一种新的均衡流量提高网络能量效率的Ad hoc网络路由建立算法

余旭涛 张在琛* 毕光国*
(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)
*(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要：能量问题是Ad hoc网络中的一个重要问题，该文提出了通过均衡流量提高网络能量效率的TBDB路由建立算法。该算法在路由建立时对可选的路径集合进行限制，根据节点在饱和状态时归一化吞吐量的值，分别设定链路层队列中数据长度的门限值和节点连接度的门限值，收到路由请求的节点，根据门限值和节点的当前状况对节点是否响应收到的路由请求做出判决，从而调节了网络中节点的负荷，均衡了网络中能量的消耗，避免节点长期处于重负荷状态，保证了当前正在进行的传输。分析和仿真表明该算法在均衡流量的同时，也将网络中能量的消耗均衡地分散于网络各个部分，改进了网络的性能。仿真结果表明该路由算法提高了网络的吞吐率和能量效率，并且降低了平均端到端的延时。

关键词：Ad hoc网络，能量效率，路由，流
中图分类号：TP393 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2005)12-1988-06

A New Route Setup Scheme for Ad hoc Networks to Improve Energy Efficiency

Yu Xu-tao Zhang Zai-chen* Bi Guang-guo*
(*State Key Laboratory of Millimeter Waves*, *Nanjing* 210096, *China*)
*(*State Key Laboratory of Mobile Communication, Southeast University*, *Nanjing* 210096, *China*)

Abstract Energy problem is very important in Ad hoc networks due to energy-constrained. In this paper, a traffic balanced route setup scheme, called TBDB, is presenred to improve energy efficiency. TBDB routing setup scheme decides whether to reply the route request by the connected flows of the node. Both of them have own threshold values and make routing decisions by the status of the node. The threshold values can be obtained by the normalized throughput values under saturated status. Analysis and simulation results show that both of them balance the energy consumption and the traffic of networks, improve the energy efficiency greatly, and decrease the average end to end delay.

Key words Ad hoc networks, Energy efficiency, Route, Flow

1 引言

Ad hoc网络是一种移动、多跳的自组织无线网络，该网络不需要固定基站支持、具有高度动态拓扑结构。组成Ad hoc网络的节点是一些移动节点，与固定有源节点相比，Ad hoc网络中节点能量供给具有高成本或短时特性，其网络特性与能量消耗密切相关。在Ad hoc网络中，由于网络节点的移动特征，大多数节点以电池作为动力，因而，在进行系统设计时能量效率就成为一个非常重要的指标[1-3]。Ad hoc网络能量消耗问题涉及到网络的各个方面，不仅包括物理层，同时也涉及到了媒体接入控制 (MAC) 层、逻辑链路控制 (LLC) 层、网络层、传输层以及应用层，本文研究的是网络层的能量效率问题。

目前网络层能量效率问题的研究主要集中在采用不同的路由度量上，典型的如考虑路径总的传输功率的MTPR (Minimum Total Transmission Power Routing)[4]算法，以及考虑节点剩余能量的MMBCR (Minimum Total Transmission Power Routing)[5]算法。但是由于串音的影响，使得这类方法对能量效率的提高有限，因此如果仅从路由层的角度出发提高网络的能量效率，还需要另辟蹊径[6, 7]。本文提出的均衡

2004-08-13 收到，2005-01-20 改回
国家863计划(2005AA123320)和江苏省自然科学基金(BK2005 409)资助课题

流量的路由方法就是从路由建立的角度出发，通过均衡网络流量，提高Ad hoc网络的能量效率。

在文献[8]中分别对两种按需路由协议——AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector)路由协议[9]和DSR (Dynamic Source Routing)路由协议[10]进行了仿真，通过仿真观察到在Ad hoc网络负荷较大的情况下，在某些节点会出现拥塞，数据在这些出现拥塞的节点的链路层缓存中堆积，造成缓存溢出，增加了数据的冲突和重传以及延时，并且这种现象还会持续一段时间，加重了Ad hoc网络的拥塞，使得网络中大量的资源用在了无效的传输上，降低了整个网络的能量效率。针对这一现象，本文提出了一种网络层均衡流量的路由建立算法——基于连接度的流量均衡TBDB (Traffic- Balanced Degree-Based)算法。该算法从节点连接度的角度出发均衡网络流量，在路由建立的时候，节点根据当前的连接状况决定是否应答收到的路由请求，从而避免了新的通信连接通过拥塞的节点。TBDB算法在均衡网络流量的同时，提高了网络均衡度，减少了拥塞和重传，避免能量浪费，也使得网络中能量的消耗更加均衡，提高了网络的能量效率。

2　路由建立过程存在的问题

目前路由协议在建立路由时一般按照最小跳路由度量选择路径，并且在路由选择建立的过程并没有考虑到节点当前的状态，以及网络中现有的流量分布，这样会造成网络中流量分布的不均衡，一些重要节点的能量消耗远大于网络中其它节点，造成能量消耗的不公平性。

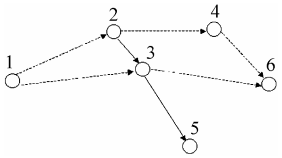

图 1　一个简单的 Ad hoc 网络结构示意图

如在图1中，假设节点2通过节点3向节点5发送数据，且数据量很大，使得节点3的链路层缓存接近饱和。此时，若节点1欲建立至节点6的路由，根据AODV路由协议[9]，节点1将收到两条路由应答RREP(Route Reply)消息，分别沿路径1→3→6和1→2→4→6。我们通过仿真发现，通常这两条RREP信息中所包含的目的序列号相同，因此节点1将会选择跳数更小的路径，这样节点3将成为中间节点，使得节点3处的负荷加大。由于节点链路带宽以及处理能力的限制，当数据到达的速率超过链路层处理数据的速率时，数据将在链路层的缓冲队列中排队等待，增大了分组转发延时。如果一直保持该状态，将使得链路层存储数据的队列发生溢出，造成分组丢失。同时当缓存满后，链路层将丢弃收到的分组，而发端在预定时间内没有收到目的节点发送的确认信息，将重新发送该分组，从而进一步加剧网络在节点3处的局部拥塞，最终可能造成链路中断。并且由于数据都通过节点3转发，使得节点3能量消耗大于网络中其它节点，一旦节点3能量耗尽，将使得网络拓扑发生改变。同时由于拥塞，虽然数据报最终没有到达目的节点，但由于源节点重发数据，中间节点转发数据也造成了不必要能量的消耗。

从上面的分析可以看出，该路由建立的过程没有直接反映网络的局部状况，因此在此基础上所作的路由选择不能有效地与当前网络状况相适应。TBDB 路由算法虽然其选路原则仍然是最小跳路由，但是该算法由节点根据本身负荷的情况决定是否作为新建路由的转发节点，对可选的路径集合进行了限制，避免了拥塞路径，因此获得了更高的网络利用率。该算法将网络的局部状态与全局状态相结合，使得网络负荷分布均匀，在均衡流量的同时，也将网络中能量的消耗均衡地分散于网络各个部分，从而改进了无线网络的性能，提高了网络的吞吐率和能量利用率，并且降低了平均端到端的延时。

3　链路层性能分析

由于TBDB路由建立算法与Ad hoc网络中节点在网络达到饱和状态时[11]的吞吐量有关，因此首先对链路层协议进行分析。

当前对Ad hoc网络的研究以及实现中，链路层普遍采用IEEE 802.11协议[12]。802.11协议采用了基于载波检测多址接入/冲突避免CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)机制的分布式协调功能DCF (Distribution Coordination Function)，为了解决隐藏主机的问题以及避免长帧发生碰撞，可以采用请求确认RTS/CTS (Request to Sent/Clear to Send)机制。其工作过程如图2所示：

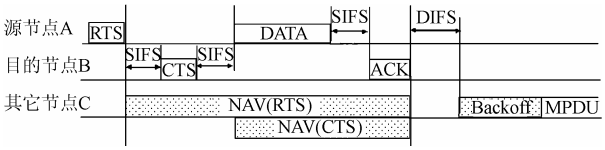

图 2　RTS/CTS 接入时序图

随着网络负荷的增加，采用 802.11 协议的Ad hoc网络的吞吐量也会增加，这里的吞吐量值采用了归一化吞吐量，定义为网络负荷同信道容量的比值。吞吐量增加到一定值后进一步增加网络负荷，其吞吐量会出现明显的下降，随后会渐进地逼近一个值，并保持在一个稳定状态，此时的网络吞吐量称为饱和吞吐量。采用RTS/CTS机制，节点链路层的归一化饱和吞吐量S为[11]：

$$S=\frac{\mathrm{E[P]}}{T_s-T_c+\dfrac{\sigma[T_c/\sigma-(1-\tau)^n(T_c/\sigma-1)]}{n\tau(1-\tau)^{n-1}}} \tag{1}$$

式(1)中，归一化饱和吞吐量定义为在任意一个时间片(Slot)中，处于稳定状态的网络其信道用于成功传送数据的时间在

一个时间片内所占的比值，E[P]表示链路层有效载荷（Payload）的平均时间长度，T_s表示由于成功发送数据所引起的信道忙的平均时间，T_c 表示信道冲突所占用的平均时间，n为共用该信道的节点数，σ 表示一个时隙所占用的时间，τ 表示在任一时隙中一个节点发送数据的概率。

根据RTS/CTS握手机制的传输原理，可得

$$\begin{cases} T_S = \text{RTS} + \text{SIFS} + \delta + \text{CTS} + \text{SIFS} + \delta + H \\ \qquad + \text{E[P]} + \text{SIFS} + \delta + \text{ACK} + \text{DIFS} + \delta \\ T_C = \text{RTS} + \text{DIFS} + \delta \end{cases} \tag{2}$$

式中 δ 表示传播延时，RTS、CTS和ACK分别表示该帧的传输时间，SIFS（Short InterFrame Space)为短帧间隔时间，DIFS (Distributed InterFrame Space)为DCF帧间间隔时间。

在确定了回退窗口值的情况下，τ 可以通过求解非线性方程组(3)的数值解得到：

$$\begin{cases} \tau = \dfrac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \\ p = 1-(1-\tau)^{n-1} \end{cases} \tag{3}$$

式中W表示最小回退窗口值。将 τ 的值带入式(1)可以求得在指定条件下的归一化吞吐量S。

在回退窗口值未确定的情况下，当式(4)取最大值时，归一化吞吐量S取最大值：

$$f = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{T_c^* - (1-\tau)^n (T_c^* - 1)} \tag{4}$$

式中 $T_c^* = T_c/\sigma$ ，上式对 τ 求导，并将求导后所得式取值为 0，可得式(5):

$$(1-\tau)^n - T_c^* \left\{ n\tau - \left[1-(1-\tau)^n \right] \right\} = 0 \tag{5}$$

由于 $\tau \ll 1$，可得

$$(1-\tau)^n \approx 1 - n\tau + \frac{n(n-1)}{2} r^2 \tag{6}$$

将式(6)带入式(5)可得

$$\tau = \frac{\sqrt{\left[n + 2(n-1)(T_C^* - 1) \right] / n} - 1}{(n-1)(T_C^* - 1)} \approx \frac{1}{n\sqrt{T_C^*/2}} \tag{7}$$

此时归一化饱和吞吐量 S 取最大值：

$$S_{\max} = \frac{\text{E[P]}}{T_S - T_c + \dfrac{T_c/\sigma - (1 - n\sqrt{T_c/2\sigma})^n (T_c/\sigma - 1)}{\sqrt{T_c/2\sigma}(1 - n\sqrt{T_c/2\sigma})^{n-1}}} \tag{8}$$

从式(8)可知，Smax随链路层平均分组负荷的大小E[P]改变。

S代表了当前节点的归一化饱和吞吐量，表明了节点的最大吞吐能力，反映了节点链路层传输数据的能力。其值越大，表明链路层传输数据的能力越强，在相同的网络负荷下，节点出现拥塞的可能性越小。

在归一化饱和吞吐量的基础上，我们提出了TBDB路由建立算法。该算法将当前网络链路层的吞吐量作为衡量节点允许负荷的指标，限制节点的流量，从而均衡网络流量，避免了不必要的能量损耗，提高了能量利用效率。

4 TBDB路由算法

这里我们将引入连接度的概念，对每个节点根据其当前负荷限制连接度，使得网络中由于冲突和重传所造成的能量损耗最小化。

定义节点的连接度为：Ad hoc网络拓扑结构中，节点v在与各流对应的集合中出现的次数之和。这里流指的是由源宿IP地址组成的对，流由路径（或路由）决定，路径实际是一系列点的集合，该集合中包含了源宿节点和中间节点。

如图 3 中的 Ad hoc 网络，不同的连接线表示不同的通信流。节点 1 的连接度为 3，节点 2、3、4 和 7 的连接度为 2，节点 6 的连接度为 1，节点 8 的连接度为 0。连接度与该节点通信流的个数相对应，从一定程度上反映了节点的当前负荷状态。当归一化饱和吞吐量为 S 时，允许连接度 C 可计算为

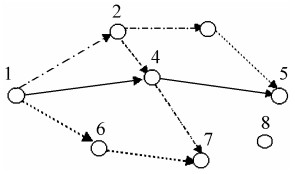

图 3 一个 Ad hoc 网络数据流向图

$$C = \frac{SR}{E(f)n} \tag{9}$$

式中R表示每个节点的传输速率，n表示共用信道的节点数，$\overline{E(f)}$ 表示平均每个通信流的流量（单位：bit/s）。

在TBDB路由建立算法中，如果当前节点连接度大于允许连接度C 时，节点将丢弃收到的目的节点不是本节点的路由请求信息，即节点将拒绝作为中间节点转发分组，从而保证了节点已有的正在进行的通信的传输质量，避免了接入流量超过节点的当前容量，避免了节点发生拥塞和不必要的能量损耗。

5 仿真结果及分析

本节对TBDB路由算法进行了仿真分析，仿真结果表明该路由算法有效地提高了网络的吞吐量，提高了能量利用效率。

采用离散事件驱动方法进行仿真。物理层为双向无线链路，采用直接序列扩频DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)技术。每个节点的传输速率为2Mbit/s，无线传输范围为200m。链路层为采用了RTS/CTS机制的IEEE 802.11协

议，链路层缓存队列的大小为256kbits。网络层采用了AODV路由协议，对未改进的AODV路由协议同采用了TBDB路由算法的AODV路由协议进行了仿真对比。

仿真中，设定网络的范围为600×400m^2，对网络中20个节点的情况进行了仿真。信源采用泊松信源(平均到达率为λ)，每个分组的长度为1024bit。通过改变信源产生分组的平均时间间隔T_I($T_I=1/\lambda$)，改变网络的负荷。在网络所有节点IP地址范围内随机地对信源产生的分组安排一个目的地址，将信源产生的分组发送至网络层，网络层收到来自上层的数据分组后，按所采用的路由协议对分组进行路由转发。节点运动模型采用了Random way-point运动模型[13]，该模型中每个节点每隔一段等待时间(T_{pause})后，在所规定的网络范围内，随机地选择一个目的点，然后在预先设定的速度范围内（0～$V_{\max}$）随机地选择一个值，按该速度恒定地移向目的位置。到达该点后，暂停一段等待时间T_{pause}，再计算下一个目的位置，如此反复。

每个节点初始能量相同，能量消耗模型如下：设节点发送一个数据分组所需能量为E_{tr}，接收一个数据分组所需能量为E_{re}，转发一个数据分组所需能量为E_{fw}，其计算公式如下：

$$\left.\begin{aligned} E_{\text{tr}} &= P_{\text{tr}}\cdot T_p = I_{\text{tr}}\cdot V\cdot T_p \\ E_{\text{re}} &= P_{\text{re}}\cdot T_p = I_{\text{re}}\cdot V\cdot T_p \\ E_{\text{fw}} &= (P_{\text{tr}}+P_{\text{re}})\cdot T_p = (I_{\text{tr}}+I_{\text{re}})\cdot V\cdot T_p \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中P_{tr}表示发射功率，P_{re}表示接收功率，T_p表示发送或接收一个分组所需时间，其值为：$T_p=P_{\text{size}}/2\times10^6$，$P_{\text{size}}$为分组长度。发送电流$I_{\text{tr}}$和接收电流$I_{\text{re}}$的值采用了文献[14]中测量得到的数据。我们取$V$=4.74$v$，发射状态下$I_{\text{tr}}$=280mA，接收状态下$I_{\text{re}}$=204mA，空闲状态下的电流为$I_{\text{id}}$=178mA。在我们的仿真中考虑了串音情况，节点处于串音状态时，其能量的损耗与节点处于接收状态相近似[14]，因此串音所需能量的计算采用了E_{re}的计算公式。

节点数为20，节点在网络中随机分布的情况下，经多次仿真计算可得网络中平均共用信道的节点数为8。在不同的信源产生分组时间间隔T_I情况下，节点允许连接度C的取值如表1所示。

表 1　节点允许的连接度取值表

T_I(n=8)	C	T_I(n=8)	C
0.12	9	0.07	5
0.11	8	0.06	5
0.10	7	0.05	4
0.09	7	0.04	3
0.08	6	0.03	2

为了评估均衡流量的路由协议的性能，我们统计了归一化网络吞吐率和平均端到端延时以及相对能量消耗。归一化网络吞吐率为单位时间内网络中成功到达目的节点的分组比特数（网络的吞吐量）与网络负荷的比值，这里网络负荷指的是在单位时间内网络中所有源节点发送的分组比特数。平均端到端延时包含了数据分组从源节点产生到由目的节点接收整个过程中所有可能产生的延时，主要包括路由发现过程所需时间，分组在缓存中的排队时间，链路层重传时间，以及传播时间。采用相对能量消耗率作为能量效率的衡量指标，以最小跳路由算法成功发送一个数据包消耗的平均能量为标准，其它路由算法成功发送一个数据包消耗的平均能量与该标准的比值为相对能量消耗率，该值越小，说明其能量效率越高。

图 4，图 5 和图 6 为在T_{pause}＝30s，$V_{\max}$分别为 5m/s，10m/s 和 20m/s时， AODV协议改进前后网络的吞吐率。从图中可以看出，网络吞吐率随网络负荷的增加而降低，在发送至网络中的数据量比较小的时候，AODV协议改进前后网络的吞吐率基本相近，都接近于 1，但随着网络负荷的提高，网络吞吐率下降。造成这种情况的原因是局部的网络拥塞，引起了分组丢失。采用未改进的AODV路由协议网络吞吐率下降快，采用TBDB路由算法随着网络负荷的增加其吞吐率高于未改进的AODV路由算法，其原因是避免了网络的局部拥塞，降低了分组丢失。从图 4，图 5 和图 6 中可以看出网络负荷越大，改进越明显。如在 5m/s，网络负荷为 680kbit/s时，采用TBDB路由算法其网络吞吐率比未改进时提高了约 40％，这样的改进是非常可观的。

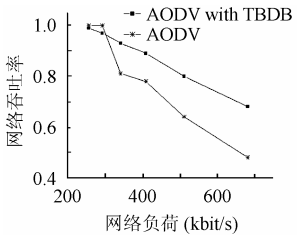

图 4　$V_{\max}$=5m/s时网络吞吐率随网络负荷变化曲线(n=20)

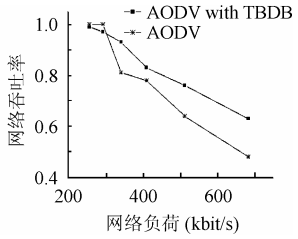

图 5　$V_{\max}$ =10m/s时网络吞吐率随网络负荷变化曲线(n=20)

从图4，图5和图6中的曲线可以看出，随着节点运动速度的增加，网络的吞吐率下降，未改进的AODV路由算法性能下降更快。这是由于节点运动速度越快，网络拓扑结构改变越快。当节点移出了原有的通信范围后，需要重建路由，从而引起分组丢失，降低了网络的吞吐率。改进后的协议其网络吞吐率也随节点运动速度的加快而降低，但与改进前相比有很大的提高。仿真结果说明TBDB路由建立算法对于不同运动速度下的采用AODV路由协议的Ad hoc网络其吞吐率都有提高。

图7中为20个节点时在不同网络负荷和运动速度下的相对能量消耗率。从图中可以看出，在网络负荷小的时候，如

图中网络负荷为256kbit/s处，由于没有拥塞出现，改进后的路由协议与未改进的路由协议的能量效率基本相同，但随着网络负荷的增加采用了改进算法的网络的能量效率不断提高，充分说明了均衡能量路由算法在均衡流量的同时也均衡了网络中能量的损耗，提高了能量利用率。在网络负荷为680kbit/s时，其成功发送一个分组的能量消耗只有采用最小跳路由算法能量消耗的63%。

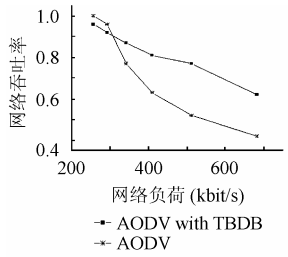

图6 V_{max} =20m/s时网络吞吐率随网络负荷变化曲线 (n=20)

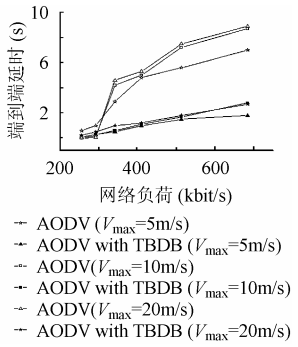

图7 网络相对能量消耗率随网络负荷变化曲线 (n=20)

图 8 中为 20 个节点时在不同网络负荷和运动速度下的端到端延时。从图中可以看出在网络负荷较低的情况下延时很小，随着负荷增加，由于在各个节点队列中排队时间的增加，延时变大。改进后的 AODV 路由协议通过避免局部的拥塞，使得新建立的路由利用本地负荷小的节点作为中间节点，减少了分组在节点缓存队列中的排队时间，大大降低了平均端到端延时。如在网络负荷为 680kbit/s，节点运动速度为 5m/s 时，采用 TBDB 算法平均端到端延时为 1.8s，而采用未改进的 AODV 协议平均端到端延时达到 8.9s。

以信源产生分组间隔时间为T_I＝0.06s，节点运动速度V_{max}为10m/s的情况为例，观察改进前后节点链路层队列的长度改变情况。图9中所示为任取一个节点观察其在改进前后链路层队列的变化情况。从图中可以看到，采用未改进的AODV路由协议时，该节点链路层队列在一段较长时间内链路层缓存队列处于超负荷状态（如图中100s到220s这段时间），此时如果新的数据不断到达，则队列会发生溢出，将丢弃新到达的分组（包括本节点产生的分组或来自其它节点的分组），降低了网络的效率。而采用TBDB算法后，由于限制了负荷达到一定程度的节点作为新建路由的中间节点，因此避免了更多的数据通过这些负荷已经较重的节点，使得链路层队列中的数据很快下降，避免了拥塞。在图9中采用TBDB算法后没有出现链路层缓存队列满的现象，这说明采用均TBDB算法避免了网络拥塞。

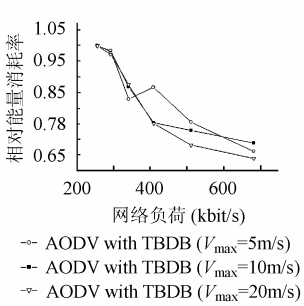

图8 端到端延时随网络负荷变化曲线(n=20)

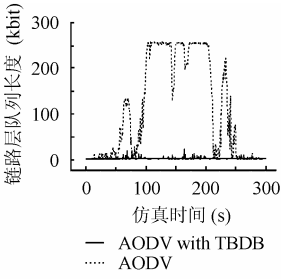

图9 AODV协议节点改进前后链路层队列随时间变化曲线(n=20)

6 结速语

传统的路由协议没有考虑下层性能对上层的影响，而无线通信网络中，由于无线信道的特性以及节点的可移动性等，降低了网络各协议层之间的独立性，考虑网络中各层之间的相互影响，将网络的整体性能与局部性能综合考虑，可以更好地利用有限的无线资源，提高网络的吞吐率和能量效率。本文给出了均衡流量的TBDB路由建立算法，并在Ad hoc按需路由协议之一AODV路由协议的基础上进行了分析和仿真。结果表明采用TBDB路由建立算法，使得网络中节点可以根据节点的当前状况做出路由选择，避免了网络的拥塞，提高了网络性能。仿真结果进一步表明，采用该算法可以提高网络吞吐率和能量效率，降低端到端延时。

参 考 文 献

[1] Ephremides A. Energy concerns in wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(4): 48 − 59.

[2] Rodoplu V, Meng T. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8): 1333 − 1344.

[3] Stemm M, Katz R H. Measuring and reducing energy consumption of netword interfaces in handheld devices. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications, and Computer Science,* Special Issue on Mobile Computing, 1997, 80(8): 1125 − 1131.

[4] Scoot K, Bamos N. Routing and channel assignment for low power transmission in PCS. ICUPC’96, 1996, vol. 2: 498 − 502.

[5] Singh S, *et al*.. Power-aware routing in mobile Ad hoc networks. in Proc. of Conf. Mobile Computing, MobiCom’98, 1998: 181 − 190.

[6] Srinivasan V, *et al*.. Cooperation in Wireless Ad hoc Networks. in Proc. of IEEE INFOCOM’03, 2003, vo1.2: 808 − 817.

[7] Shaikh A, *et al*.. Load-sensitive routing of long- lived IP flows. in Proc. of ACM SIGCOMM'99, September 1999: 215 − 226.

[8] Yu Xutao, *et al*.. An improvement for Ad hoc on-demand routing protocol. in Proc. of The 14Th IEEE PIMRC, September 2003: 1360－1364.

[9] Perkins C, *et al*.. Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) routing. http://www.ietf.org/internet-dtafts/dtaft-ietf-manet- aodv-08.txt, March 2001, IETF Internet Draft.

[10] Johnson D B, *et al*.. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR). http://www.ietf.org/internet-dtafts/draft- ietf-manet-dsr-07. txt, February 2002, IETF Internet Draft.

[11] Cali F, *et al*.. IEEE 802.11 wireless LAN: Capacity analysis and protocol enhancement. in Proc. IEEE INFOCOM'98, April 1998: 142－149.

[12] IEEE. wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification[S]. IEEE standard, 802.11 -1997, 1997.

[13] Broch J, *et al*.. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. in Proc. of MOBICOM '98, Dallas, TX, October 1998: 85－97.

[14] Feeny L, Nilsson M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an Ad hoc networking environment. In Proceedings of IEEE INFOCOM, Anchorage, AK, 2001.

余旭涛： 女，1975 年生，博士，讲师，研究方向为无线网络技术.

张在琛： 男，1975 年生，博士，副研究员，研究方向为高速无线通信技术、移动通信系统和互联网技术.

毕光国： 男，1939 年生，教授，博士生导师，研究方向为数字通信、扩频通信、移动通信和数字信号处理和智能信号处理在通信中的应用等方面.