

一种均衡流量的 Mobile Ad Hoc 网络能量路由选择方法¹

余旭涛 毕光国 张在琛

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 由于 Ad hoc 网络是能量受限网络, 因此如何提高 Ad hoc 网络的能量效率问题非常重要。该文提出了一种新的路由选择度量, 该度量把节点链路层的拥塞度与节点当前剩余能量综合在一起考虑, 使得网络中能量消耗和网络负荷能更加均匀地分布, 提高了网络的连通性, 增加了网络的吞吐量。仿真结果表明, 该度量对于不同规模的网络, 其吞吐量均有不同程度的提高。

关键词: 移动自组织网络, 能量, 路由, 度量, 媒体接入控制

中图分类号: TN919.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)12-1965-07

A Traffic-Balanced Energy-Aware Routing Method for Mobile Ad Hoc Networks

Yu Xu-tao Bi Guang-guo Zhang Zai-chen

(State Key Lab of Mobile Communications, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract Ad hoc network is an energy-limited network. How to improve energy efficiency in an Ad hoc network is an important open problem. This paper proposes a new routing metric, which integrates congestion status at the link layer and remaining energy of a node. By adopting this new metric, energy dissipation and traffic load are distributed more evenly in the network, leading to higher network connectivity and network throughput. Simulation results show that the new metric improves network throughput for networks with different scales.

Key words Mobile Ad hoc networks, Energy, Routing, Metric, Media access control

1 引言

Mobile Ad hoc 网络即移动自组织网络, 是一种不需要固定基站支持的, 具有高度动态拓扑结构, 变容量连接, 带宽、能量受限的多跳无线网络^[1], 具有广阔的应用前景。在 Ad hoc 网络中, 移动节点主要依靠电池提供能量, 因此 Ad hoc 网络是一种能量受限的网络。与固定有源节点相比, 移动节点能量供给具有高成本和短时特性, 因此对于 Ad hoc 网络而言能量效率是非常重要的问题。

文献 [2] 中指出现有的无线网络可分为 4 类, 分别是蜂窝网、无线局域网、卫星网和 Ad hoc 网络, 其中 Ad hoc 网络是一种无固定结构且多跳的典型的无线网络。该网络的性能与能量消耗密切相关, Ad hoc 网络从各个方面充分体现了无线网络中的能量效率问题, 因此研究无线网络的能量问题可以以 Ad hoc 网络为重点。这里我们提出了一种综合链路层和路由层特性的 Ad hoc 网络路由选择方法, 该方法采用了综合能量和节点状态的路由度量 (Metric), 使得网络中能量消耗和网络负荷能更加均匀地分布, 提高了网络的吞吐量。

本文的第 2 节简单地介绍了 Ad hoc 网络中的能量问题; 第 3 节提出并分析了均衡流量的能量路由度量方法; 第 4 节在 Ad hoc 按需距离矢量路由协议 (Ad hoc On-demand Distance

¹ 2003-07-23 收到, 2003-12-22 改回
国家自然科学基金 (60372054) 资助项目

Vector AODV)^[3] 路由协议的基础上进行了仿真实现, 给出了仿真结果, 并同基于最短跳数的路由协议进行了分析比较; 最后, 在第 5 节中给出了结论。

2 Ad hoc 网络中的能量问题

Ad hoc 网络中的能量效率问题近年来逐步得到了人们的重视, 其能量的损耗涉及到了网络的各个层次, 如何提高网络的能量效率可以从物理层、链路层、网络层等几方面考虑^[2,4]。

在物理层, 可以通过选取不同的电池, 采用不同的调制 / 解调方式和编 / 解码方式, 以及信号压缩方式等提高能量效率。也可以根据收发信机之间的距离, 结合节点运动预测, 采用自适应天线, 通过改变发射功率的大小, 提高能量的利用率。

在链路层, 不同的接入方式对能量效率也有影响, 比如采用时分多址接入和采用频分多址接入具有不同的能量效率^[2]。此外还可以根据所采用的链路层协议, 确定节点的当前状态, 如文献 [5] 中, 采用支持节点可以在不同状态下切换的 MAC(Multimedia Access Control) 层协议来提高能量利用率, 文中的链路层协议采用了可以在激活模式 (Active mode) 和功率节省模式 (Power-save mode) 之间转换的 IEEE 802.11 MAC 层协议^[6] 来节省能量。当节点处于激活模式时, 可以收发数据; 当节点处于功率节省模式时, 节点将处于休眠状态, 在该状态下, 节点能量损耗非常低。文献 [7] 中给出的称为 PAMAS(Power-Aware Multiple Access protocol with Signaling) 的 MAC 层协议, 利用 RTS/CTS(Request To Sent/Clear To Send) 消息来确定节点休眠的时间, 当在其传输范围内有其它节点发送或接收数据时, 节点进入休眠状态。

在网络层, 可以通过采用不同的路由度量方式来提高能量效率。目前与能量有关的度量方式可以分为 3 种, 分别是功率度量路由算法, 能量度量路由算法和混合路由算法^[8,9]。功率度量路由算法以传输功率 (Transmission power) 作为选择路由的度量, 路由选择时选取可选路径中总的传输功率最小的路径。功率度量路由算法适用于发射功率可以调整的情况, 在发射功率固定的情况下, 功率度量路由算法等同于最小跳数路由算法。如文献 [9] 中提到的最小总传输功率路由算法 (MTTPR, Minimum Total Transmission Power Routing) 就是一种典型的功率路由算法, 节点数为 d 的路径上的总的传输功率为 $P(rd) = \sum_{i=1}^d T(n_i + n_{i+1})$, 路由选择时选取 $P(rd)$ 最小的路径。能量度量路由算法主要考虑网络中节点的剩余能量, 选择路由时避免使用剩余能量低的节点, 这样可以保持网络的连通度, 延长网络的生存时间, 如 MMBCR(Min-Max Battery Cost Routing)^[9] 算法在选择路由时将每条可选路径中剩余能量最小的节点的能量进行比较, 选择其中剩余能量最大节点所在的路径。混合度量路由算法综合考虑了发射功率和剩余能量问题, 在路由选取时同时考虑两者的对网络性能的影响, 如 CMMBCR (Conditional Max-Min Battery Capacity Routing) 算法综合了 MTTPR 算法和 MMBCR 算法, 既考虑到了总的传输能量又考虑到了网络中节点的剩余能量。

此外, 还有一些提高 Ad hoc 网络能量效率的方法将多个层次综合考虑。文献 [6] 中指出将路由层的功率或能量度量算法与 MAC 层的 PAMAS 协议相结合, 可以将传送每个分组的能量减少 40%—70%。文献 [10] 中提出的 DPC(Distributed Power Control) 方法在物理层采用了自适应的功率控制, 发射功率根据接收到的来自相邻节点的接收功率改变, 同时在路由中以该自适应的发射功率作为路由的度量, 使得该方法不仅在每一跳 (Hop by hop) 上保证了低的能量消耗, 而且也保证了端到端的低的能量消耗。

对于无线网络而言, 严格的层次结构阻碍了相互依赖性更强的无线网络的各层之间的交互, 使得网络不能在一种最佳的状态运行, 通过对 Ad hoc 网络的大量研究表明将各层次加以综合考虑是必然的^[2]。同样地, 在研究 Ad hoc 网络的能量问题时, 也需要综合考虑各协议层之间的相互影响。这里, 我们提出了一种将能量和节点链路层拥塞状态相结合的路由度量方法, 并对其进行了仿真分析。

3 均衡流量的能量度量路由算法

Ad hoc 网络没有固定的网络结构，其节点之间是否连通与收发信机的功率，节点间的距离，当前信道的状态等都有关系，是一种不固定的连接，不能用连接固定的网络拓扑图进行描述。这里我们假设每个节点的发射功率相同且所需的接收功率也相同，邻节点之间为双向链路，并且节点的发射功率固定，其最大的接收距离为 R 。在这种情况下一个 Ad hoc 网络可以用无向图表示为 $G = (V, E)$ ，其中 V 为顶点集，包含了网络中的所有节点， E 为边集， E 中元素 (x, y) 表示节点 x 与 y 之间存在一条双向链路， E 可以表示为

$$E = \{(x, y) \in (V \times V) / d(x, y) \leq R\} \tag{1}$$

式中 $d(x, y)$ 表示从节点 x 到 y 的欧氏距离 (Euclidean distance)。

边集 E 中的元素不仅随着节点的位置的改变而改变，同时也会随着网络中节点能量的改变而改变。图 1 中为一个包含有 7 个节点的 Ad hoc 网络，假设节点位置不发生改变，且各节点的初始能量相同。其网络拓扑如图 1(a) 所示，连接两个顶点的连线表示在这两节点间存在一条双向链路。该 Ad hoc 网络可以表示为

$$\left. \begin{aligned} G &= (V, E) \\ V &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} \\ E &= \{(1, 2), (1, 4), (1, 7), (2, 3), (2, 7), (3, 5), (4, 7), (5, 6), (5, 7), (6, 7)\} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

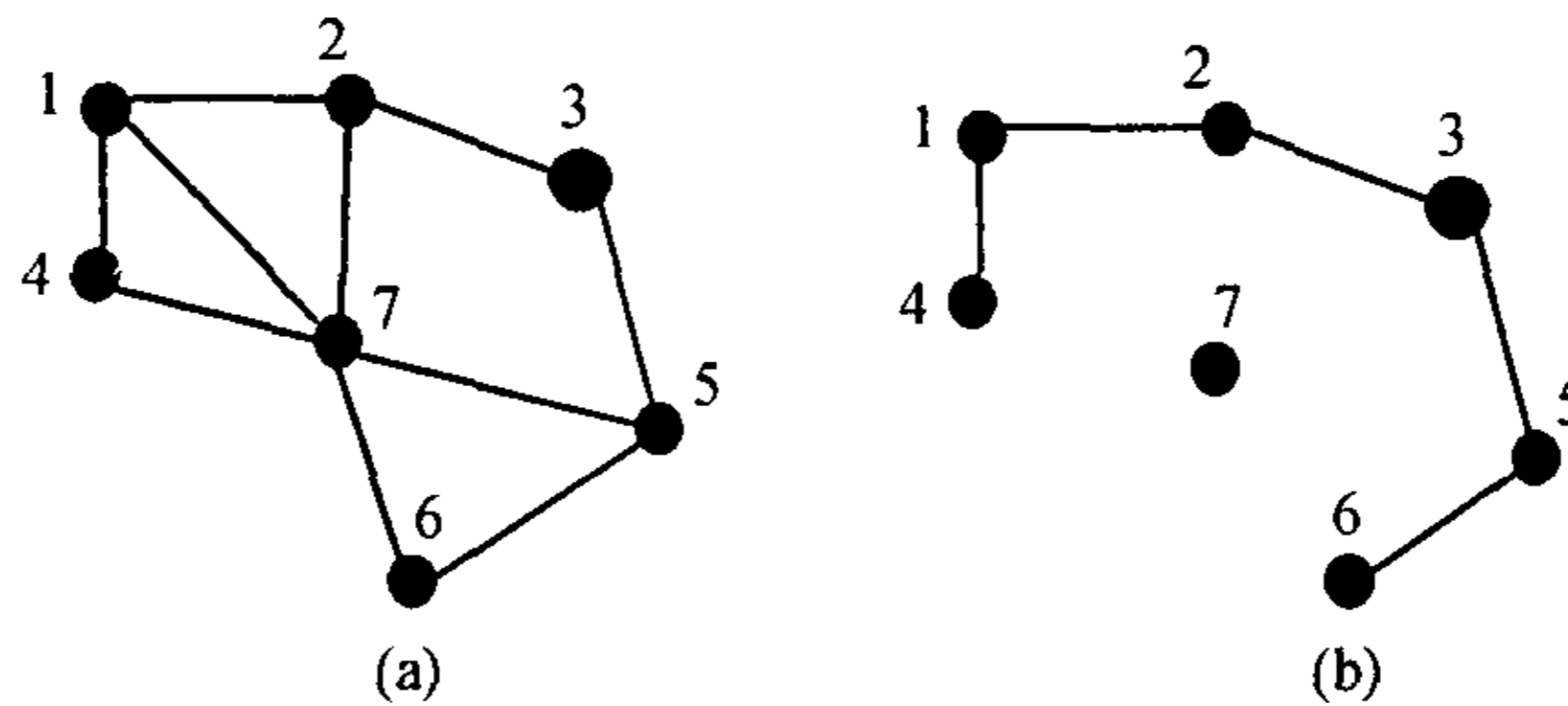


图 1 一个简单的 Ad hoc 网络结构示意图

假设节点 1 正在向节点 5 发送数据，如果采用最小跳数路由算法，则所选择的路径为 $1 \rightarrow 7 \rightarrow 5$ 。过一段时间后若节点 6 欲向节点 2 发送数据，按照最小跳数路由算法，其所选路径为 $6 \rightarrow 7 \rightarrow 2$ 。由于两条路径均通过节点 7，使得网络中所有数据都将通过节点 7，因此可能会出现下面两种不利情况：

(1) 节点 7 由于要转发网络中的所有数据，因此其能量消耗大于网络中其它节点。一旦节点 7 中的能量耗尽，则网络拓扑将发生改变，如图 1(b) 所示，此时，节点 7 与网络中其它节点的连接中断，将不能再发送或接收任何数据，无论是对整个网络还是节点 7 而言，显然都不希望产生这种情况。

(2) 与网络中其它节点相比节点 7 负荷较重。当源节点产生大量数据使得在节点 7 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，随着缓冲队列中数据的增加，分组延时也将增加。如果一直保持该状态，将使得链路层存储数据的缓存队列发生溢出，造成分组丢失。而源节点在规定的时间内没有收到目的节点发回的确认信息，将继续保留并重传该分组，从而进一步加剧了该路径上各节点的拥塞，最终造成链路中断^[11]。

针对上面的问题, 我们提出了一种既考虑网络中节点能量的损耗情况同时又兼顾了网络中流量均衡的路由度量:

$$M = \sum_{i=1}^d (E_{i \max} / E_i) \times [Q_{i \max} / (Q_{i \max} - Q_i)] \quad (3)$$

式中, M 为节点数为 d 的路径的路由度量, 路由选择时选取该值最小的路径。 $E_{i \max}$ 表示节点 i 的电池的最大容量 (单位: 焦耳), E_i 表示节点 i 当前的剩余能量 (单位: 焦耳), $Q_{i \max}$ 表示节点 i 链路层缓存队列的最大容量 (单位: 比特), Q_i 表示节点 i 当前链路层缓存队列中的数据长度 (单位: 比特)。该路由度量综合考虑了节点剩余能量以及节点链路层的拥塞情况。一旦某条路径上节点剩余能量较小, 或者出现拥塞, 则度量 M 的值将很大, 从而不会选择该路径。

按照该度量, 重新考虑图 1 中 Ad hoc 网络的路由选择问题。节点 1 欲向节点 5 发送数据, 此时由于网络中各节点能量相同, 且无其它数据传送 (链路层队列中没有数据), 将仍然选择路径 $1 \rightarrow 7 \rightarrow 5$ 。在该路径上, 目的节点 5 每成功接收一个分组, 节点 7 转发该分组所消耗的能量为接收和发送一个分组所需能量之和, 大于网络中其它节点的能量损耗, 这使得节点 7 的剩余能量低于网络中其它节点的剩余能量。这样经过一段时间后, 节点 6 向节点 2 发送数据, 按照新的路由度量, 若 $M_7 > M_5 + M_3$, 则将选择路径 $6 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ 。这样将避免加剧节点 7 能量的消耗, 同时避免了该节点处出现拥塞, 均衡了网络的能量消耗和流量, 有利于提高整个网络的吞吐量。

4 仿真结果及其分析

我们采用了离散事件驱动的方法进行仿真。物理层为双向无线链路, 采用了跳频技术。每个节点的信道带宽为 1 Mbit/s, 每个节点具有固定发射功率, 其最大无线传输范围为 250 m。目前对 Ad hoc 网络的研究都普遍采用 IEEE 802.11 协议作为链路层协议, 这里我们对链路层也采用了带 RTS/CTS 机制的 IEEE 802.11 协议^[6]。链路层缓存队列的大小设为 256 kbit, 即 $Q_{\max} = 256 \text{ kbit}$ 。路由层基于按需路由协议 AODV, 分别对采用均衡流量的能量度量和最小跳数度量情况进行了仿真。仿真中, 设定网络的范围为 $1200 \times 800 \text{ m}^2$, 节点在网络中随机分布, 节点数分别为 20, 30 和 40。信源采用固定比特率信源, 每个分组的长度为 2048 bit。通过改变信源产生分组的时间间隔 T_f , 可以改变网络的负荷。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目的地址, 将分组发送至 IP 层, IP 层收到来自应用层的数据分组后, 按所采用的 AODV 路由协议对分组进行路由转发。

移动模型采用了 Random way-point 运动模型^[12], 每个节点每隔一等待时间 (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 ($0 \sim V_{\max}$) 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, 暂停一等待时间, 再计算下一个目的位置, 如此反复。

能量消耗模型 (Energy consumption model)^[9] 将节点能量的消耗分为 4 种状态, 分别是发送、接收、空闲和串音 (Overhearing)。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:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{tr}} &= P_{\text{tr}} \times T_p = I_{\text{tr}} \times V \times T_p \\ E_{\text{rx}} &= P_{\text{re}} \times T_p = I_{\text{re}} \times V \times T_p \\ E_{\text{fw}} &= (P_{\text{tr}} + P_{\text{re}}) \times T_p = (I_{\text{tr}} + I_{\text{re}}) \times V \times T_p \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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, 在传输速率为 1 Mbit/s 的情况下其值为 $T_p = P_{size} \times 10^{-6}$ 。 P_{size} 为分组长度, 发送电流 I_{tr} 和接收电流 I_{re} 的值采用了文献 [4] 中测量得到的数据。文献 [4] 中给出了在 Ad hoc 网络环境下, 经多次实验所测得的 Lucent WaveLAN IEEE 802.11 无线网卡的能量消耗数据。文献 [4] 中实验结果表明, 对于不同传输速率的无线网卡, 在相同状态下测得所消耗的功率值近似。因此, 我们取 $V = 4.74 V$, 发射状态下 $I_{tr} = 280 mA$, 接收状态下 $I_{re} = 204 mA$, 空闲状态下的电流为 $I_{id} = 178 mA$, 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 [4], 在我们的仿真中考虑了串音情况。假设网络中节点电池的最大能量相同其值为 $E_{i\max} = 100 J$, 但初始能量不同。仿真前设定好每个节点的初始能量, 每次仿真直至网络总能量为零, 统计结果。

图 2 所示为采用本文提出的均衡流量的能量度量方法与采用传统的最小跳数度量方法所得到的网络吞吐量的比较, 网络吞吐量指的是网络中成功接收的数据分组的数目。从图中可以看出, 均衡流量的能量度量方法可以得到更高的网络吞吐量。两种方法得到的网络吞吐量在一定时间以后不再增加, 这是因为在我们的仿真中, 考虑了节点的能量, 所以当部分节点能量耗尽后, 网络中没有有效路径, 网络吞吐量不再增加。从图中还可以看出, 采用最小跳数度量时, 网络吞吐量在大约 70s 时即不再增加, 而采用均衡流量的能量度量, 网络吞吐量到 110s 还有增加。这是因为采用均衡流量的能量度量, 网络中节点的能量被更均匀、合理地利用, 避免了少数节点的能量被过早耗尽的情况, 延长了 Ad hoc 网络中路径存在的时间。

图 3 至图 5 比较了不同分组发送间隔条件下的相对吞吐率。这里相对吞吐率定义为在相同条件下, 采用均衡流量的能量度量方法与采用最小跳数度量方法所得到的最终网络吞吐量的比值。

图 3 中 3 条曲线分别为网络中节点数为 20, 30, 40 时得到的结果。从图中可以看出, 20 个节点时相对吞吐率最大, 即均衡流量的能量度量方法对最小跳数度量方法性能的提高最明显; 随着节点数的增加, 相对吞吐率逐渐降低。这主要是由于串音的存在, 随着网络中节点密度的增加, 当某个节点发送数据时, 在其发送范围内将有更多节点接收并处理无用的分组, 而串音情况下节点消耗的能量与接收状态相同, 因此非当前路径上的节点也要消耗大量的能量。

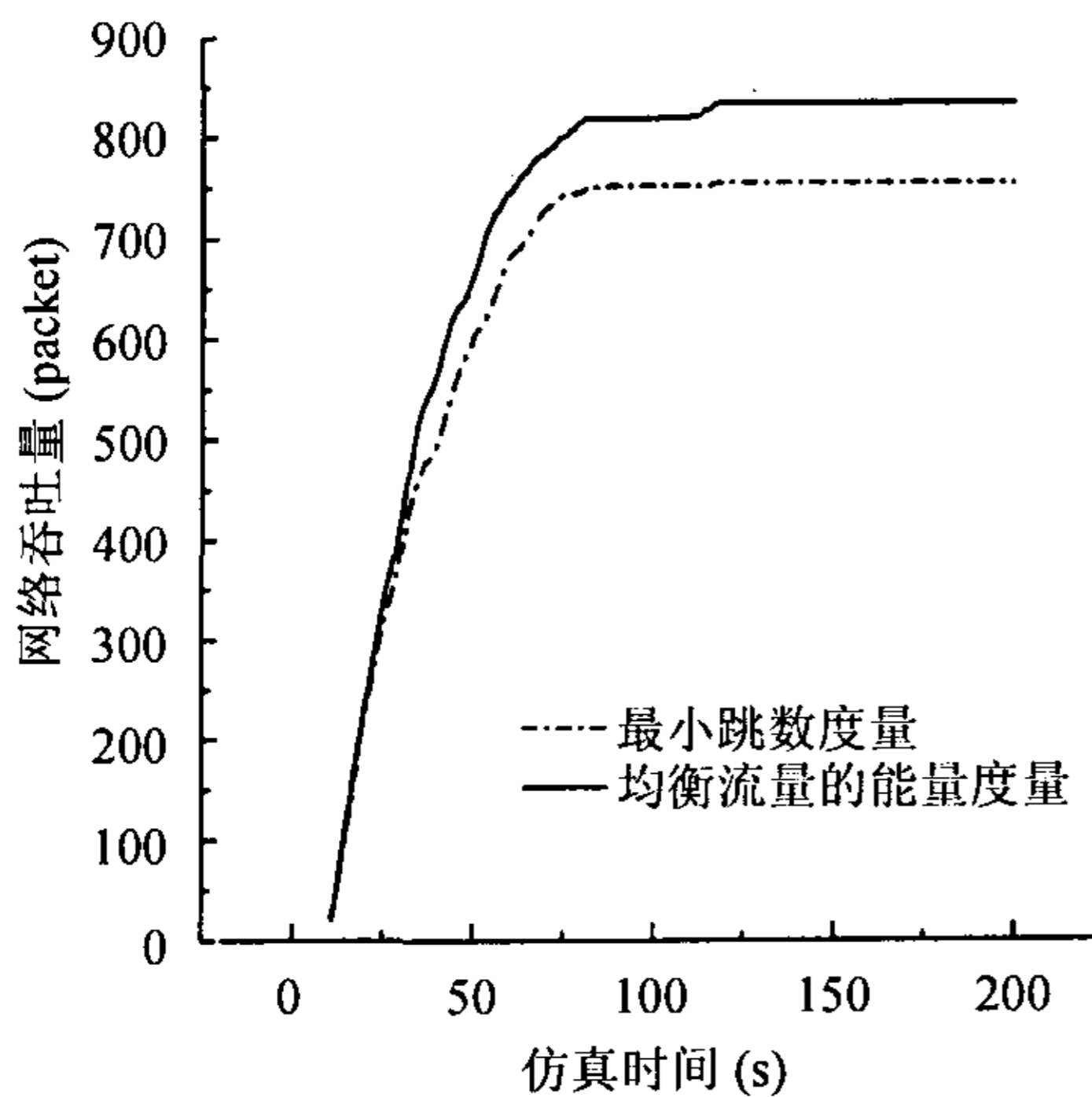


图 2 改进算法对网络吞吐量的提高

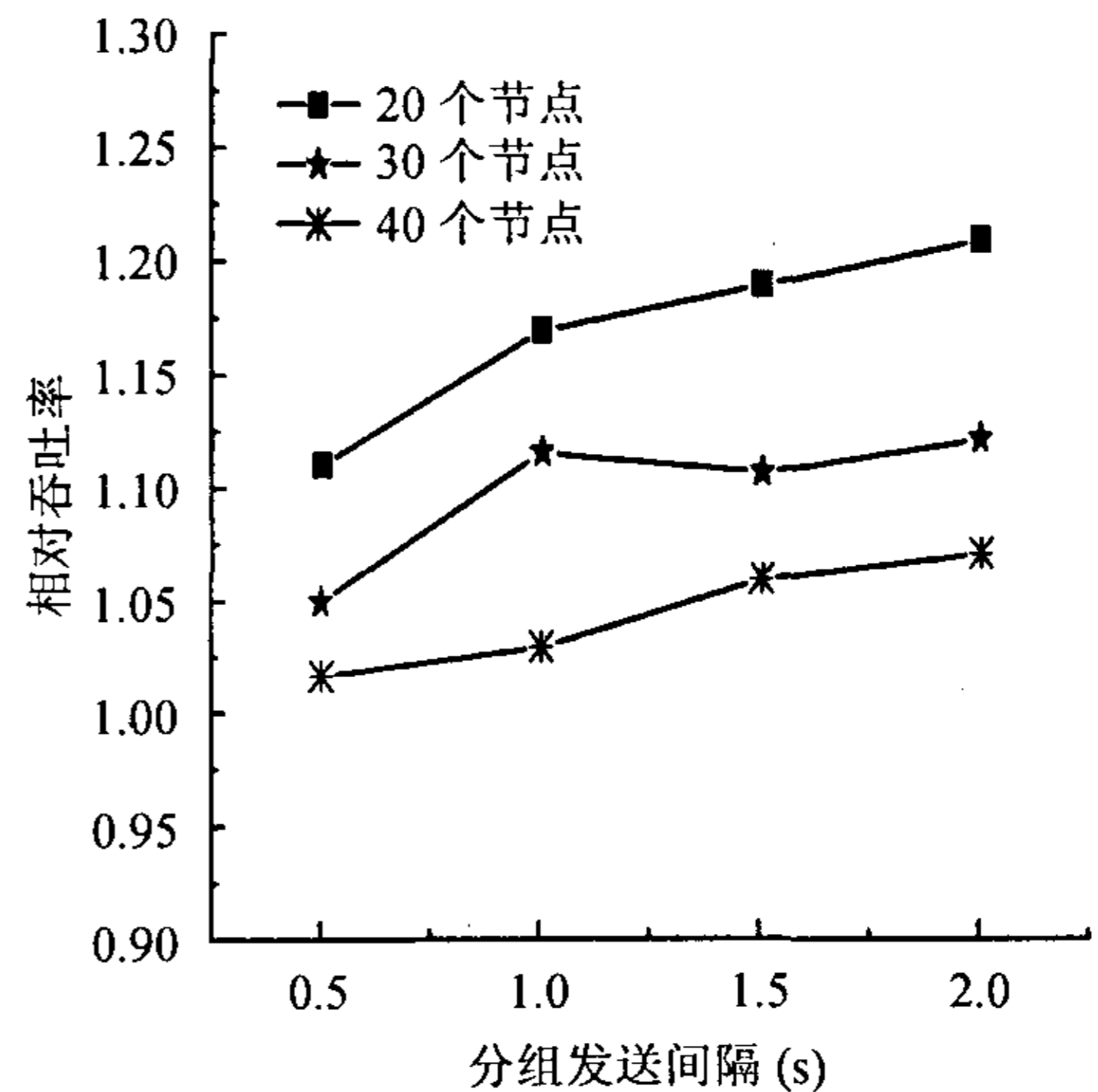


图 3 不同节点数条件下的相对吞吐率

图 4 和图 5 分别为节点数为 20 和 40 时, 不同节点平均运动速度对相对吞吐率的影响。节点数为 20 时, 运动速度为 20 m/s 时的性能优于 5 m/s 时的性能, 其原因分析如下。当网络是静止时, 即节点运动速度为 0 时, 只要每个节点的总能量相同, 采用两种度量得到的最终吞吐

量是相同的。因为在网络的拓扑结构相同时，最终吞吐量只与节点的总能量和发送每个分组所消耗的能量有关，而与节点能量的消耗顺序没有关系。而当网络的拓扑结构动态变化时，网络中的路径数，以及路径的长短，与网络中的可用节点数有关。采用均衡流量的能量度量，避免了部分节点过早地耗尽能量，延长了节点的存在时间，增加了路径数。而网络中的路径越多，就越有可能存在比较短的、能量消耗比较小的路径，从而可以更高效地传输分组。因此，网络拓扑结构变化较快时，更能体现采用均衡流量的能量度量的优越性。而在图 5 中，不同速度下的性能相差不大，这是因为在网络中节点数较多时 (40 个节点)，如图 3 中的结论，采用两种度量的性能相差不大。

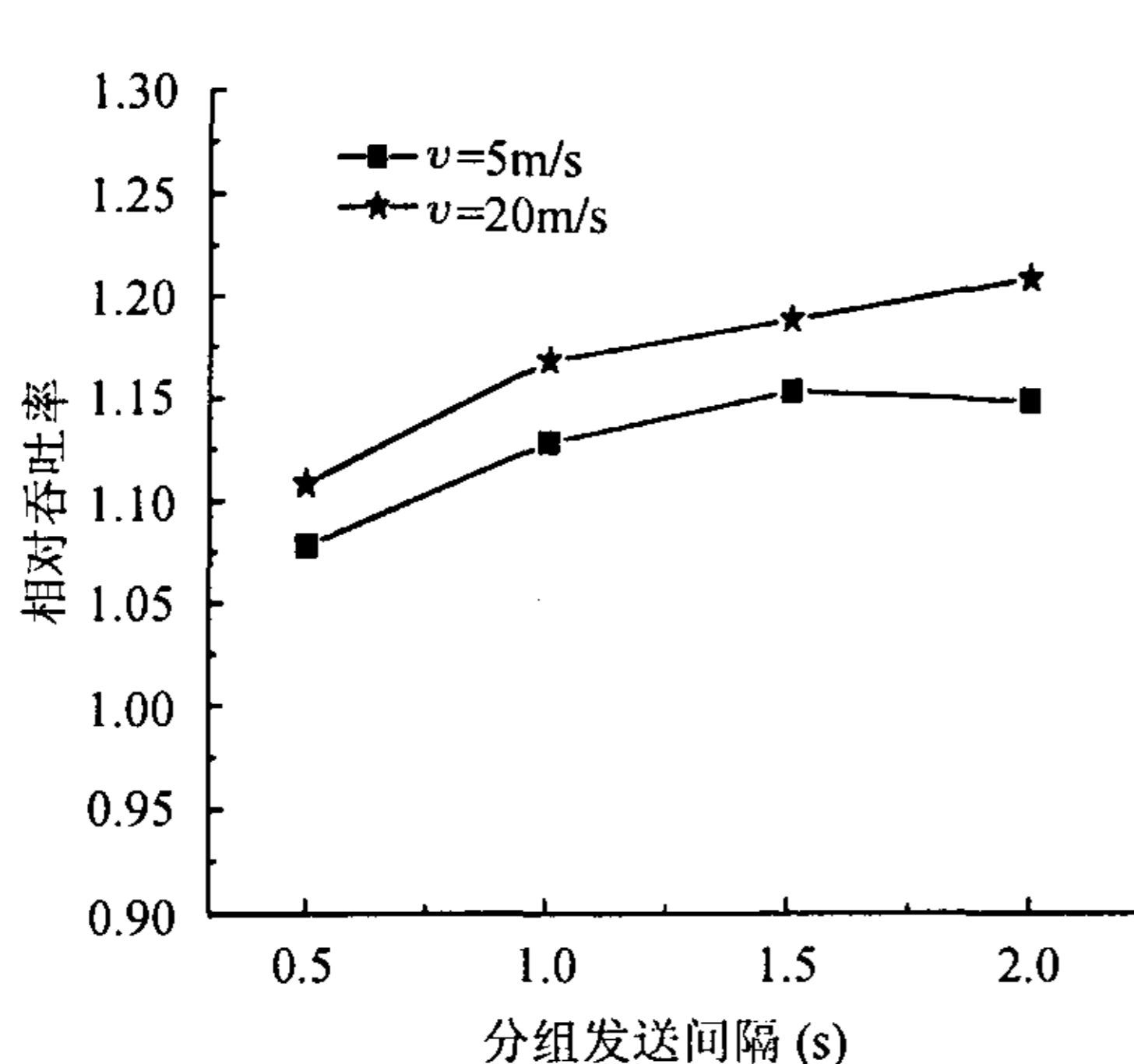


图 4 节点运动速度对相对吞吐率的影响 (20 个节点)

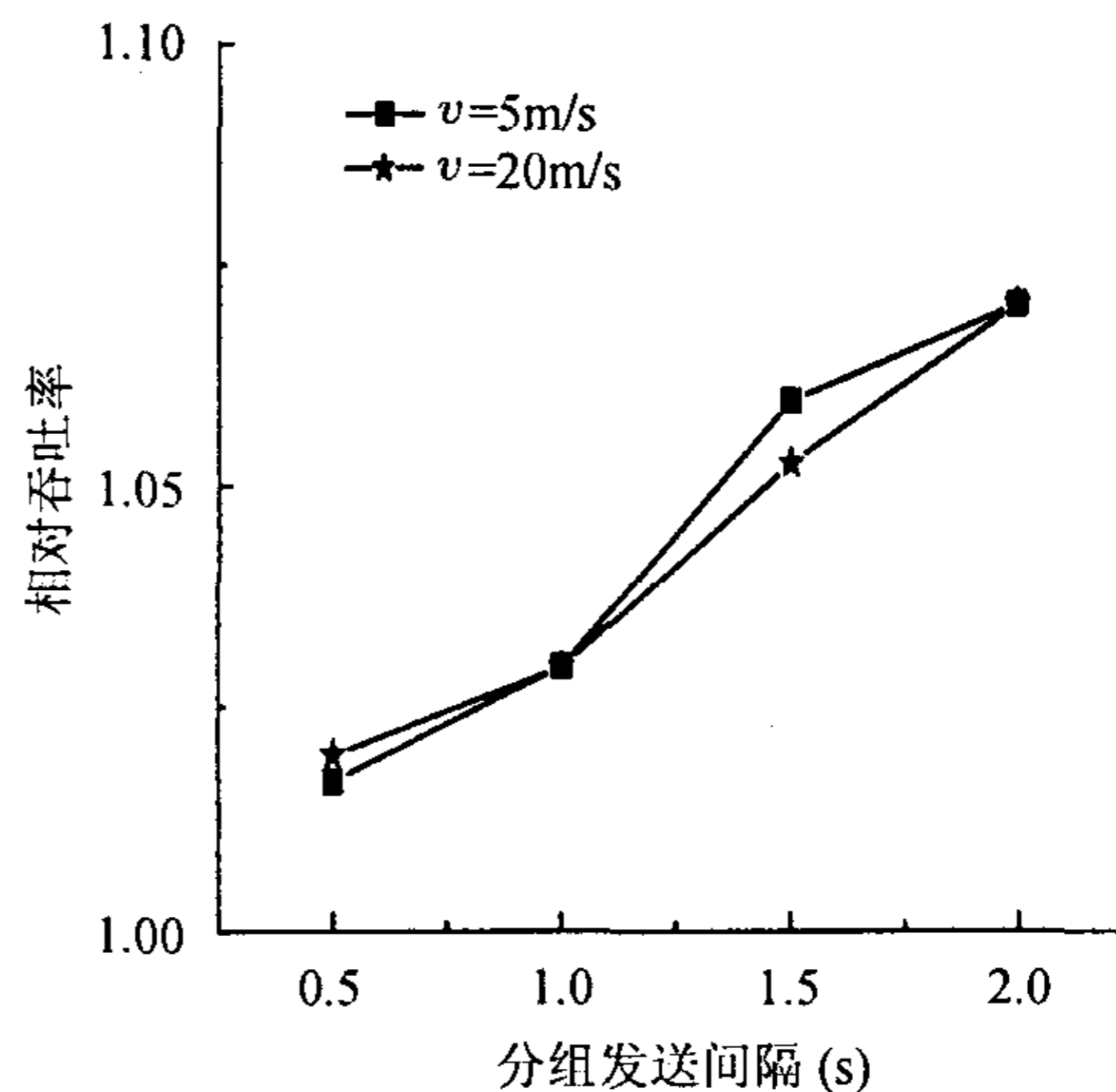


图 5 节点运动速度对相对吞吐率的影响 (40 个节点)

5 结论

本文提出了一种均衡流量的能量路由度量，仿真结果表明对于节点能量受限的 Ad hoc 网络采用该度量可以使得网络中节点的能量被更均匀、合理地利用，同时也均衡了网络的流量，使得网络的吞吐量得到提高。但同时我们也注意到在相同的网络大小范围内，由于串音的存在，随着节点数的增加，吞吐量的提高率有所下降。针对这一现象，我们认为如果要大幅度地提高网络的吞吐量，增加网络的能量效率，在路由层采用能量度量的同时，链路层需要采用可以使得节点处于休眠状态的链路层协议。

参 考 文 献

- [1] Corson S, Macker J. RFC 2501: Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. January 1999.
- [2] Ephremides A. Energy concerns in wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(4): 48-59.
- [3] Perkins C, Royer E, Das S. Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) routing. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-08.txt>, March 2001, IETF Internet Draft.
- [4] Feeny L, Nilsson M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an Ad hoc networking environment. Proc. 20th IEEE INFOCOM, Anchorage, AK, 2001: 1548-1557.
- [5] Zheng Rong, Kravets R. On-demand power management for Ad hoc networks. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, San Francisco, April 2003: 481-491.

- [6] IEEE, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specification, IEEE standard, 802.11-1997, 1997.
- [7] Singh S, Woo M, Raghavendra C. Power-aware routing in mobile Ad hoc networks. Proc. Conf. Mobile Computing, MobiCom, Dallas, TX, 1998: 181-190.
- [8] Stojmenovic I, Lin Xu. Power-aware localized routing in wireless networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 12(11): 1122-1133.
- [9] Juan-Carlos Cano, Donkyun Kim. Investigating performance of power-aware routing protocols for mobile Ad hoc networks. Proc. of IEEE/ACM MASCOTS Workshop (Mobility and Wireless Access Workshop) 2002, Fort Worth, Texas, October 11-16, 2002: 80-86.
- [10] Bergamo P, Giovanardi A, Travasoni A, *et al.*. Distributed Power Control for Energy Efficient Routing in Ad Hoc Networks. Accepted by ACM/Kluwer WINET, 10(1), 2004.
- [11] Yu Xutao, Zhang Zaichen, Bi Guangguo. An improvement for Ad hoc on-demand routing protocol. The 14Th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Beijing, September 2003: 1360-1364.
- [12] Broch J, Maltz D, Johnson D, Hu Y, Jetcheva J. A performance comparison of multi-hop wireless Ad hoc network routing protocols. Proc. of MOBICOM '98, Dallas, TX, October 1998: 85-97.

余旭涛: 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为无线网络技术.

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.

张在琛: 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为超宽带无线通信技术、移动通信系统、互联网技术.