

基于轮换簇头的多跳对等 蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议

刘继顺, 宋铁成, 叶芝慧, 沈连丰

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 蓝牙是一种新型无线通信技术, 它在物理层上采用跳频方式, 能够使便携设备组成短距离无线自组织网络. 但是节点地位不对等性制约着蓝牙技术在 Ad Hoc 网络中的应用. 在研究现有网络形成协议基础上, 提出基于轮换簇头思想, 利用蓝牙规范中角色转换协议, 分时轮换簇头, 使每个节点地位完全对等, 以克服蓝牙 Ad Hoc 网络的不对等性. 同时, 控制节点度数, 引入一跳网桥, 有效减少了数据转发跳数. 详细描述了拓扑构建, 微微网形成, 微微网互连以及对等网络形成的规则. 使用该规则可以不需所有蓝牙节点处于相互传输距离内而形成连通的多跳对等网络. 通过对 200 个节点的仿真, 结果表明该协议能够快速形成连通网络, 且数据转发次数较少.

[关键词] Ad Hoc 网络, 蓝牙, 对等网络, 网络形成

[中图分类号] TN 92 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2006) 03-0018-05

A Multi-hop Peer-to-peer Bluetooth Ad Hoc Networks Formation Protocol Based on Cycle-switching Cluster-head

LU Jishun SONG Tiecheng YE Zhuhui SHEN Lianfeng

(National Key Laboratory of Mobile Communications Research, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract As a promising new wireless technology, Bluetooth enables portable devices to form short-range wireless ad hoc networks based on a frequency hopping physical layer, but asymmetry of nodes is a serious problem in applying Bluetooth technology into ad hoc networks. Based on the study on the present networks formation protocols, we describe an idea of cycle-switching cluster-head to overcome the asymmetry of Bluetooth ad hoc networks. In this paper, we utilize switch-role protocol in the specification of the Bluetooth system to switch cluster-head in time-sharing and form a multi-hop peer-to-peer Bluetooth ad hoc network. We propose to control node-degree and introduce one-hop bridge to reduce the number of data transmission. We define rules for device discovery, piconet formation, piconet interconnection and peer-to-peer networks formation in detail. By using these rules, we connect the protocol forms with multi-hop peer-to-peer networks without requiring the Bluetooth devices to be all in each other transmission range. The simulation results in networks with 200 nodes show that this protocol can not only quickly generate connected networks but also efficiently reduce the number of data transmission.

Key words ad hoc networks; bluetooth; peer-to-peer; networks formation protocol

0 引言

Ad Hoc 网络是一种多跳对等自组织网络, 具有无中心、自组织、可快速展开、可移动等特点. 据预测, 4G 无线通信系统中, 将广泛依赖这种网络结构^[1]. 对于自组织网络而言, 网络形成协议具有非常重要的意义. 通过网络形成协议自动生成良好的网络拓扑结构, 能够提高路由协议和 MAC 协议的效率, 为数据传输、时钟同步等很多方面奠定基础, 有利于均衡网络业务来提高传输效率, 有利于节省节点能量来延长整

收稿日期: 2006-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60472053), 江苏省高新技术研究项目 (BG2005001) 和江苏省科技攻关重大项目 (BE2004008).

作者简介: 刘继顺 (1978-), 硕士研究生, 主要从事无线网络通信的学习和研究. E-mail: lijishunseu@163.com

通讯联系人: 宋铁成 (1967-), 博士, 教授. 主要从事移动通信和无线多媒体通信的教学和研究. E-mail: songtc@seu.edu.cn

个网络的生存期。

蓝牙网络的自组织特性、无线传输特性、动态拓扑特性、低功耗特性、以及使用免授权的 ISM (Industrial Scientific and Medical) 频段等特点,使蓝牙技术成为组建 Ad Hoc 网络最有前途的技术之一^[2]。但是,根据蓝牙规范^[3]形成的蓝牙网络,微微网 (Piconet) 内的各节点间是主从模式通信的,节点地位不对等,这影响蓝牙技术在对等 Ad Hoc 网络结构中的应用。而且蓝牙规范中尚未给出将孤立蓝牙设备自动组成多跳对等的蓝牙散射网 (Scattemet) 的解决方案,这使得研究多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议成为了一个热点问题。

本文简述蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议研究进展,提出了基于簇头轮换思想形成多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络的解决方案,给出了实现步骤并进行了仿真研究,结果表明该方法可以快速有效地组建多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络。

1 蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议的研究进展

网络形成协议的研究工作主要分为两类:

(1) 单跳拓扑网络形成协议。这种网络形成协议假设所有节点都在射频通信范围内,即任两个节点都可以一跳到达对方。文献 [4] 中提出的 BTCP (Bluetooth Topology Construction Protocol) 协议采用领导者选择的过程去收集拓扑信息。这个领导者作为指挥中心采用集中算法去安排网络中所有节点的角色。为了保证一定的网络性能,这种由领导者集中调度的网络,要求节点数目 ≤ 36 。Bluetree^[5,6] 协议是一种树形拓扑结构,所有节点工作在一跳拓扑范围内,不需限制节点数目。但是,它的树形拓扑,限制了其传输效率和抗毁性。这种单跳拓扑情形通常很难满足实际通信场景的需求。

(2) 多跳拓扑网络形成协议。实际中常见的是多跳拓扑情形,文献 [7] 提出了 Bluetrees 协议。它仍是一种树形结构,需事先指定一个根节点,整个协议受制于根节点的性能,而且需要人工干预,失去了完全自组织的特性。为此,文献 [2, 8-11] 提出了性能改进的非树形结构。Bluestars^[2,8] 协议是一种星形拓扑结构,每个微微网中不限制从节点个数,从节点的通信要进行休眠和唤醒的切换,将严重影响网络性能。解决这个问题办法是限制节点度数 (节点一跳内邻居数目)。于是,产生了 Yao^[9] 协议,它先控制节点度数,使得每个节点的邻居数不超过 7 个,接着执行散射网形成协议。这需要配备 GPS 接收器,成本较高。Bluenet^[10] 协议成功限制了微微网中节点个数,但在空间距离上本来可以连通的节点在形成 Bluenet 之后,可能无法连通,即连通性很难保证。对此,Blumesh^[11] 协议对 Bluestars 协议做了改进,它仍采用星形结构,限制微微网中从节点的个数不超过 7 个,获得了较好的效果。但是 Blumesh 不使用一跳网桥的做法,增加了数据转发跳数,其网络吞吐量及传输延迟性能尚需改进。此外,上述协议中蓝牙设备组成微微网后主设备和从设备就固定下来,其角色不能改变,从设备必须通过固定的主设备转发才能通信,影响了整个网络的对等性和抗毁性。

2 多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议

本文在上述协议基础上,提出改进方案,在网络中引入一跳网桥,改进传输延迟特性,实现对等的蓝牙 Ad Hoc 网络,提高网络抗毁性。该协议采用多跳拓扑结构,网络以星形的微微网为基本单元,相邻微微网间采用 3 种网桥全连接。网络形成初期限制微微网中从节点个数不超过 6 个,利用一跳网桥,降低数据转发跳数。通过轮换簇头 (主节点) 方法,分时担当簇头,使各节点完全对等,这样以分级的结构来逼近经典 Ad Hoc 网络推崇的无中心的理想状态,克服了传统蓝牙 Ad Hoc 网络的不对等性。

多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议的基本思想是:选择合适的节点 (比如剩余电能多, CPU 处理能力强的节点) 做主节点,主节点从相邻节点中选择若干从节点组成微微网单元。相邻单元的主节点通过一跳、两跳和三跳网桥连接,形成全连通的散射网。网络形成后,所有从节点参与备选主节点的竞选,选出的备选主节点分时担当主节点,形成对等的蓝牙 Ad Hoc 网络。

下面结合相关蓝牙技术,详细介绍多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议各个实现步骤,并通过仿真结果对其性能进行评价。

2.1 网络拓扑结构构建

拓扑构建利用蓝牙规范中的查询 (NQUARY) 过程和寻呼 (PAGE) 过程完成. 根据蓝牙规范, 参与查询 (寻呼) 过程的两个蓝牙设备必须处于相反状态: 一个处于查询 (寻呼) 状态, 另一个处于查询 (寻呼) 扫描状态.

本文采用对称拓扑构建机制^[4], 分两步执行:

第一步, 任一节点 v 随机进入查询状态或者查询扫描状态. 一旦进入确定的状态模式, 节点 v 执行查询过程相应操作. 当一个查询阶段 (或查询扫描阶段) 结束时, 节点转换到查询过程的相反状态. 当一对蓝牙设备处于查询 (或查询扫描) 状态收到 (或发出) FHS (Frequency Hop Synchronization) 数据包时, 立即利用寻呼过程建立一个临时微微网, 交换后面过程所需的地址、权重及同步信息. 信息交换完毕, 临时微微网立即解散. 这时每个节点建立了邻居列表 $N(v)$.

第二步, 节点 v 自己的邻居列表 $N(v)$ 与相邻的所有节点交换, 使每个节点了解两跳范围内相邻节点信息. 交换邻居列表的过程中仍使用一对相邻节点建立临时微微网的方法.

这样就完成了两跳范围内邻居节点的发现, 使每个节点知道其两跳范围内所有节点的地址、权重和同步信息, 以及通过哪些一跳邻居可以到达其两跳邻居.

2.2 多跳全通网络形成

多跳全通网络的形成采用连续迭代^[11] 的方法进行. 第 i 次迭代时的网络拓扑图记作 $G_i = (V_i, E_i)$, $i \geq 1$ G_1 就是原始的网络地理分布拓扑. 每个 G_i 都是 G_1 的子图, 由 V_i 中的节点张成 (V_i 表示节点的集合, E_i 表示边的集合). 每次迭代, 拓扑图 G_i 中的一些节点都会形成一些微微网单元 (即簇). 三跳网桥形成阶段将延续迭代过程. 为了方便表述, 定义 $N(v)$ 表示节点 v 的一跳邻居的集合, $S(v)$ 表示主节点 v 的从节点的集合, $C(v)$ 代表的所有成为从节点的“大邻居” (节点权重大于 v) 和 v 的所有“小邻居” (节点权重小于 v) 的集合.

上述网络形成过程分为两步, 可以证明这种网络的连通性一定能够保证^[12].

第一步, 节点角色安排. 主节点的选择依据是节点的权重, 相邻节点中权重最大的做主节点. 节点的权重由节点动态地根据感兴趣的网络参数 (如剩余电能、CPU 处理能力、业务量等) 计算得出. 从节点的选择方法是, 主节点从邻居节点中选出不超过 6 个作为其从节点, 通过这些从节点, 覆盖其它所有邻居节点. 就是说, 如果一个邻居 u 没有被主节点 v 选为从节点, 那么至少 u 的一个邻居被 v 选为了从节点. 可以证明^[11], 每个微微网至多选择 5 个从节点可以满足这种覆盖要求. 该阶段限制每个主节点至多选择 6 个从节点, 既满足了覆盖性的要求, 又空出一个从节点位置留给一跳网桥使用.

第二步, 选择网桥节点. 该阶段中, 所有从节点将各自邻居的角色安排、邻居的主节点列表, 及自己的主节点列表汇报给各自的主节点 (们), 主节点根据这些信息选择网桥. 一跳网桥的选择方法是, 每个主节点从一跳内的其它主节点中选择权重小于自己, 且较大的一个作为一跳网桥, 邀请它加入微微网. 相邻主节点如果有共用的从节点, 从中选择权重较大的一个作为两跳网桥. 相邻微微网通过一跳网桥和两跳网桥都无法连通时, 选择它们的一对相邻从节点作为三跳网桥. 本文选取的原则是选择一对相邻从节点, 其中较小的节点权重最大. 然后, 一跳网桥、两跳网桥、所有主节点和非网桥从节点退出网桥选择过程. 由三跳网桥执行第 $(i+1)$ 次迭代, 生成新的微微网, 保证整个网络的连通性.

2.3 对等 AdHoc 网络形成

经典 AdHoc 网络要求网络中没有绝对的控制中心, 所有节点地位平等, 形成对等网络. 这种结构克服了中心节点的传输瓶颈, 具有很好的健壮性、抗毁性. 实际中组建大规模网络采用的分级结构, 网络性能受簇头节点性能限制, 很难达到最佳路由, 抗毁性差, 是一种次最优方案. 蓝牙设备是主从通信, 一旦网络形成, 主从角色就固定下来, 属于一种分级结构. 所以用蓝牙技术组建 AdHoc 网络是不对等的, 本文尝试使用轮换簇头的方法使蓝牙 AdHoc 网络逼近对等网络的理想结构.

轮换簇头的思想是一些从节点被选为备选主节点, 备选主节点根据需要进行轮流激活担当主节点. 其出发点是: 当某个从节点有持续大流量通信需求时, 它的数据全部通过主节点转发, 显然限制了传输速率, 影响网络效率. 如果该从节点取代原有微微网的主节点, 就可以解决这一问题. 这需要原主节点和其它从节点分别与其建立连接, 成为其从节点, 组成新的微微网.

一种方法是,完全拆散原有微微网,使新的主节点通过传统的寻呼机制建立一个全新的微微网.这需要分别寻呼原来所有从节点,浪费很长时间,代价较高.经过研究,我们发现利用蓝牙角色转换协议完成这一过程将非常高效.这样新主节点利用原主节点的时钟信息转换微微网,以少量的角色转换时间换取了大流量数据传输的通畅性.

这种角色转换要求原微微网中所有从节点必须改变其同步定时和跳频图案,转到新的微微网中.角色转换过程中,首先,新主节点和原主节点进行 TDD (Time Division Duplex) 切换,接着进行两者的微微网切换,然后,原微微网的其它从节点转换到新的微微网中.当一个设备收到 FHS数据包,使用了新主节点同步信息和跳频方案时,它在新旧微微网间的转换就完成了(基带部分的具体操作参见蓝牙规范).

如何选出备选主节点参与轮换过程是我们下面要解决的问题. 散射网形成后,我们将所有节点按其角色分成 4 类: 只担当一个微微网的主节点 (M 型); 只担当一个微微网的从节点 (S 型); 担当多个微微网的共用从节点 (S/S 型); 担当一个微微网的主节点,同时担当其它微微网的从节点 (M /S 型). M 型和 M /S 型节点已经在某个微微网中担当了主节点,没必要再参与备选主节点的竞选. 所以备选主节点从 S 型和 S/S 型节点中选出. 选择过程如下:

```
BACKUPMASTER ( v )
1  i ← 0
2  P ← ∅
3  if mytype = S or mytype = S/S
4  then for each w in v's master list
5      do if S(w) ⊆ N ( v )
6      then myrole ← backupmaster in w's piconet
7
8      i ← i + 1
9      P ← P ∪ { w }
10     if i ≥ 1
11     then P ← { biggest one in P }
12     then SEND MESSAGE " v is a backup master " to
13     EX IT
```

当原主节点需要轮换簇头时(比如某个备选主节点有持续大流量通信需求,或者原主节点出现传输瓶颈),原主节点激活某个备选主节点,形成新的微微网.原主节点与新主节点交换时钟同步信息、跳频序列、原微微网中的从节点信息以及外部连接信息,交换主从角色.并将新的同步信息和跳频序列通知其它从节点,使这些从节点也转换到新微微网中.这时,原主节点转化为备选主节点,新主节点更新备选主节点列表.新的微微网保留原微微网中的所有节点,并且保持每个网桥节点和其它微微网的连接不变,只是将微微网内部连接进行调整,同时原主节点转化为备选主节点.

簇头节点的轮换只是优化了微微网内部结构,减少了大业务量节点数据转发次数,并不会影响整个网络的结构.就是说,原来在同一微微网中的节点还在同一微微网中,只是转换了簇头,及各节点的角色,改变了微微网内节点间的连接.而微微网之间的连接方式不变,即散射网还是由相邻微微网的主节点通过一跳、两跳和三跳网桥连接而成.

这样使用轮换簇头(主节点)思想,利用蓝牙角色转换协议,通过时分复用轮换簇头,实现了每个节点实现地位完全对等.全网中各个节点都可分时担当主节点,从统计意义上看,以分级结构逼近了经典 Ad Hoc 网络推崇的无中心的要求,克服了传统蓝牙 Ad Hoc 网络的不对等性.

3 仿真结果分析

我们以 NS2 提供的蓝牙协议栈为基础利用 C++ 对本文提出的多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议进行了网络层仿真.仿真中设定所有的蓝牙设备的发射功率 1 mW (0 dBm), 每个节点的最大传输半径为 10 m, 这些节点随机分布在一个边长 40 m 的矩形区域内.当且仅当两个节点的欧氏距离 ≤ 10 m 时,这两个节点才处于相互通信范围内.我们对节点数 n = 40, 60 80 ..., 200 进行了仿真测试.

如图 1 所示,每个微微网中平均从节点的个数总是在 3.1 和 5.3 之间,随节点个数变化不大.微微网中平均备选主

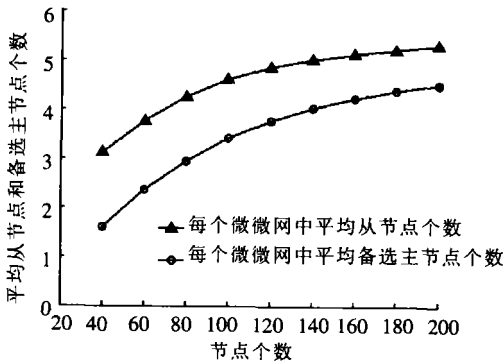


图 1 每个微微网中平均从节点和备选主节点个数

节点的个数随节点个数的线性增长呈类对数型增长 (从 $n = 40$ 时的 1.6 个到 $n = 200$ 时的 4.5 个), 说明备选主节点的个数随节点密度的增加, 会显著增长. 但是, 微微网中备选主节点的个数始终少于从节点的个数, 这主要是由 M/S 型和 S/S 型节点的存在引起的.

图 2 显示了多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成后每两个蓝牙节点间平均最短路径长度 (跳数) 相对原始拓扑结构的增加情况. 由于同一微微网中两个从节点通信要通过主节点转发, 同时, 不同微微网的节点通信要通过网桥转发, 所以路径长度的增加是不可避免的. 但是由于多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议引入了一跳网桥以及簇头轮换机制, 网络形成后平均路径长度短于 Blumesh 协议.

4 结束语

基于轮换簇头的多跳对等蓝牙 Ad Hoc 网络形成协议, 以牺牲少量的角色转换时间换取了全网节点的对等性, 为优化网络路由奠定了基础. 同时, 引入一跳网桥, 降低了平均最短路径长度, 减少了数据转发次数, 适合于节点密度较大的场合使用.

[参考文献] (References)

[1] KELLERER W, VÖGELH - J, STENBERG K - E. A Communication gateway for infrastructure independent 4G wireless access[J], IEEE Comm Magazine, 2002, 40(3): 126- 131.

[2] PETRIDIS C, BASAGNIS S, CHLAMTAC I. Configuring BlueStars: multihop scatternet formation for Bluetooth networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(6): 779- 790.

[3] Specification of the Bluetooth System[S/OL]. (2001-01-) [2006-02]. <http://www.Bluetooth.com>, Core Version 1. 1.

[4] SALONDIS T, BHAGWAT P, TASSIULAS L, et al. Distributed topology construction of bluetooth personal area networks [C] // Proceedings of the IEEE Infocom, 2001: 1577- 1586.

[5] LAW C, MEHTA A K, SIU K - Y. A new Bluetooth scatternet formation protocol[J]. Mobile Networks and Applications (MONET), Special Issue on Mobile Ad Hoc Networks, 2003, 8(5): 485- 498.

[6] TAN G, MU A, GUTTAG J, BALAKRISHNAN H. An efficient scatternet formation algorithm for dynamic environment [C] // Proceedings of the IASTED Communications and Computer Networks (CCN), 2002.

[7] ZÁRUBA G, BASAGNIS S, CHLAMTAC I. Bluetrees-Scatternet formation to enable bluetooth-based personal area networks [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications ICC 2001, 2001: 273- 277.

[8] BASAGNIS S, PETRIDIS C. A scatternet formation protocol for ad hoc networks of Bluetooth devices[C] // Proceedings of the IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference VTC Spring 2002, 1: 424- 428.

[9] STOJENOVIC I. Dominating set based Bluetooth scatternet formation with localized maintenance[C] // Proceedings of the Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models, 2002, 148- 155.

[10] WANG Z, THOMAS R J, HAAS Z. Haas Bluenet-a new scatternet formation scheme[C] // Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Science (HICSS- 35), 2002, 61- 69.

[11] PETRIDIS C, BASAGNIS S, CHLAMTAC I. Blumesh: degree-constrained multi-hop scatternet formation for Bluetooth networks[J]. Mobile Networks and Application, 2004, 9(1): 33- 47.

[12] CHLAMTAC I, FARAGÖ A. A new approach to the design and analysis of peer-to-peer mobile networks[J]. Wireless Networks, 1999, 5(3): 149- 156.

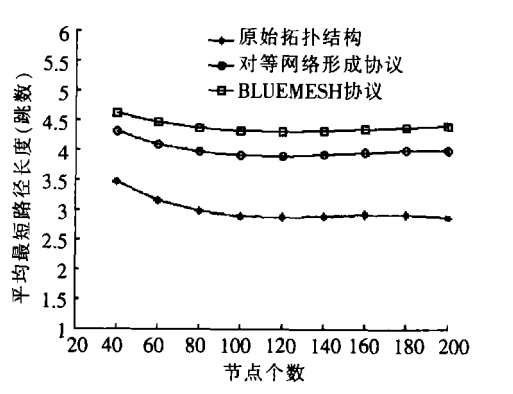


图 2 原始拓扑结构和两种网络形成协议的平均最短路径比较

[责任编辑: 刘 健]