}(m)$ 的值设置为 $6.25K_1$ ,该情况下,

$$D_1 \times P_{max}/P_{received} > D_1 \times P_{max}/P_{req} - T_{wait\_rcvd},$$

$$T_{wait} = D_1 \times P_{max}/P_{received}.$$

现在比较节点 $n$ 和 $m$ 转发RREQ报文的真实时间: $t(n)=t_0+T_{wait}(j)+T_{wait}(n)=t_0+9K_1+6.25K_2$ ; $t(m)=t_0+T_{wait}(k)+T_{wait}(m)=10.25K_1$ ; $t(n)-t(m)=6.25K-1.25K$ .若要使节点 $n$ 先于节点 $m$ 广播RREQ报文,则要求 $6.25K_2 < 1.25K_1$ (等同约束条件: $6.25D_2 < 1.25D_1$ ).显然,对于MCPR算法中预先定义的 $D_1, D_2$ ,若要保证节点 $n$ 比 $m$ 更早地广播RREQ报文是很困难的.上述计算中需要说明的是,节点转发RREQ报文的时间计算上不考虑MAC层的退避时间以及无线信号的传播时延.

## 2.2 TBPR协议

针对MCPR的不足,我们提出一种基于AODV路由协议的TBPR协议.同时,在设计TBPR协议时,我们对网络条件作如下假设:1) 信道增益在包接收期间是恒定不变的,且是双向对称的;2) 网络的无线信道模型相对稳定;3) 无线接口卡能够为MAC层提供信号的接收电平值;4) 无线接口卡的发射功率是连续可调的.

TBPR协议的核心思想是:1) 通过延迟转发定时器控制RREQ报文在网络中的洪泛过程,以实现由近及远地广播,增大节能路由建立的几率;2) 在RREQ报文中增加累计功率消耗域,为目的节点提供路由应答判决标准.

### 2.2.1 RREQ报文洪泛过程控制

与MCPR类似,TBPR协议也是通过控制RREQ报文在网络中的洪泛过程来增大节能路由建立的几率.通过深入分析MCPR算法,发现造成第2.1节中所述问题最为根本的原因是: $T_{wait}$ 的取值与节点间距离呈现出非线性关系,这种非线性关系要求MCPR中的 $D_1, D_2$ 能够根据不同的场景动态变化,所以在实际应用中很难找到合

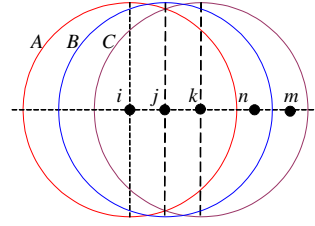


Fig.4 An example of MCPR

图4 MCPR示例

适的  $D_1, D_2$  满足 MCPR 的要求. 欲使网络中离源节点近的节点早转发 RREQ 报文, 且该顺序不被破坏, 隐藏在该要求后面的就是  $T_{wait}$  需要与节点间的距离保持一定的线性关系. 基于该思想, 我们采用一种不同于 MCPR 的算法来设定  $T_{wait}$ , 该算法是通过接收到的信号电平以及无线信道传输模型, 计算出节点间的距离, 然后再根据节点间的距离来设定 RREQ 报文的转发等待时延.

在 TBPR 中, 当节点第一次接收到某个 RREQ 报文时, 根据接收信号强度, 将  $T_{wait}$  设置如下:

$$T_{wait} = \beta(P_{max} / P_{received})^{1/\alpha} \quad (1)$$

其中  $\beta$  为预设定的常数, 取决于网络中允许的最大转发时延.

若节点在转发该 RREQ 报文前再次接收到相同标识的 RREQ 报文, 节点则需要重新计算  $T_{wait}$ , 并将新计算的  $T_{wait}$  与定时器中的值进行比较: 若新计算出的值大于定时器的值, 则节点无须进一步操作, 否则节点需将定时器的退避时间修改为最新的计算值, 并同时修改相应的上一跳邻居信息. 下面我们将证明 TBPR 中的  $T_{wait}$  设置机制能够保证 RREQ 报文在网络由近及远地广播.

如图 5 所示, 节点  $S$  为源节点, 节点  $D$  为目的节点, 节点  $m$  和  $n$  为网络中的任意节点,  $R_1$  和  $R_4$  是网络中从节点  $S$  到节点  $m$  的两条可能路由,  $R_2$  和  $R_3$  是网络中从节点  $S$  到节点  $n$  的两条可能路由, 且有

$$d_{S,m}(R_1) < d_{S,n}(R_3) < d_{S,n}(R_2) < d_{S,m}(R_4),$$

其中,  $d_{i,j}(R)$  表示从节点  $i$  沿某条路由到达节点  $j$  的距离. 由于有  $d_{S,m}(R_1) < d_{S,n}(R_3)$ , 故节点  $m$  比  $n$  更靠近源节点, 下面证明节点  $m$  会比节点  $n$  更早地转发 RREQ 报文.

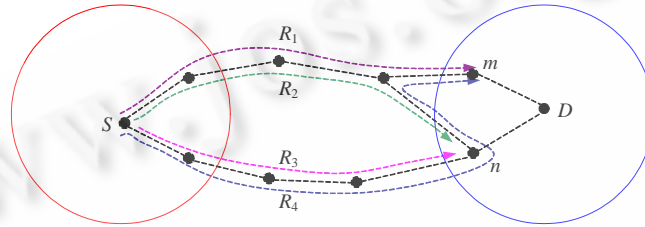


Fig.5 An example for broadcasting in the TBPR

图 5 TBPR 广播示意

证明: 设源节点  $S$  在时间  $t = t_0$  发出了一个新的路由请求, 无论 RREQ 报文在网络中如何传播, 网络中任意节点转发 RREQ 报文的时间均取决于从源节点到当前节点的最短路径, 则可以计算出节点  $m$  和  $n$  转发 RREQ 报文的真实时间为 (与第 2.1 节类似, 这里也不考虑 MAC 层退避时间及无线信号传播时延):

$$t(m) = t_0 + \sum_{i \in R_1} T_{wait}(i) = t_0 + (\beta / K^{1/\alpha}) d_{S,m}(R_1) \quad (2)$$

$$t(n) = t_0 + \sum_{i \in R_3} T_{wait}(i) = t_0 + (\beta / K^{1/\alpha}) d_{S,n}(R_3) \quad (3)$$

$$t(m) - t(n) = (\beta / K^{1/\alpha}) [d_{S,m}(R_1) - d_{S,n}(R_3)] < 0 \quad (4)$$

由此可见, 节点  $m$  会比节点  $n$  更早地转发 RREQ 报文. 根据上述机制, TBPR 协议能够较好地实现由近及远的 RREQ 报文广播.

在 TBPR 中, 由于 RREQ 报文转发等待时间的设置可以通过本地计算来完成, 无需 RREQ 报文在网络中传递的历史信息, 故不再需要 MCPR 中的 Wait Time 域. 在复杂的无线环境中, 本文中所采用的节点间距离估计方法的精度会受到一定的影响, 从而影响 RREQ 报文在网络中的洪泛过程, 但随着信号估计技术的发展, 无线通信中节点间距离的估计精度越来越高, 若将这些方法引入到 TBPR 协议中, 则可以降低这方面的影响. TBPR 通过设定 RREQ 报文的转发等待时间, 使得网络中的 RREQ 报文实现了异步转发, 可以降低 AODV 协议中 RREQ 报文转发时的竞争和冲突, 一定程度地缓解了广播风暴的问题.

### 2.2.2 最小能量消耗路径建立

为了使目的节点能够选择最小能量消耗路由, TBPR 协议也在 RREQ 报文中增加了累计功率消耗域, 供目

的节点进行路由应答判决.当中间节点接收到一个新的 RREQ 报文时,将根据接收到的信号电平估计出相应的功率消耗,并将该值累加到 RREQ 报文的累计功率消耗域中.若节点因收到相同的 RREQ 报文而重新设定过  $T_{wait}$ ,则累计功率消耗域中的值也将进行相应的更新.目的节点在接收到 RREQ 报文后,将比较不同 RREQ 报文副本中的累计功率消耗值,并选择最小功率消耗的一条路径进行应答.

### 3 TBPR 协议性能分析

为了评价 TBPR 路由协议的性能,将从以下几个方面对 TBPR 路由协议进行检验.

路由协议总开销:路由协议总开销用来评估路由协议的效率.路由协议总开销越小,说明协议的效率越高,计算方式为

$$\sum_{\text{路由包类型}} \text{路由包数量} \times \text{包长}.$$

MAC 层能量消耗总量:该参数在 MAC 层进行统计,是 MAC 层发送数据包所消耗能量的一个总和,能够直接反映网络的能量消耗情况.计算方式为

$$\sum_{\text{数据包}} \text{每个数据包的能量消耗}.$$

成功传送 1bit 的能量消耗:该参数反映网络能量的有效使用效率.计算方式为:MAC 层能量消耗总量/网络中成功传送的数据量.网络中成功传送的数据量是在 IP 层统计的,反映网络中用户数据的成功交换情况.网络节点的平均剩余能量:该参数反映网络能量剩余的整体状况.计算方式为

$$\frac{\sum_{\text{节点}} \text{节点当前能量剩余比例}}{\text{网络节点数量}}.$$

仿真场景设置:60 个节点随机分布在  $1500\text{m} \times 1500\text{m}$  的矩形区域内.节点初始能量为 0.015J,最低接收门限为  $-88.62\text{dbmw}$ ,节点无线传输半径为 600m;信道容量为 1Mbps,网络中的每个节点都是数据业务源,业务分组的长度为 1024bits,分组产生时间间隔服从均值为  $1/0.25\text{s}$  泊松分布,仿真时间为 600s;节点支持 4 种路由协议:AODV,MBCR,MCPR 和 TBPR.TBPR 和 MCPR 中的最大转发时延设定为 72us,无线传输信道模型中的距离衰减指数  $\alpha$  设定为 2;同时为了更好地评估各路由协议对能量消耗的均衡性能,并使网络实现更好的节能效果,节点的发射功率可以调整,最大发射功率为 5mW,最小发射功率为 2mW;节点原始的能量储备均为 0.015J(网络能维持 650s 左右的通信时间).

在仿真中,收集了网络执行不同路由协议下的开销、MAC 层能量消耗、成功传送 1bit 数据的能量消耗以及网络中的平均剩余能量比例等数据,具体情况如图 6~图 9 所示.在性能曲线的绘制中,为便于比较,图 6~图 8 的仿真数据以 AODV 协议的仿真数据为基础进行了归一化处理.

图 6 是 TBPR,MCPR,AODV 和 MBCR 路由协议总的开销情况.在图 6(a)中,网络节点的初始能量储备为 0.015J,此时,MBCR 路由协议的开销最大,AODV 路由协议次之,TBPR 路由协议的开销最小,但通过仔细分析仿真过程的中间数据可知,造成该情况的主要原因是网络在采用 MBCR 和 AODV 路由协议时,节点能量消耗较快,当仿真时间进行到 492s 后,网络中能量剩余比例不足 10%的节点数量迅速上升,造成路由请求失败和路由断链的几率增加,从而使路由开销迅速上升.

针对图 6(a)中的情况,在图 6(b)中我们将节点的初始能量储备调整为 0.030J,在仿真 600s 结束时,网络中大部分节点均有 30%以上的剩余能量,仿真过程中各路由协议的路由请求失败和路由断链情况基本相当,此时的路由开销如图 6(b)所示.图 6(b)更加真实地反映各路由协议的真正固有开销,通过比较图中的数据,我们发现 TBPR 协议的路由开销要比 MCPR 低很多,可以获得与 MBCR 路由协议基本相当的开销.

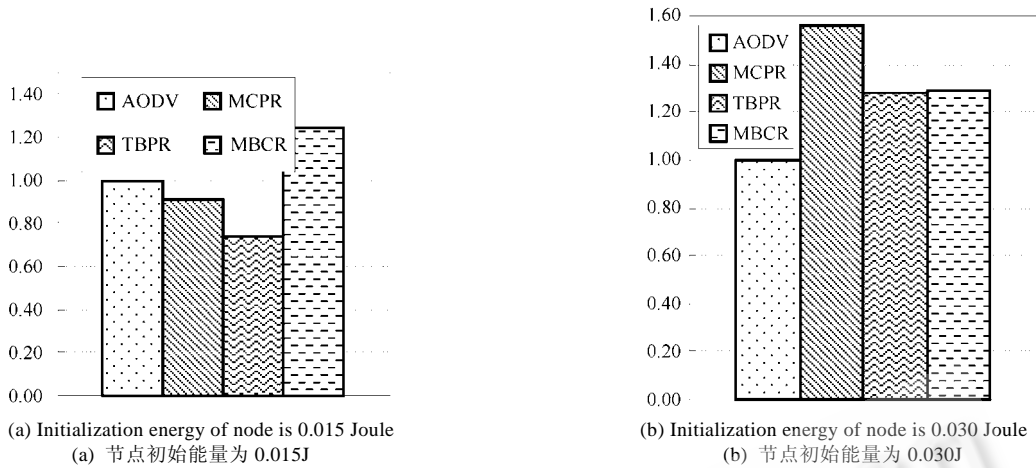


Fig.6 Total overhead of routing protocols

图 6 路由协议总开销

图 7 是在 MAC 层统计的能量消耗总量,从图中曲线可以看出,采用 AODV 协议时的能量消耗最高,采用 MBCR 协议时次之,TBPR 协议的能量消耗最低.在仿真结束时,采用 MBCR 协议条件的能量总消耗约为 AODV 协议的 93%,MCPR 协议约为 72%,TBPR 协议最低,只相当于 AODV 协议条件下的 70%.

图 7 还分析比较了 4 种协议条件下的 MAC 层能量消耗总量.该能量消耗总量不能直观地反映出网络成功传送 1bit 用户数据时的能量消耗.图 8 是网络中成功传送 1bit 用户数据的能量消耗情况,该指标更能反映网络中能量的使用效率.从该仿真结果来看,TBPR 和 MCPR 的能量使用效率较高,其中 TBPR 协议相当于 AODV 协议的 62%,MCPR 协议相当于 AODV 协议的 64%,MBCR 协议相当于 AODV 协议的 87%.

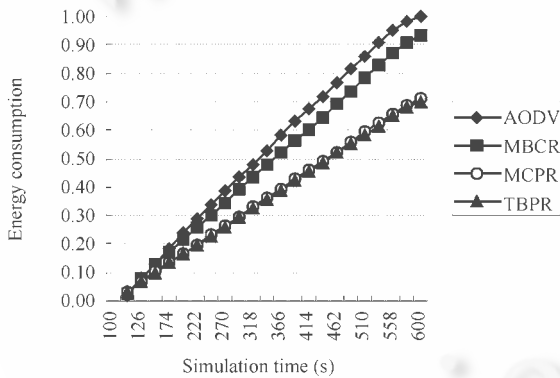


Fig.7 Total energy consumption at MAC layer

图 7 MAC 层能量消耗总量

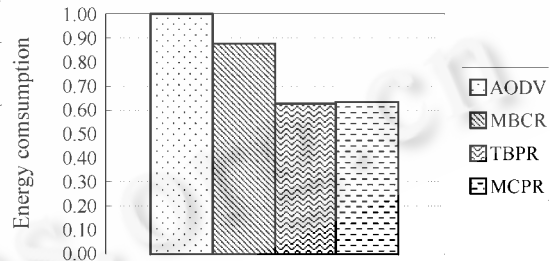


Fig.8 Energy consumption for successful transmitting 1bit data

图 8 成功传送 1bit 数据的能量消耗

图 9 是网络在不同仿真时刻节点的平均剩余能量情况,由于 TBPR 数据交换中节余了较多的能量,故 TBPR 平均剩余能量情况总体上要高于 AODV,MBCR 以及 MCPR.在仿真结束时,采用 TBPR 协议的网络平均剩余能量为 42%,而采用 AODV,MBCR 和 MCPR 协议的平均剩余能量则只有 17%,23%和 41%.



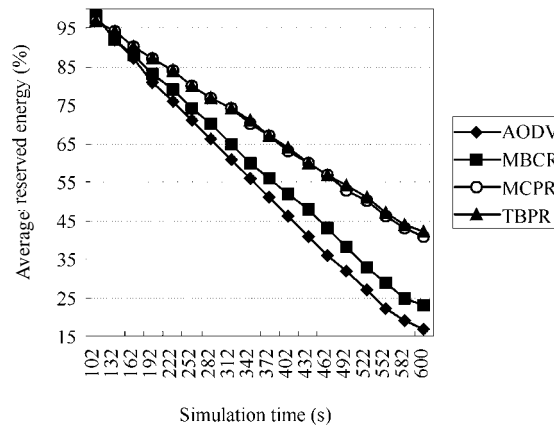


Fig.9 Average reserved energy of nodes

图9 网络节点平均剩余能量比例

由于 TBPR 协议在数据传输中选取了网络中可能的最节能路由,使得网络的总体能量消耗速度减慢;同时,由于在数据传送的过程中允许网络中更多的节点参与到通信中来,缓解了网络中负载不均的情况.TBPR 协议通过让更多节点参与通信,一定程度上地平衡了网络的负载,从总体上降低了网络节点平均能量消耗,可以达到延长网络生存周期的目的.根据图 7~图 9 的仿真结果,虽然 TBPR 协议的节能效果只是略高于 MCPR 协议,但与 MCPR 协议相比,TBPR 协议具有更低的算法复杂度,路由算法效率相对高效,且路由开销明显低于 MCPR 协议,故总体性能上,TBPR 协议要强于 MCPR 协议.

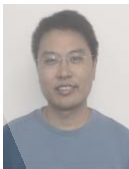
#### 4 结 论

TBPR 协议将 RREQ 报文的转发延时与节点间距离关联起来,实现了 RREQ 报文在网络中由近及远地广播,并通过累计功率消耗选择最小能量消耗路由.与 MCPR 相比,TBPR 在 RREQ 报文延迟发送时间的设置上更为简单,算法效率高,在获得比 MCPR 略高的节能效果的同时,需要更低的路由开销;同时,TBPR 协议可以通过其他手段提高节点间距离的估计精度来提高协议的性能.与众多的节能路由协议一样,TBPR 为了实现节能的目的,选择更多跳数的路由进行数据交换,并且在 RREQ 报文转发过程中引入转发时延,致使 TBPR 协议不宜用于高负载或对传输时延敏感的网络中.

#### References:

- [1] Woo M, Singh S, Raghavendra CS. Power aware routing in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Dallas: ACM Press, 1998. 181-190.
- [2] Jones CE, Sivalingam KM, Agrawal P, Chen JYH Cheng. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. Wireless Network, 2001,7(4):343-358.
- [3] Li J, Cordes D, Zhang JY. Power-Aware routing protocols in ad hoc wireless networks. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(6):69-81.
- [4] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. Energy-Efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. Mobile Networks and Applications, 2002,7(6):481-492.
- [5] Cagalj M, Hubaux JP, Christian E. Minimum-Energy broadcast in all-wireless networks: NP-Completeness and distribution issues. In: Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Atlanta: Association for Computing Machinery, 2002. 172-182.
- [6] Jiang H, Cheng SX, He YM, Sun B. Multicasting along energy-efficient meshes in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the Conf. on Wireless Communications and Networking. Orlando: IEEE, 2002. 807-811.
- [7] Miranda H, Leggio S, Rodrigues L, Raatikainen K. A power-aware broadcasting algorithm. In: Proc. of the 17th Annual IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Helsinki: IEEE, 2006. 1-5.

- [8] Gomez J, Campbell AT, Naghshineh M, Bisdikian C. Power-Aware routing optimization for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 9th Int'l Conf. on Network Protocols. Riverside: IEEE, 2001. 27–32.
- [9] Xue Y, Li BC. A location-aided power-aware routing protocol in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the Global Telecommunications Conf. 2001. San Antonio: IEEE, 2001. 2837–2841.
- [10] Subbarao MW. Dynamic power-conscious routing for MANETs: An initial approach. In: Proc. of the Vehicular Technology Conf. 1999 (VTC'99). Amsterdam: IEEE, 1999. 1232–1237.
- [11] Sheu JP, Lai CW, Chao CM. Power-Aware routing for energy conserving and balance in ad hoc network. In: Proc. of the Int'l Conf. on Networking, Sensing & Control. Taipei: IEEE, 2004. 468–473.
- [12] Lee SH, Choi E, Cho DH. Timer-Based broadcasting for power-aware routing in power-controlled wireless ad hoc networks. Communications Letters, 2005,9(3):222–224.
- [13] Kokkinos PC, Papageorgiou CA, Varvarigos EA. Energy-Aware routing in wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. Taormina: IEEE, 2005. 306–311.
- [14] Nadeem T, Agrawala A. IEEE 802.11 fragmentation-aware energy-efficient ad-hoc routing protocols. In: Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. 2004. 90–103.
- [15] Toh CK. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. IEEE Communication Magazine, 2001,39(6):138–147.
- [16] Marbukh V, Subbarao MW. Framework for maximum survivability routing for a MANET. In: Proc. of the Conf. on the 21st Century Military Communications. Los Angeles: IEEE, 2000. 282–286.
- [17] Maleki M, Karthik Dantu, Pedram M. Power-Aware source routing protocol for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 2002 Int'l Symp. on ISLPED 2002. Monterey: ACM Press, 2002. 72–75.
- [18] Chiasserini CF, Rao RR. Routing protocols to maximize battery efficiency. In: Proc. of the 21st Century Military Communications Conf. Los Angeles: IEEE, 2000. 496–500.
- [19] Tan CW, Bose SK. Modifying AODV for efficient power-aware routing in MANETs. In: Proc. of the TENCON 2005. Melbourne: IEEE, 2005. 1–6.
- [20] Chen BJ, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. Wireless Networks, 2002,8(5):481–494.
- [21] Srisathapornphat C, Shen C. Coordinated power conservation for ad hoc networks. In: Proc. of the ICC 2002. New York: IEEE, 2002. 3330–3335.
- [22] Rodoplu V, Meng TH. Minimum energy mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(8): 1333–1344.
- [23] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. RFC 3561, IETF, 2003.



文凯(1972—),男,重庆人,博士生,主要研究领域为自组织网路由技术,资源管理,移动性管理.



黄广杰(1984—),男,硕士生,主要研究领域为自组织网资源管理,移动性管理.



郭伟(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为移动通信网,信号与信息处理.