

基于自相似业务的移动 Ad hoc 网络路由算法研究

谭巍 沙学军 徐玉滨

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要: 该文分析了移动 Ad hoc 网络中普遍存在但被忽视的自相似业务的路由和排队性能, 提出了基于网络规划模型的多径备份路由优化功率(MBOP)算法。该算法利用多路径和备份路由, 并对网络的发射功率进行优化, 适用于网络结构动态变化的移动无线自组织网络。仿真结果表明, 该算法可以显著改善节点的排队性能, 提高网络的吞吐量改进时延性能。

关键词: 移动 Ad hoc 网络; 自相似; 网络规划模型; 多径备份路由优化功率(MBOP)算法

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1475-05

Routing Algorithm Based on Self-similar Traffic in Mobile Ad hoc Network

Tan Wei Sha Xue-jun Xu Yu-bin

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper analyses routing and queuing performance for self-similar traffic in mobile Ad hoc network which is ubiquity but neglected. A Multi-path Backup Optimized Power (MBOP) algorithm is presented based on network programming model, which exerts multi-path backup routing and optimizes the total transmission power. This algorithm is suitable for structure-changed mobile Ad Hoc network. The simulation result shows that the new algorithm can increase the throughput of network and improve delay.

Key words: Mobile Ad hoc network; Self-similar; Network programming model; Multi-path Backup Optimized Power (MBOP) algorithm

1 引言

近年来, 通过对 LAN, WAN, CDPD^[1-3] 等网络的精确测量与统计分析, 发现分组网络中的真实业务量的分布在具有统计上的自相似性。自相似性反映了业务量在很大范围的时间标度上表现出相似的突发性。这与传统的泊松过程业务模型具有很大的不同, 对网络分析和设计有很大的影响。目前, 针对自相似业务的具体分析和优化主要集中在有线网络, 而对移动 Ad hoc 网络研究很少。移动 Ad hoc 网络 (Mobile Ad hoc Network, MANET) 是指由若干带有无线收发信机的节点构成的一个无中心的、多跳的、自组织的对等式通信网络。它采用分布式控制, 网中的节点同时具有主机和路由器的功能; 可以不依赖预先存在的网络基础设施而快速展开, 自适应组成网络。MANET 具有传统网络和蜂窝网络不可比拟的优点, 网络具有整体的移动性、很强的容错性和鲁棒性。文献[4, 5]通过实测证实了 MANET 业务也具有自相似特性, 并给出了公式证明; 文献[6, 7]通过仿真分析了自相似业务对 MANET 的影响, 其结果和有线网络类似。可见, 上述工作只是验证了 MANET 中业务自相似的特性, 进行了定性分析, 并没有针对 MANET 的路由及排队性

能进行深入研究和优化。本文在自相似通信模型下, 通过仿真和分析发现, 自相似业务导致排队性能变差, 网络时延和分组丢失概率恶化。基于上述分析, 提出了采用多路径备份功率优化路由的算法, 该算法利用多路径备份路由, 减小缓存中排队时延和丢包率, 同时对网络的发射功率进行优化, 以进一步改善网络性能。仿真结果表明, 该算法可以提高网络性能, 降低自相似业务对网络的影响。

2 自相似业务与排队性能

2.1 自相似业务

传统网络业务的建模和分析使用的是无记忆的马尔可夫模型, 而实验的测量数据表明, 实际的网络业务流在很长的时间范围内都具有相似的突发性。自相似特性描述的是网络中离散的数据报文序列在时间尺度上具有统计特性相似的特点。

自相似随机过程的一种常见定义是基于连续时间的直接尺度变换, 即一个随机过程 $x(t)$ 在统计上具有参数为 H ($0.5 \leq H \leq 1$) 的自相似性, 如果对于任意实数 $a > 0$, 随机过程 $a^{-H}x(at)$ 与 $x(t)$ 具有相同的统计特性, 即

$$(1) \text{均值 } E[x(t)] = E[x(at)]/a^H;$$

$$(2) \text{方差 } \text{Var}[x(t)] = \text{Var}[x(at)]/a^{2H};$$

$$(3) \text{自相关 } R_x(t, s) = R_x(at, as)/a^{2H};$$

其中参数 H 称为 Hurst 参数, 又称自相似参数, 是自相似程度的一个重要度量, 是描述自相似性的唯一参数。 H 的取值范围为 $[0.5, 1]$, $H = 0.5$ 表示没有自相似性, H 的值越接近于 1, 过程的自相似性越高。实际上, 许多随机过程是定义在离散时间上的点过程, 例如, 数据传输的分析要涉及到平稳时间序列。下面是一个平稳时间序列的自相似定义。

2.2 排队性能

针对自相似业务的分析一般采用非马尔科夫过程的排队模型, 如 $G/D/1$, 即只有一个服务装置而且服务时间为定值, 队列长度无限。然而, 在 MANET 中每个节点的队列长度是有限的, 如果采用队列长度无限的排队模拟, 这将影响理论分析和实际应用。下面给出有限队列长度的 $G/D/1$ 排队模型。

设离散输入流序列为 $\{b_t, t = 1, 2, \dots\}$, b_{t+1} 表示时间段 $[t, t+1)$ 内到达的顾客数, 令 q_t 表示时刻 t 系统内剩余的顾客数。若服务装置具有固定服务速率 C , 则存在下列 Lindley 递归式:

$$q_0 = q, q_{t+1} = [q_t + b_{t+1} - C]^+ \quad (1)$$

其中 $[\dots]^+$ 表示序列最大取值, 定义随机变量 $S_0 = 0, S_j = \sum_{i=1}^j (b_i - C)$ 。

假设 $\{b_t\}$ 是平稳遍历的随机序列, 且 $E[b_t] < C$ 。在上述条件下存在关系式:

$$q_t = \max \left\{ q + S_t, \sup_{j=0,1,\dots,t-1} S_j \right\} \quad (2)$$

而且当 $t \rightarrow \infty$ 时趋于与初始状态 q_0 无关的平衡分布 q_∞ , 其中 $q_\infty = \sup_{j=0,1,\dots,t-1} S_j$ 。

假设队列长度为 L , 对 Lindley 递归式做以下修改: $q_0 = q, q_{t+1} = \min \{ [q_t + b_{t+1} - C]^+, L \}$ 。当队列内顾客总数大于 L 时将多余的抛弃。

图 1 给出了不同业务模型情况下, 分组丢失概率 (Probability of Packet Loss, PPL) 随队列长度的变化情况, H 代表 Hurst 系数, 它的取值范围是 $[0.5, 1]$ 。可以看出, 当缓存较小时, 对于不同的 Hurst 系数, 分组丢失概率差别不大。随着缓存的增大, 分组丢失概率的差别也变大。Hurst 系数越大, 即自相似程度越高。该结论反映了自相似业务量需要更大的缓存队列长度, 当自相似程度较高时, 缓存队列长度的增加对分组丢失概率改善不大, 应该重点考虑协议的优化, 缓存队列长度为次要因素。图 2 给出了不同业务下吞吐量的情况, 随着暂停时间的增加, 网络的拓扑结构更加稳定, 吞吐量先上升然后渐渐趋于稳定。自相似业务的吞吐量要小于泊松业务, 这是因为业务的自相似特性使节点的排队性能恶化, 节点的队列长度更加的不均匀, 加大了队列溢出包丢失路由不可用的概率, 加重了网络拥塞的程度。

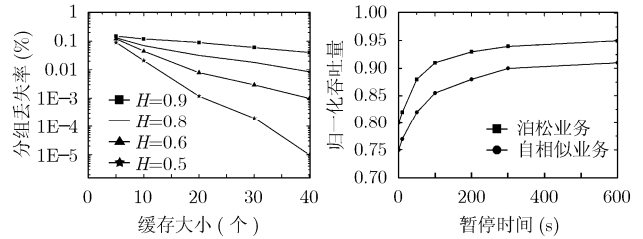


图 1 分组丢失率随缓存的变化

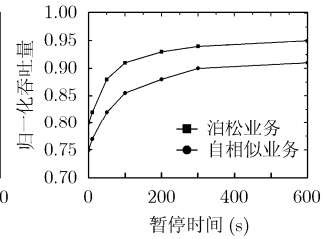


图 2 不同业务下的吞吐量

无线通信的移动 Ad hoc 网络中各节点计算能力和资源有限, 加大缓存无疑消耗了更多的能量减少了网络的生存时间, 而且对于网络性能的提升影响不大。所以需要进一步研究业务在各节点队列中分布的情况, 本文采用反应式 AODV 路由协议默认队列长度 50 个包长进行研究。图 3 分别给出了自相似业务和泊松业务在不同长度区间的节点数量, 区间分别是 $[0, 10)$, $[10, 20)$, $[20, 30)$, $[30, 40)$ 和 $[40, 50]$ 。对于泊松业务, 节点的队列长度主要集中在 20 到 40 范围内; 对于自相似业务, 节点的队列长度主要分布在 $[10, 20)$ 和 $[40, 50]$ 内。可见自相似业务使得节点队列长度值偏大或者偏小, 过大会造成队列溢出加重网络拥塞, 过小则浪费网络资源不利于优化网络性能。如果节点减小发射功率, 可以直接通信的节点数也将减少, 队列里缓存的包也将减少。图 4 给出了采用功率控制后不同业务下节点队列长度的分布情况, 对于泊松业务变化不大, 而对于自相似业务节点的队列变的比较平均。可见采用泊松业务模型分析网络性能不能反映出队列的特性, 引入功率控制可以降低自相似业务对网络性能的影响。

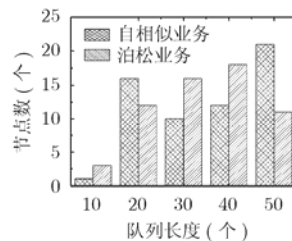


图 3 不同业务下节点队列长度分布

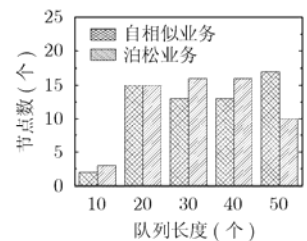


图 4 采用功率控制后队列长度分布

基于上述分析, 可见路由协议应该具有快速的自修复和备份能力, 并尽量减少重新建立的过程, 下文给出了基于网络规划模型的路由算法, 该算法采用多路径备份路由, 同时对网络发射功率进行优化。

3 网络规划模型和路由算法

3.1 网络规划模型

本文用无自环的无向图 $G(V, E)$ 来表示网络结构, $V = \{v_1, \dots, v_n\}$, $v \in V$ 代表节点集合, $E = \{e_1, \dots, e_m\} \subseteq V \times V$ 代表链路集合。对于每一个节点定义 $p(v) \in \mathbb{R}$, $p(v)$

为节点 v 的功率级, $d(v)$ 是节点 v 的发射半径, 其所能到达的范围由功率级 $p(v)$ 决定, 我们认为 $d(v) \propto p(v)$ 。 E 由功率级决定, 假如节点 v 以功率级 α 发射信号所能到达的邻居节点集为 $N(\alpha, v)$, 该集合含有 $\delta(\alpha, v) = |N(\alpha, v)|$ 元素, 显然固定的 $\delta(\alpha, v)$ 由发射半径 $d(v)$ 决定, 因此 $\delta(\alpha, v)$ 也由节点的功率级 $p(v)$ 决定。可知如果网络中节点数是有限个数, 那么功率级的个数也是有限的。假设网络中都为同类节点, 那么能够相互通信的每一对节点之间的功率级是一样的, 有限数量的功率级就可以满足由 n 节点组成的系统。

我们的目标是要找到从源节点到目的节点的最小功率级, 假设节点 n 不同配置的最大功率级存在, 并设为 l_1, \dots, l_{n_i} 。假设网络中有限组数据 $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ 要传送, 并且每个数据从源节点 s_i 到目的节点 d_i , 那么我们要使网络中总的功率级最小。

通过上面假设, 可以得出一个整数规划模型, Ad hoc 网络用 $G(V, E)$ 来表示, 每个节点的功率级集合为 $L = \{l_1, \dots, l_{n_i}\}$, p_l 为能量级 l 的传输半径, k 组数据从源节点 s_i 到目的节点 d_i , $i \in \{1, \dots, k\}$ 。

定义二元变量 x_{il} 表示节点 i 的功率级为 l :

$$x_{il} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 在第 } l \text{ 个功率级} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

那么, 网络中总的功率级最小可以写成, $\min \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^L l x_{il}$ 。

上述问题是一个 NP 完备问题, 很难求得精确解, 类似的一般功率控制协议 PCR^[8, 9]采用数据广播的方式得到满意解, 但是网络负载相当严重, 复杂度相当于 $O(n^3)$, 其中 n 为节点数。这对于资源非常宝贵的无线网络来说是不可以接受的, 为此我们提出路由算法 MBOP, 利用按需路由协议路由查找的过程来完成功率优化。

3.2 路由算法

多径备份路由优化功率算法 MBOP(Multi-path Backup Optimized Power algorithm), 是基于 AODV 提出的, MBOP 工作过程由路由发现、路由维护和功率优化 3 部分组成^[10]。MBOP 引入多条路由备份, 并采用功率控制, 不同于单路由无备份无功率控制的 AODV。MBOP 只需把 RREQ(Route REQuest)信息帧结构中原来的预留位用来表示功率控制和链路状态值, 见图 5, 而不增加任何负载开销。

信息类型	标志位	功控	链路状态值	跳数
RREQ 的 ID 号				
目的节点 IP 地址				
目的节点序列号				
源节点 IP 地址				
源节点序列号				

图 5 RREQ 信息帧结构

路由发现和路由维护过程中, AODV 依靠邻居节点逐跳维护整条路由, 当链路断开时, 发送出错报文, 不可达节点删除该路由, 源节点收到出错信息后重新启动路由发现过程。采用多路径路由可以避免这个问题, MBOP 采用了链路状态值, 链路状态值表示从源节点到目的节点的路由上的中间节点状态。在 RREQ 广播的过程每个节点的路由表里都保存了对源节点的跳数, 节点的链路状态值根据跳数计算, 共有 4 个值。按优先级从高到低排列为: 3, 2, 1, 0。分别代表: 到目的节点的最短路径, 非最短路径前向节点跳数值较小和较大, 初始状态 4 种情况。

如果中间节点跳数小于该节点的跳数, 链路状态值为 3, 则该节点的链路状态值设为 3; 如果中间节点跳数大于该节点的跳数, 链路状态值为 2, 则该节点链路状态值设为 2; 如果中间节点跳数小于该节点的跳数, 链路状态值为 2 或 1, 则链路状态值设为 1; 其他情况该节点的链路状态值设为 0。

路由建立以后, 每个节点路由表里都存有相邻节点和其链路状态值, 其中含有两个及两个以上节点的成为备份节点。如果有数据包需要转发时, 节点从路由表里选取链路优先级最高的节点作为前向节点, 这样可以保证到达目的节点的路径最短。图 6 给出了节点收到 RREQ 的流程图。与 AODV 的路由维护过程不同, MBOP 引入了备份节点机制, 如果链路断开, 路由出错报文 RRER(Route Error)不必沿途发送至源节点再重新启动路由发现过程, RRER 经过备份节点时, 备份节点从路由表里查看其邻居节点的跳数和链路状态值, 判断是否有可用的到目的节点的路由, 根据链路状态值选取最短路径建立路由。

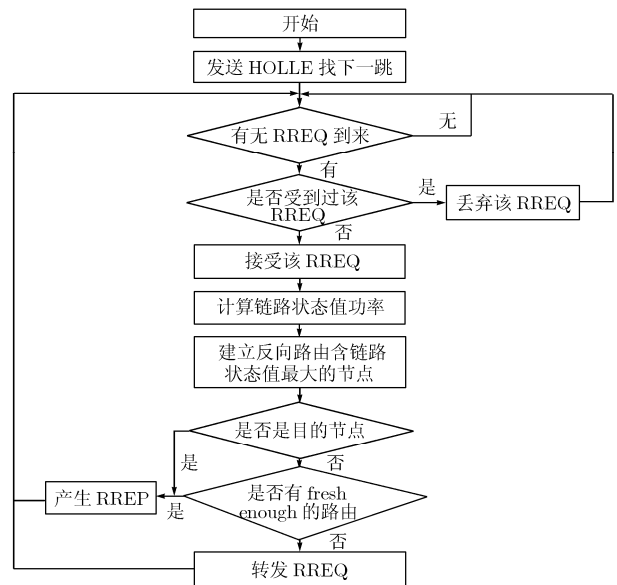


图 6 节点收到 RREQ 流程图

功率优化。假设允许的最大发射功率为 P_T , 源节点以 P_T 发送业务, 并把发射功率装入 RREQ 的功率标志位。当中

间节点收到 RREQ 读取前向节点的发射功率, 按照公式 $P_T^* = P_{TX} - P_{RX} + S_R + Q$ 调整发射功率 P_T^* 。其中 P_{TX} 是节点的发射功率, P_{RX} 是节点接收功率的估计值, S_R 是节点发送业务的最低门限值, Q 是节点功率调节边界, 增加最小单位为 $P_T/n \in L$, n 是该节点的邻居节点数, 其值可在路由表里查到。每个节点在转发 RREQ 的同时都调整本身的发射功率。同理, 通过路由应答 RREP(Route Reply)的功率标志位, 每个节点确定 Q 的值, 当路由发现过程完成以后, 每个节点的发射功率也就确定了。如果节点移动导致链路断开, 备份节点首先启动路由表里的备份路由, 如果所有路由都无效, 备份节点以最小单位为幅度增加 Q 直到找到可用路由。

4 仿真与分析

本文采用 Berkeley 实验室研究开发的 NS-2.26 网络模拟器, 全向天线, Two Ray 地面反射空间传播模型, 发射功率在传播路径的损耗正比于传输距离的 4 次方, 以协议 IEEE 802.11 分布式协调作为媒体访问方式。节点随机分布在 $1200\text{m} \times 300\text{m}$ 矩形区域内。信道带宽 2Mbps, 仿真时间 600s。采用 60 个节点 15 个连接, 节点的移动速度为 2m/s, 流量模型采用恒定的 CBR 字节流, 数据报文大小分别为 512byte, 以恒定的速率 4kb/s 产生数据; 自相似业务的分组长度和速率与泊松过程相同, 通过调节形状参数 α 来改变 H 的值。采用 Random Way-point 运动模型, 节点停留时间分别为 0,10, 50,100,200,300,600s, 停留时间越长表明网络拓扑结构变化越慢, 仿真时间 600 s。

图 7 和图 8 给出了泊松业务下节点在不同的停留时间时延和归一化吞吐量的变化。可以看出当节点停留时间越长网络越稳定, 吞吐量趋于稳定, 时延平稳减小。功率控制协议 PCR 由于要频繁交换功率信息, 相对于 AODV 处理分组时, 需要更大的时延, 网络性能差于 AODV。MBOP 备份节点的路由表中有多条路径, 在链路切换和断开时维护和重建路由, 并且每个节点路由表都存有邻居节点和链路状态值, 这样尽可能地避免了路由重寻而在局部发现到达目的节点的路由, 因此抵消了因为功率调节造成的时延。从图中可以看出 MBOP 虽然采用了功率控制机制, 但由于 MBOP 具有多路径备份节点功能, 时延和 AODV 接近, 远小于 PCR。由于引入功率控制机制, PCR 覆盖半径小于 AODV, 使得更多节点可以进行频率复用, 归一化吞吐量略优于 AODV。MBOP 在引入功率控制的基础上, 通过节点链路信息和备份节点机制, 加强了路由的稳定性, 性能优于 PCR, 稳定时归一化吞吐率达到 96%。图 9 和图 10 给出了自相似业务下节点在不同的停留时间时延和归一化吞吐量的变化。可以看出当节点停留时间越长网络越稳定, 吞吐量趋于稳定, 时延平稳减小, 只是吞吐量和时延性能都差于泊松业务时的情况。比较吞吐量和时延性能可以发现, MBOP 相比 AODV 提升了 7% 的吞吐量, 减小了 11ms 的时延。可见, MBOP 更适

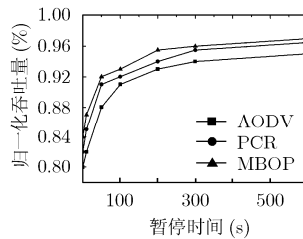


图7 不同协议下泊松业务的吞吐量

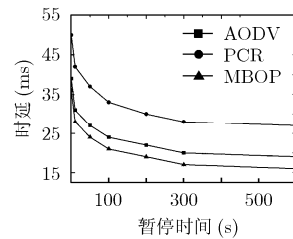


图8 不同协议下泊松业务的时延

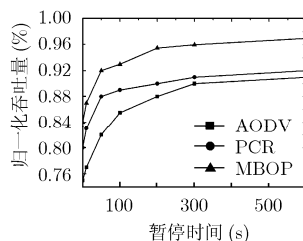


图9 不同协议下自相似业务的吞吐量

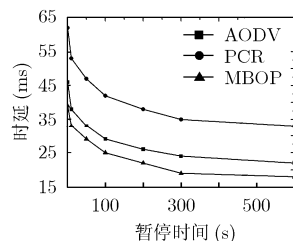


图10 不同协议下自相似业务的时延

合自相似业务。

5 结束语

自相似特性广泛存在实际网络业务中, 移动 Ad hoc 网络业务也存在自相似特性。本文采用更接近实际情况的有限队列 G/D/1 排队模型, 对网络的排队性能进行了分析。结果表明自相似业务对于移动 Ad hoc 网络的影响尤为明显, 网络的时延和分组丢失率等性能恶化, 节点需要更大的缓存。针对此情况本文首次提出了基于网络规划模型的多条路径采用备份路由的优化功率路由算法, 多径备份路由可以快速找到新的替代路由, 提高缓存的利用率, 功率优化可以提高网络信道复用率。仿真表明, 该算法尤其对于自相似业务, 可以提高改善分组丢失概率, 提高 7% 的网络吞吐量, 减少 11ms 的网络时延。

参考文献

- [1] Leland W E. On the self-similar nature of ethernet traffic. *IEEE ACM Trans. Networking*, 1994, 2(1): 1-15.
- [2] Paxson V and Floyd F. Wide area traffic: the failure of poisson modeling. *IEEE Trans. on Networking*, 1995, 3(3): 226-244.
- [3] Jiang M and Nikolic M. Impact of the self-similarity on wireless data network performance communications. 2001 IEEE International Conference on Communications, Helsinki, Finland, ICC 2001, Vol.2: 477-481.
- [4] Yin Shouyi and Lin Xiaokang. Traffic self-similarity in mobile Ad hoc networks. 2005 IEEE International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, Dubai UAE, WOCN2005: 285-289.

- [5] Liang Qilian. Ad hoc wireless network traffic-self-similarity and forecasting. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(7): 297-299.
- [6] Giovanardi A and Mazzini G. Impact of chaotic self-similar and Poisson traffics on WLAN token passing protocols. 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Geneva, Switzerland, ISCAS 2000: 383-386.
- [7] Kulkarni S S. Statistically multiplexed adaptive operation of Ad hoc networks with self-similar traffic. *Wireless Communications and Systems*, 1999: 19.1-19.5.
- [8] Bergamo P, Maniezzo D, Giovanardi A, Mazzini G, and Zorzi M. Distributed power control for power-ware energy-efficient routing in Ad hoc networks. *European Wireless Conference 2002*, Florence, Italy, EW2002: 237-243.
- [9] Doshi S, Bhandare S T, and X Brown. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless Ad hoc network. *Mobile Computing and Communications Review*, 2002, 6(2): 50-66.
- [10] 徐玉滨, 谭巍. 宽带多径备份路由优化功率算法的研究. *通信学报*, 2005, 26(11): 76-81.
- [11] Xu Yubin and Tan Wei. A Multi-path Backup Optimized Power Algorithm for wideband networks. *Communication Letters*, 2005, 26(11): 76-81.
- 谭 巍: 男, 1980年生, 博士生, 从事无线自组织网络和超宽带等方面的研究.
- 沙学军: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要从事超宽带和无线自组织网络等方面的研究.
- 徐玉滨: 男, 1954年生, 教授, 博士生导师, 主要从事移动通信、多媒体通信技术等方面的研究.