

文章编号:1001-9081(2010)06-1455-04

基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制

陈伟,刘 峤,靳 京,秦志光

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 610054)

(chenwei@uestc.edu.cn)

摘 要:机会路由传输协调机制组织和协调候选路由节点间的数据包传输,通过减少端到端累计数据包传输次数提高机会路由端到端吞吐量。现有基于 batch map 的批量分段式传输协调机制的协调成功率随批量传输的数据包数量的振荡而振荡。针对此问题,提出了基于数据包序列号集合的批量连续式传输协调机制,通过维持每轮批量传输的数据包数量确保传输协调成功率,提高机会路由端到端吞吐量。实验结果显示,基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制能平均提高约 18% 的端到端吞吐量。

关键词:无线路由;机会路由;数据包序列号;传输协调;多跳无线网络

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Packet sequence set-based transmission coordination mechanism for opportunistic routing

CHEN Wei, LIU Qiao, JIN Jing, QIN Zhi-guang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: Transmission Coordination Mechanisms (TCM) for Opportunistic Routing (OR) is used to arrange and coordinate transmissions of OR, and improves end-to-end throughput by reducing the total number of packet transmissions for delivering packets to destination. The existing paradigms are based on batch map partition communication session into packet segments, and transmit each segment in batch mode sequentially. However, the successful rate of transmission coordination is oscillated due to the oscillation of the number of packets transmitted in batch. A packet sequence set-based TCM for OR transmitting packets in continuous batch mode was proposed. The proposed TCM can keep the high successful rate of transmission coordination by maintaining the number of packets transmitted in batch, and therefore improve end-to-end throughput of OR. The simulation results show that the average end-to-end throughput gain of the proposed packet sequence set-based TCM is about 18% over the existing batch map-based TCM.

Key words: wireless routing; opportunistic routing; packet sequence; transmission coordination; multi-hop wireless network

0 引言

由于无线链路不可靠以及无线传输干扰等特性,多跳无线网络的路由一直是个极具挑战的课题^[1]。机会路由利用多跳无线网络的空间差异性以及无线传输的广播性克服链路不可靠和传输干扰等特性对端到端数据传输的影响^[2-10]。

传输协调机制组织和协调无线节点的机会路由传输,减少或避免不同节点对相同数据包的冗余转发,是机会路由研究的一个重要问题^[4,8]。本文分析现有机会路由传输协调机制,提出一种基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制,以数据包序列号集合为载体组织和协调机会路由数据包传输。通过确保每轮批量传输的数据包数量,基于数据包序列号集合的传输协调机制能始终维持较高的机会路由传输协调成功率,最大限度减少冗余的数据包转发。

1 机会路由及现有传输协调机制

1.1 机会路由原理

不同于传统最佳路径路由技术采用事先确定的最佳路径

传输数据包,机会路由在数据包传输后机会地从接收数据包的无线节点中确定数据包的最佳下一跳路由,由该最佳下一跳路由执行对数据包的转发,同时抑制其他接受数据包的无线节点转发数据包,避免冗余数据包转发^[9]。为提高传输效率,机会路由事先根据某种准则(如,到目的节点的距离或到目的节点的传输代价)确定一组无线节点作为候选路由节点^[1],每次数据包传输后仅从候选路由节点中确定最佳下一跳路由。这样,利用无线传输的广播特性以及空间差异性,通过冗余的潜在下一跳路由(多个候选路由节点),数据包被成功传递到下一跳路由节点(至少一个候选路由节点)的概率大大提高。同时,传输协调机制选择接收数据包且到目的节点最近或传输代价最小的候选路由节点为最佳下一跳路由,使得每次传输都将数据包传递到距离目的节点尽可能“近”的候选路由节点,从而利用多跳无线网络中传输距离长、链路质量差的链路减少端到端数据包传递所需的传输次数。这样,通过减少累计端到端数据包传输次数,使得端到端吞吐量得以提高。

收稿日期:2009-12-07;修回日期:2010-03-03。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903157);国家 863 计划项目(2009AA01Z422)。

作者简介:陈伟(1978-),男,四川温江人,讲师,博士研究生,CCF 会员,主要研究方向:无线网络路由、网络安全;刘峤(1974-),男,四川成都人,博士研究生,主要研究方向:机器学习、信息安全;靳京(1975-),男,河北邯郸人,博士研究生,主要研究方向:网络信息安全、无线传感器网络、实时嵌入式系统;秦志光(1956-),男,四川隆昌人,教授,博士生导师,主要研究方向:开放系统、中间件、信息安全。

1.2 现有传输协调机制

在候选路由节点确定并优先排序(离目的节点越近或传输代价越小的节点优先级越高)的情况下^[6],数据包传输后如何从正确接收数据包的候选路由节点中选择最佳下一跳路由使得数据包向着目的节点取得最大的进展是机会路由研究的一个重要问题。现有的机会路由方案基于“退避-侦听”的思想,利用数据包推进列表(batch map),批量地组织和协调候选路由节点的数据包传输。

源节点将通信会话成长度相同的数据包段,逐段批量地传输数据包(一段数据包全部被目的节点正确接收后才开始下一段数据包的传输)^[2]。候选路由节点按照优先级从高到低的顺序依次批量转发自己应转发的数据包。每个候选路由节点都用 batch map 捆绑记录批量传输的当前段数据包向目的节点推进的情况。batch map 是一个与当前传输数据包段中的数据包一一对应的候选路由节点 ID 列表,其中每个 ID 表示正确接收对应数据包段的候选路由节点中优先级最高的候选路由节点 ID,这样 batch map 就记录了当前段中数据包分别到达距离目的节点最近的候选路由节点的节点 ID。每个数据包都携带当前源、目的节点对的候选路由节点优先列表和其发送节点的 batch map。候选路由节点相互侦听彼此的数据包传输。根据侦听到的 batch map,候选路由节点将已经推进到更高优先候选路由节点的数据包从自己的数据包缓存中删除以避免冗余数据包转发,同时,总是用侦听到的 batch map 中更高优先候选路由节点 ID 代替自己 batch map 中对应的项,从而以 gossip 的方式将当前段数据包的捆绑推进信息向其他候选路由节点传递。这样,基于数据包推进表的机会路由传输协调机制就以 batch map 为载体,通过无线广播侦听实现候选路由节点间的分布式传输协调。

由于候选路由节点批量传输的每个数据包都携带其 batch map,因此,在候选路由节点间的无线链路质量确定的情况下,批量传输的数据包数量越大,候选路由节点间相互侦听 batch map 的概率就越高,也即相互间传输协调的成功率越高。然而,基于 batch map 的传输协调机制逐段地传输数据包,在一段数据包传输结束前,候选路由节点每轮批量传输的数据包数量逐渐减少(源、目的节点,以及所有候选路由节点按优先级顺序执行一次机会路由传输为一轮机会路由传输,由于无线传输的不可靠性,一段数据包的端到端传递通常需要源、目的节点和所有候选路由节点进行多轮机会路由),从而造成机会路由传输协调的成功率也随之降低,冗余数据包传输增多。为此,典型的机会路由协议 ExOR 在目的节点正确接收一段数据包中的 90% 后即启动下一段数据包的机会路由传输,而剩下的 10% 的数据包则以传统最佳路径路由方式进行传输^[2]。然而,这种方式并不能从根本上克服基于 batch map 的传输协调机制传输协调成功率随着通信会话的进行不断振荡的问题,而且在机会路由和传统最佳路径路由间频繁地切换也使得端到端路由更加复杂。

2 基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制

基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制用数据包序列号集合代替 batch map 组织和协调候选路由节点的机会路由数据包传输。源节点维持一个固定大小为 N 的数据包发送窗口,目的节点和所有候选路由节点都维持一个数据包序列号集合(PSS)。记录目前已经正确接收的数据包。源节点

批量发送其发送窗口中的数据包包后,目的节点和所有候选路由节点都用 PSS 记录正确接收的数据包,然后按照优先级从高到低的顺序依次获得批量传输数据包的机会。每个数据包都包含当前源目的节点对的候选路由节点优先列表以及其发送节点的 PSS。候选路由节点通过相互侦听彼此的 PSS 协调彼此的机会路由传输,即确定应该由自己转发的数据包。

当侦听到高优先候选路由节点的 PSS,低优先候选路由节点将自己接收但已经被高优先候选路由节点 PSS 记录的数据包从自己的数据包缓存中剔除,同时,将高优先候选路由节点的 PSS 合并到自己的 PSS 中,这样当所有高优先候选路由节点完成批量传输后,该低优先候选路由节点的 PSS 就包含了优先级不低于自己的候选路由节点接收的全部数据包的序列号。当接收到低优先候选路由节点的数据包,高优先候选路由节点仅接收不在自己 PSS 中的数据包,并将这些数据包的序列号加入自己的 PSS 中。源节点侦听所有候选路由节点的批量数据包传输,从自己的数据包缓存以及数据包发送窗口中剔除包含在至少一个候选路由节点 PSS 中的数据包,然后移动其发送窗口的上界以容纳新的待传输数据包。

这样,在实现通信会话的同时,基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制通过以 PSS 为载体的捆绑传输应答信息从高优先候选路由节点到低优先候选路由节点的反向 gossip 传递实现分布式机会路由传输协调,并且通过源节点发送窗口的滑动保证每轮批量传输的数据包数量,从而确保机会路由传输协调成功率。

基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制,候选路由节点的 PSS 将随着接收数据包的增多而增大,捎带捆绑应答的开销也随之增大。然而,通过增大源节点发送窗口确保候选路由节点间相互侦听 PSS 的概率近乎 100% 的前提下,候选路由节点可以在每轮批量数据包传输完成后清空其 PSS,而不影响机会路由传输协调的成功率,这样就避免了 PSS 的无限增长。

候选路由节点接收数据包的处理过程如下所示。

```

1) while 接收数据包  $P$  do
2)   获得自己的优先级  $PRI_{own}$ ;
3)   获得  $P$  发送节点的优先级  $PRI_{Pdr}$ ;
4)   if  $PRI_{Pdr} > PRI_{own}$  then //  $P$  来自高优先候选路由节点
5)     提取  $P$  携带的  $PSS_P$ ;
6)      $pkt\_buffer = pkt\_buffer - PSS_P$ ;
           // 丢弃被高优先候选路由节点记录的数据包
7)      $PSS_{own} := PSS_{own} \cup PSS_P$ ;
           // 合并高优先候选路由节点的 PSS
8)   else // 数据包来自低优先候选路由节点
9)     if  $P.Seq \notin PSS_{own}$  then //  $P$  序列号不在自己 PSS 中
10)       $P.Seq \Rightarrow PSS_{own}$ ;
11)       $buffer(P)$ ;
12)     else
13)       $discard(P)$ ; // 丢弃数据包
14)     end if
15)   end if
16) end while

```

2.1 传输协调成功率

图1阐述机会路由传输协调机制及传输协调成功率。图中多跳无线网络拓扑中源节点 S , 目的节点 D 之间有3个候选路由节点 C 、 B 和 A (按优先级从高到低的顺序排列)。源节点批量发送其发送窗口中的数据包包后,候选路由节点之间的链

路质量以及它们转发数据包的顺序已在图中标出。每个数据包都包含候选路由由节点优先列表和其发送节点的 PSS。

假设源节点批量发送其发送窗口中的数据包后, C 率先转发 n_c 个数据包, 然后 B 转发 n_b 个数据包, 那么 A 侦听 C 的 PSS 的概率是:

$$P_{ac} = 1 - (1 - p_{ac})^{n_c} (1 - (1 - (1 - p_{bc})^{n_c}) \cdot (1 - (1 - p_{ab})^{n_b}))$$

该概率就是 A 与 C 进行机会路由传输协调的成功率。这里, $(1 - (1 - p_{bc})^{n_c}) (1 - (1 - p_{ab})^{n_b})$ 是 A 通过 B 的中转间接侦听 C 的 PSS 的概率, $1 - (1 - p_{ac})^{n_c}$ 是 A 直接侦听 C 的 PSS 的概率。等式表明在链路质量确定的前提下, A 与 C 机会路由传输协调的成功率随 C 以及 B 批量传输的数据包数量的增加而增加。当批量传输的数据包数量足够大时, 候选路由由节点间的传输协调成功率逼近 1。

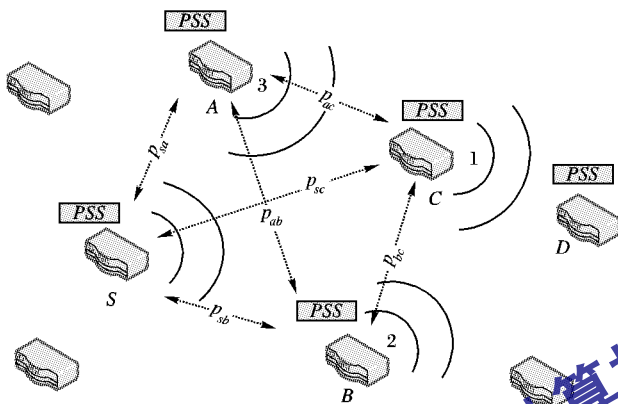


图1 机会路由传输协调示意

2.2 数据包格式

基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制的数据包格式与基于 batch map 的机会路由传输协调机制 (ExOR 机会路由方案) 的数据包格式类似, 包含以太网头部、协议版本、协议包头长度、数据包序列号、候选路由由节点优先列表, 以及代替 batch map 字段的 PSS 等字段。不同之处在于: 1) 由于基于数据包序列号集合的传输协调机制不是批量分段式的机会路由传输协调机制, 因此不需要如 ExOR 方案中 BatchID 字段的数据包段 ID 字段; 2) 随着数据包的接收和应答, 候选路由由节点的批量接收窗口的大小是不断变化的, 因此需要一个字段 PSSSz 表示批量发送其发送窗口中的数据包后的大小。图 2 为基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制数据包头格式, 数据包包头格式的更多细节, 请参考 ExOR 协议。

Ethernet Header			
Ver	HdrLen	PayloadLen	
PktNum	PSSSz	FragNum	FragSz
FwdListSize		ForwarderNum	
Forwarder List			
Packet Sequence Set			
Checksum			
Payload			

图2 数据包头格式

3 模拟实验结果与分析

本章通过 NS2^[11] 网络模拟实验对基于数据包序列号集

合的机会路由传输协调机制的性能进行分析和评估, 实验比较在机会路由协议 ExOR 中, 基于数据包序列号集合的传输协调机制与基于 batch map 的传输协调机制传输相同数量的数据包所需的累计数据包传输次数和端到端吞吐量。实验场景为 25 个无线节点随机均匀分布在 1000 m × 1000 m 的区域内所形成随机多跳无线网络拓扑。无线节点的传输范围为 250 m, 采用恒定位传输率 (Constant Bit Rate, CBR) 流量模型, 每个数据包固定负载长度为 1024 B, 传输速率为 1 Mbps。随机从该网络拓扑中的 600 (25 × 24) 对源、目的节点中选取 10 对, 分别采用基于 batch map 和基于数据包序列号集合的传输协调机制进行 10 次机会路由数据包传输实验。两种传输协调机制批量传输的数据包数量分别由数据包分段大小和源节点发送窗口大小决定, 实验中基于 batch map 的传输协调机制的数据包分段大小和基于数据包序列号集合的传输协调机制的源节点发送窗口大小都从 10 递增至 100。

图 3 显示在数据包分段 (源节点发送窗口) 大小分别为 30 和 80 时, 两种传输协调机制每轮机会路由传输的累计数据包传输次数。采用基于 batch map 的传输协调机制的机会路由传输得到的曲线呈锯齿形, 而基于数据包序列号集合的传输协调机制对应的曲线相对比较平直, 且远高于基于 batch map 的传输协调机制的曲线。图 3 表明, 相比以批量分段方式组织传输的基于 batch map 的传输协调机制, 批量连续地组织传输的基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制能始终维持较大的候选路由由节点批量传输的数据包数量, 进而确保较高的机会路由传输协调成功率。

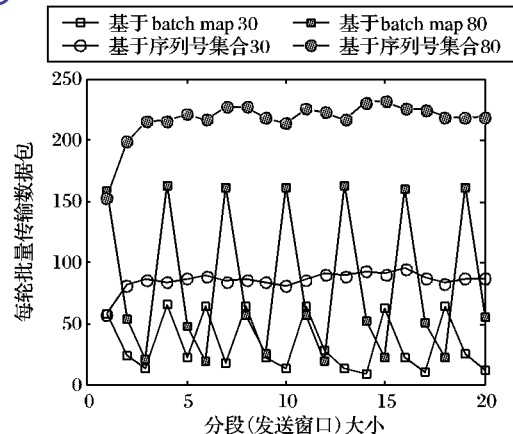


图3 每轮累计批量传输数据包数量的变化

图 4 为两种机会路由传输 10000 个数据包分别所需的累计数据包传输次数。基于数据包序列号集合的传输协调机制所需的累计数据包传输次数明显少于基于 batch map 的传输协调机制。

图 5 为两种机会路由传输协调机制的端到端吞吐量比较, 都先随着分段 (发送窗口) 大小的增加而增加, 然后逐渐下降。因为两种传输协调机制的传输协调成功率都随着分段 (发送窗口) 大小的增加而增加, 但是当分段 (发送窗口) 大小增加到一定程度, 因每个数据包携带 batch map (PSS) 而带来的传输协调开销逐渐抵消机会路由对端到端吞吐量的提升。图 5 中基于数据包序列号集合的传输协调机制的端到端吞吐量在 (源节点) 发送窗口为 50 时到达最大值, 而基于 batch map 的传输协调机制的吞吐量最大值在分段大小为 80 时取得, 且仅为基于数据包序列号集合的传输协调机制吞吐量最

大值的87.5%。

图6为基于数据包序列号集合的传输协调机制相对基于batch map的传输协调机制分别在累计数据包传输次数和端到端吞吐量上的改进。当分段(发送窗口)大小从10递增至100时,基于数据包序列号集合在累计数据包传输次数和端到端吞吐量上的平均改进分别是14.99%和17.98%。

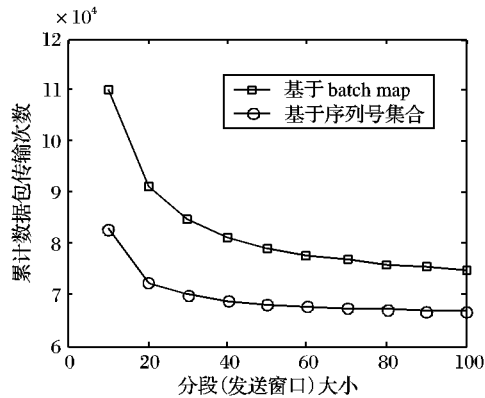


图4 端到端累计数据包传输次数

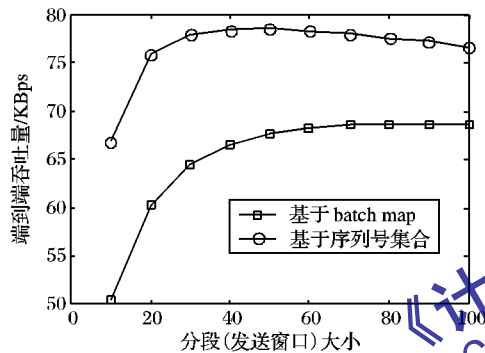


图5 端到端吞吐量

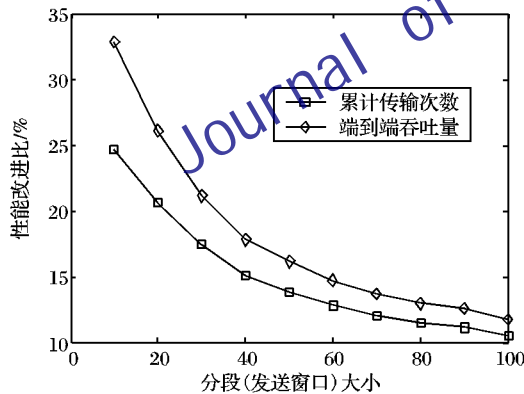


图6 基于数据包序列号集合的传输协调机制的性能改进

4 结语

本文基于ExOR机会路由协议提出了一种基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制。与现有批量分段式的基于batchmap的传输协调机制不同,基于数据包序列号集合的

机会路由传输协调机制以正确接收的数据包的序列号集合为载体在候选路由节点间进行分布式传输协调,同时及时向源节点发送窗口补充新待传输数据包,从而实现批量连续的机会路由数据包传输,保证了候选路由节点每轮批量传输的数据包数量,进而始终确保较高的机会路由传输协调成功率,减少冗余的数据包转发,从而提高多跳无线网络端到端吞吐量。模拟实验结果表明:相比现有基于batch map的批量分段式机会路由传输协调机制,基于数据包序列号集合的机会路由传输协调机制具有明显的性能提升。

参考文献:

- [1] ZENG K, LOU W, ZHAI H. Capacity of opportunistic routing in multi-rate and multi-hop wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5118-5128.
- [2] BISWAS S, MORRIS R. ExOR: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(4): 133-144.
- [3] SHAH R C, WIETHOLTER S, WOLISZ A, et al. When does opportunistic routing make sense? [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing. Washington, DC: IEEE, 2005: 350-356.
- [4] RADUNOVIC B, GKANTSIDIS C, KEY R, et al. An optimization framework for opportunistic multipath routing in wireless mesh networks [C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM 2008. Phoenix, USA: IEEE, 2008: 2252-2260.
- [5] VETTERPHAL C. Opportunistic routing in dynamic Ad Hoc networks: the OPRAH protocol [C]// MASS: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Vancouver, Canada: IEEE, 2006: 570-573.
- [6] ZENG K, LOU W, ZHAI H. On end-to-end throughput of opportunistic routing in multirate and multihop wireless networks [C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM 2008. Phoenix, USA: IEEE INFOCOM, 2008: 816-824.
- [7] YUAN Y, YANG H, WONG S H Y, et al. Romer: Resilient opportunistic mesh routing for wireless mesh networks [C]// Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh). Washington, DC: IEEE, 2005.
- [8] BACCELLI F, BLASZCZYSHYN B, ERMEL E, et al. An optimized relay self selection technique for opportunistic routing in mobile Ad Hoc networks [C]// EW2008: Proceedings of European Wireless Conference 2008. Prague, Czech Republic: [s. n.], 2008: 1-7.
- [9] LUK C P, LAU W C, YUE O C. An analysis of opportunistic routing in wireless mesh network [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Beijing: IEEE, 2008: 2877-2883.
- [10] 霍广城, 王晓东. 移动传感网中一种基于RSSI的机会主义路由设计[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 608-613.
- [11] FALL K, VARADHAN K. The VINT Project [EB/OL]. [2009-10-10]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/>.

(上接第1454页)

- [8] BENSOU B, KONG Z N, TSANG D H K. A measurement-assisted, model-based admission control algorithm for IEEE 802.11e [C]// The International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 260-265.
- [9] ATAMNA Y, JUANOLE G. Methodology for obtaining abstract

- views of state graphs labeled with probabilities and times: An example of application to a communication protocol [C]// MASCOTS. Washington, DC: IEEE, 1995: 299-306.
- [10] WIETHÖLTER S, HOENE C. An IEEE 802.11e EDCA and CFB simulation model for ns-2 [EB/OL]. [2008-10-10]. http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/.