

文章编号:1001-9081(2009)01-0028-04

基于虚拟位置的无线传感器网络环路由协议

施 磊¹, 张晨曦²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 软件学院, 上海 201804)

(wing831223@gmail.com)

摘要: 无线传感器网络中节点的能源和处理能力受限, 难以提供大规模的、以数据为中心的服务。为了解决以上问题, 提出了一个基于虚拟位置的环路由协议。此协议使用分布式哈希表管理数据。虚拟位置概念的引入减少了冗余的路由信息并优化了路由的路径, 从而减轻了节点的负担并提升了数据传送的效率。根据仿真结果以及与相关协议的对比, 证明了此协议的有效性和可扩展性。

关键词: 无线传感器网络; 虚拟位置; 环路由协议; 分布式哈希表

中图分类号: TP393 文献标志码:A

Virtual position-based ring routing protocol for wireless sensor network

SHI Lei¹, ZHANG Chen-xi²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A virtual position-based ring routing protocol was presented. This protocol can serve as the infrastructure of a large-scale and data-oriented service in wireless sensor network. This protocol used distributed Hash table to manage data. The idea of using virtual position lead to the benefit that less redundant routing information was generated, and thus the routing paths were optimized. This benefit also reduced nodes' working load and improve data transmission efficiency. Detailed simulation and comparison with relative protocol show that this protocol achieves good efficiency and scalability.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); virtual position; ring routing protocol; Distributed Hash Table (DHT)

0 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由部署在某个区域内一定数量的微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳的、自组织的网络系统。传感器节点通常都受到严格的资源限制, 比如带宽和电源, 另外节点往往具有移动性和易错性^[1-2]。

WSN 要想提供规模更大, 更面向应用的服务, 首先需要解决如何有效地定位数据的问题。对等网中基于分布式哈希表 (Distributed Hash Table, DHT) 的覆盖网协议^[3-4] 在全分布式结构化拓扑对等网络上具有近似最佳 (Near Optimum) 的数据查找次数, 其时间复杂度为 $O(1)$ 。其中具有代表性的协议有 Chord^[5]、Pastry^[6] 等。基于 DHT 的路由协议比起传统的路由协议更加面向应用, 在数据管理上更直观。但这些协议并不直接适用于 WSN。因为传感器具有移动性^[7], 并且不像因特网中的计算机那样具有统一分配的 IP 地址作为标识。基于 DHT 的路由协议要应用于 WSN, 必须根据 WSN 的特点进行改进。目前, 基于 DHT 的路由协议的研究正成为 WSN 领域的热门课题。

1 相关工作

虚拟环路由 (Virtual Ring Routing, VRR)^[8] 是比较成功的基于 DHT 的路由协议。它不需要中心服务器, 也不会在全局范围进行广播。经实验证明, 它在许多场景下比 DSR^[9]、AODV^[10] 和 DSDV^[11] 这些著名的无线路由协议有更好的表现。按 WSN 路由协议中节点的 ID 分配方式, 可以划分为 3

个类别: 基于真实位置的, 基于相对位置的和与位置无关的。每个节点和与其 ID 最接近的 r 个节点互称为虚拟邻居。VRR 是与位置无关的路由协议, 即每个节点在指定的区间内被分配一个与物理位置无关的标识 (ID)。每个节点和与其 ID 最接近的 r 个节点互称为虚拟邻居。路由时, 节点通过路由信息表进行决策, 表中的每个条目代表了一条虚拟路径, 路径的两端是一对虚拟邻居, 条目中还包括到通向各个端节点的下一跳节点信息。

VRR 的问题在于, 因为 ID 是随机分配的, 所以虚拟邻居之间的物理距离往往很远。另外, 随着网络规模增大, 虚拟邻居之间的跳数增多, 每个节点需要额外存储大量的途径它的虚拟路径信息。考虑到传感器有限的存储和处理能力, 这样会导致网络的可扩展性不佳。

2 基于虚拟位置的环路由协议

本文提出的基于虚拟位置的环路由协议 (Virtual Position-Based Ring Routing Protocol, VPBRR) 引入了 VRR 中依据路由信息表来做路由决策的思想。但根本不同之处在于它是基于虚拟位置的路由协议。在一维空间上分配的节点 ID^[12] 既不是随机分配, 也不依赖于绝对物理位置, 而是和路由信息表一起反映节点间的相对位置。

VPBRR 的生命周期分为两个主要阶段: 节点加入阶段和就绪阶段。当网络中所有节点相互之间都建立起虚拟连接后, VPBRR 从节点加入阶段进入到就绪阶段, 开始进行数据交换。

2.1 节点加入

VPBRR 将作为 DHT 环的环首和环尾的节点称作端节

收稿日期: 2008-07-09; 修回日期: 2008-09-18。

作者简介: 施磊 (1983-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向: 分布式系统、无线传感器网络; 张晨曦 (1960-), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算机系统结构、分布式系统、嵌入式系统。

点,它们分别取整个 ID 区间中的最大值和最小值。称环首节点为 $Head(H)$, 环尾节点为 $Tail(T)$ 。VPBRR 中每个数据包的标识也在区间 $[H, T]$ 内, 从而和相应节点建立从属关系。

每个正要加入网络的节点首先通过广播 Hello 消息来发现物理邻居, 并筛选其中已加入网络的节点, 称其为候选 (Candidates) 节点。第一个加入网络的节点是端节点 H , 第二个节作为端节点 T 。值得注意的是, H 和 T 的身份会根据后续加入节点的情况而改变。如果节点找不到任何候选节点, 那么它将作为另一个 WSN 网络的头节点, 称其为 H' 。

在寻找到候选节点后, 每个节点要确立临时的前继 (Predecessor) 和后继 (Successor), 它们代表在 DHT 环上与当前节点相邻的节点, 这个关系仅在节点加入阶段有效。具体确定步骤如下:

首先判断候选节点中是否有 T 节点, 如果有, 那么新节点将取代原节点成为新的 T 节点, 原 T 节点则取 T 和其前继节点的 ID 之间的值作为新 ID。新节点也就成了原 T 节点的后继。如果候选节点中没有 T 节点, 但有 H 节点, 那么新节点取代原 H 节点, 原 H 节点取 H 和其后继 ID 之间的值作为新 ID, 新成员成为原 H 节点的前继。

然后, 如果候选节点中没有 T 或 H 节点, 并且候选节点的数目超过两个(包括两个), 新节点将在其中随机选择两个节点作为自己的前继和后继, 并取介于这两个节点 ID 之间的值作为自己的 ID。显然地, 该节点成为了原先两个节点中那个 ID 值较小的节点的后继, ID 值较大的节点的前继。如果新节点只有一个候选节点, 那么新节点将发送 Negotiation 消息给该候选节点进行协商, 假设新节点为 A , 候选节点为 B , B 将根据自己的前后继情况返回一个区间 $(B, B']$ 给 A , B 需要保证此区间内没有其他节点。 A 在此区间内选择一个值作为 ID, 并回复 NegotiationReply 消息给 B , B 将 A 作为自己的后继。

以 25 个节点的网络为例, 为了方便说明问题, 使它们网格化地分布在一个矩形区域内。节点的加入顺序为从左至右, 从上至下, 如图 1 所示。 H 节点 ID 为 1.00, T 节点 ID 为 9.99。节点确认完其前后继后, 它们的 ID 按升序排列组成了一个环。值得注意的是, 图 1 中节点的连线表示环上的虚拟邻居关系, 而不是前后继关系。节点的前后继必定是它的物理邻居。

最后, 节点获得 ID 后, 需要确定自己的虚拟邻居: 这一步骤通过发送 Setup 请求来完成, 请求的目的节点将设为节点 A 自身。然后随机地选择 A 的一个物理邻居 B 作为代理 (Proxy), 把数据包转发给 B , 然后 B 查找自己的路由信息表, 使用贪婪算法 (Greedy Algorithm) 把请求转发给 ID 与 A 最接近的节点。请求最终到达的节点 C 就是 A 的虚拟邻居, 如果 C 的虚拟邻居个数小于 r , 那么 C 将 A 加入到自己的虚拟邻居表中, C 返回 Setup 回馈消息给 A , 回馈消息中还会包含 C 自身的虚拟邻居表。由于 A 的路由信息还未在网络中建立, 所以该回馈消息首先转发给 B , 再通过 B 转发给 A 。回馈消息在网络中传递的同时, 也更新所有途径的节点的路由信息表, 告知它们关于 A 的信息。如果有其他节点决定把 A 加为自己的虚拟邻居, 则需要发送 Setup 请求消息给 A 。

在实际应用中为了简化网络的结构, 可以通过在交换 Hello 消息时检查对方节点是否已加入网络, 来控制节点按照一定的物理位置顺序加入网络。

Setup 请求和 Setup 回馈消息在网络中传播的过程可以看作是节点通过互相交换局部信息, 从而获得整个网络情况的过程。这个机制类似于蚁群算法中交换信息激素

(Pheromone) 的思想。

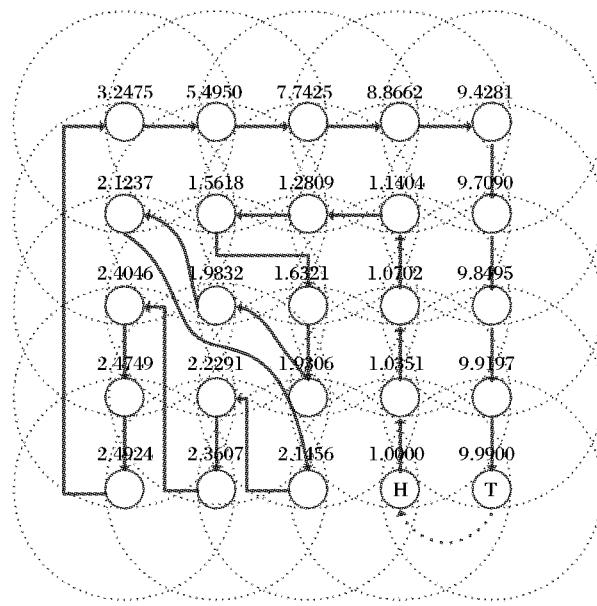


图 1 25 个节点组成的虚拟环

2.2 路由

虚拟路由表将整合虚拟邻居表和物理邻居表的信息, 以图 1 中节点 1.0702 为例, 它的虚拟路由表如表 1 所示, 其中 V 表示虚拟邻居, P 表示物理邻居, C 表示正好经过节点 1.0702 的其他虚拟路径信息。

表 1 节点 1.0702 的虚拟路由表

端节点 A	端节点 B	下一跳 A	下一跳 B	备注
1.1404	1.0702	1.1404	NULL	V, P
1.0702	1.2809	NULL	1.1404	V, P
1.0351	1.0702	1.0351	NULL	V, P
1.0000	1.0702	NULL	1.0351	V, P
1.6321	1.0702	1.6321	NULL	P
9.8495	1.0702	9.8495	NULL	P
2.1237	9.9900	1.6321	1.0351	C
2.4749	9.7090	1.6321	9.8495	C

在路由时使用贪婪算法的思想, 在转发数据包或控制消息时, 查找路由数据表, 并选择与数据包 ID 最接近的端节点, 然后把数据包转发给这条虚拟路径的下一跳节点。当某节点除了自身找不到与数据包 ID 更相近的端节点时, 该节点就是数据包的目的节点。

2.3 节点出错侦测/修复

2.3.1 侦测

节点每隔 T 时间广播一条 Hello 消息, 接收到此消息的物理邻居回复以 HelloReply 消息。假如节点 A 在 $8T$ 时间内没有收到邻居 B 的 Hello Reply 消息, 则判定 B 已失效。 A 将就这一事件更新自己的物理邻居表和路由信息表, 并判断哪些虚拟路径会受此事件影响, 然后发送 Clear 消息给处于这些虚拟路径上的下一跳节点。这些邻居在更新完自己的信息后, 再根据同一原则继续转发 Clear 消息, 最终网络中所有相关节点都会就 B 节点失效这一事件得到更新。

2.3.2 修复

节点 B 的失效会导致某些节点的虚拟邻居表出现空余, 这些节点将再度在网络中发送 Setup 请求, 寻找新的虚拟邻居。

由于在 VPBRR 中, 虚拟邻居之间的跳数很少, 所以

VPBRR 正如其他 DHT 协议那样在虚拟邻居之间备份数据, 来减低节点失效所可能带来的影响, 一旦节点异常退出, 通过数据包的 ID 仍然可以访问到数据, 因为此时失效节点的虚拟邻居的 ID 与数据包 ID 最相近。

3 仿真

使用 OMNeT++ 平台, 在不同的场景下对 VPBRR 和 VRR 进行仿真, 并分析比对仿真数据。

OMNeT++ 是一个由离散事件驱动的仿真平台, 它的开发语言为 C++, 使用自定义的 NED 语言描述网络拓扑。提供了诸如 INET 和 MF 等的扩展框架。

3.1 仿真环境

使用 INET 框架提供的 MAC 层和物理层的仿真模组, 运行在 IEEE 802.11 协议上。所有节点网格化地分布在矩形区域中。节点的疏密度保证每个节点都能且只能和与它平行的或垂直的相邻节点通信(不能和对角线的节点通信)。数据流量方面采用 UDP 恒定比特率(Constant Bit Rate, CBR)^[13]。设计了大量不同网络规模, 不同 CBR 的仿真场景, 每个场景都用不同的随机种子进行 5 次实验。

其他基本网络参数为: 禁用 RTS/CTS; 无线电传输率为 2 Mbps, 传输范围为 50 m; 禁用 ACK; MAC 层重发尝试次数为 7 次。

3.2 路由路径质量

路由协议的路径质量主要通过伸缩率(Stretch Ratio)来衡量节点间的路径选择好坏, 伸缩率是指数据包在网络中实际传输的路径长度 L 和理论平均路径长度 L_{avg} 的比值。 $R = L/L_{avg}$ 。理论平均路径长度取决于网络中的节点数目, 两个对角线节点之间的路径为最长路径。假设网络中有 n 个节点, 易得 L_{avg} 的计算公式如下:

$$L_{min} = 0 \quad (1)$$

$$L_{max} = 2\sqrt{n} - 2 \quad (2)$$

$$L_{avg} = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} = \sqrt{n} - 1 \quad (3)$$

在本实验中的网络规模分别为 25、49、100、144、169、196、225, 所有节点都发送数据包至矩形节点阵列的最左上角节点, 记录数据包平均经过的节点数目, 即路径长度。

结果如图 2 所示, VRR 和 VPBRR 的伸缩率都随网络规模增大而上升。从 25 个节点到 225 个节点, VRR 的增幅达到了 19.7, 而 VPBRR 的增幅仅为 12%。这说明了随着节点增多, 在路由时 VPBRR 对最优路径的偏离程度要小于 VRR。这是因为在 VPBRR 中, 虚拟位置能够部分反映正确的路由方向。总体来说, VPBRR 的路径选择更优。从能源管理的角度出发, VPBRR 经过更少的转发节点也比较节省电源。

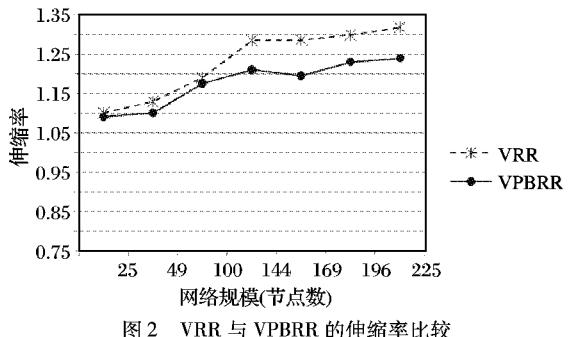


图 2 VRR 与 VPBRR 的伸缩率比较

3.3 网络规模的影响

当节点数量增大时, 对数据的端到端延迟时间(End To

End Delay)等性能指标会产生什么影响? 为了研究这一问题, 进行了如下实验: 所有节点随机在 [0, 100] 的时间间隔内发送总共 100 个数据包至第一个节点, 计算数据包的平均端到端延迟时间。这个场景相当于在 WSN 中所有节点都把数据存储向同一个节点。网络的规模分别为 25、49、100、144、169、196、225 个节点。当数据包经过更多节点时, 延迟时间也会相应变长, 另外就是相邻节点在同时发送数据包时会导致 MAC 层的冲突, 从而数据包被重发并导致延迟。

实验结果如图 3 所示。可以看到, 从 25 个节点到 225 个节点, VRR 的延迟时间增加了 535%, 而 VPBRR 为 436%。此外, VPBRR 的平均延迟时间为 VRR 的 77.5%, 具有更高的效率。

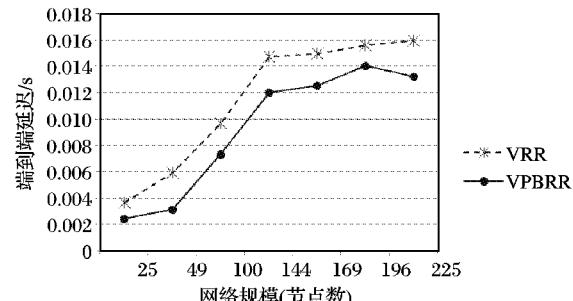


图 3 VRR 与 VPBRR 在不同规模下的延迟时间比较

3.4 数据流量的影响

为了研究不同的数据流量对于 VPBRR 的影响, 在本实验中保持网络规模为 100 个节点。网络中的每个节点都从同一时间点开始发送 100 个数据包至同一目标节点。发送的速率从 CBR 为 2 开始递增, 具体选择的 CBR 为 2、4、8、16、32、64、128、200、400。实验中主要记录两个指标: 端到端延迟和丢包率。因为当同一时刻网络中数据包较多并引发冲突的时候, MAC 层虽然会缓存数据包并定时重发, 但当重发次数超过上限时, 该数据包就将被丢弃。仿真结果表明, 当 CBR 为 400 时, VPBRR 的丢包率为 0.33%, 是一个可以接受的值。

延迟方面, 如图 4 所示。由于当数据流量很小的时候, 延迟的值都很小, 相差也并不大, 所以图 4 中直接从 CBR 为 64 处开始进行比较。可以看见, VPBRR 的延迟明显要小于 VRR, 是 VRR 的 68.9%。这个结果表明, 在网络中存在突发数据流量的时候, VPBRR 的表现要比 VRR 好。

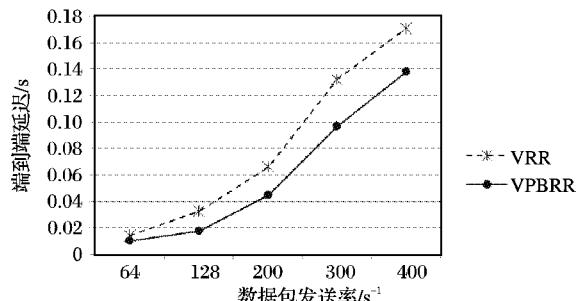


图 4 VRR 与 VPBRR 在不同数据流量下的延迟时间比较

4 结语

VPBRR 是一个基于虚拟位置的路由协议, 提供了针对 WSN 的端到端路由功能和 DHT 数据存取功能。它具有自组织的特性, 也避免了泛洪。通过利用虚拟位置, 网络中的虚拟邻居关系能够部分反映节点间的相对位置, 从而在路由路径的选择上更具合理性。

通过和 VRR 进行仿真比对。在不同网络规模, 不同数据流量的场景下, VPBRR 的伸缩率、端到端延迟等 WSN 路由协

议的重要评价指标都普遍好于 VRR。考虑到传感器节点的能源受限等特性,VPBRR 更加适用于 WSN。

在今后的研究中,还需要进一步通过仿真来研究 VPBRR 在更多其他场景下的表现。

参考文献:

- [1] CULLER D, ESTRIN D, SRIVASTAVA M. Overview of sensor networks [J]. IEEE Computer, 2004, 37(8): 41–49.
- [2] ESTRIN D, CULLER D, PISTER K, et al. Connecting the physical world with pervasive networks [J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(1): 59–69.
- [3] RATNASAMY S, FRANCIS P, HANDLEY M, et al. A scalable content-addressable network [C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2001 technical conference. New York: ACM Press, 2001: 161–172.
- [4] ZHAO B, KUBIATOWICZ J, JOSEPH A. Tapestry: An infrastructure for fault-resilient wide-area location and routing, CSD-01-1141 [R]. Berkeley: University of California, 2001.
- [5] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications [C]// Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. New York: ACM Press, 2001: 149–160.
- [6] ROWSTON A, DRUSCHEL P. Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems [C]// Proceedings of the IFIP/ACM international conference on distributed systems platforms. Heidelberg: Springer, 2001: 329–350.
- [7] AGRE J, CLARE L. An integrated architecture for cooperative sensing networks [J]. IEEE Computer, 2000, 33(5): 106–108.
- [8] CASTRO M, O'SHEA G, ROWSTON A. Zero servers with zero broadcasts [C]// Proceedings of ACM MobiShare '06. New York: ACM Press, 2006: 36–41.
- [9] JOHNSON B D, MALTZ A D. Dynamic source routing in Ad Hoc wireless networks [J]. Mobile Computing, 1996, 353(5): 153–181.
- [10] PERKINS E C, ROYER M E. Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing [C]// Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 25–26.
- [11] PERKINS E C, BHAGWAT P. Highly dynamic Destination - Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers [C]// Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications. New York: ACM Press, 1994: 234–244.
- [12] CAESAR M, CONDIE T, KANNAN J, et al. ROFL: Routing on flat labels [C]// Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. New York: ACM Press, 2006: 363–374.
- [13] BROCH J, MALTZ A D, JOHNSON B D, et al. A performance comparison of multi-hop wireless Ad Hoc network routing protocols [C]// Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. New York: ACM Press, 1998: 85–97.

(上接第 17 页)

(判定系数 R^2 的检验)和回归方程的显著性检验(F 检验)。判定系数是判断回归模型拟合程度优劣最常用的数量指标。 $R^2 = 1 - (RSS/TSS)$, 其中 RSS 为残差平方和, TSS 为回归平方和, $0 \leq R^2 \leq 1$ 。 R^2 越接近 1, 模型的拟合程度越高。F 检验是对回归总体线性关系是否显著的一种假设检验:

$$F = \frac{ESS/1}{RSS/(n-2)} \sim F(1, n-2) \quad (3)$$

将(2)代入一元线性回归方程 $y = C_1 + C_2x'$, 得到丢包与用户体验质量间的回归方程如下:

$$y = C_1 + C_2 \ln(1 + 100x) \quad (4)$$

其中: y 为用户体验质量, x 为丢包率。不同的 RTP 分组间隔时间和突发丢包长度下, C_1 、 C_2 的取值及检验结果如表 2 所示。

表 2 回归方程的参数取值与检验

突发丢包长度 分组间隔/ms	C_1	C_2	R^2	F
1	20	4.573	-0.492	0.991 2190.492
	30	4.608	-0.546	0.989 1782.994
	40	4.609	-0.551	0.991 2015.960
2	20	4.637	-0.584	0.980 924.234
	30	4.559	-0.523	0.985 264.557
4	20	4.653	-0.583	0.969 441.697
	30	4.662	-0.534	0.949 112.362

在 MP3 编码的音频流实验中,比特率和丢包率是影响用户体验的两个主要因素。采用与 PCM 编码类似的方法,在三类比特率下分别建立了各自的回归方程:

$$\begin{cases} y = -0.645 - 0.784 \ln(1 + 100x), & \text{比特率} = 64 \text{ kbps} \\ -0.553 - 19.561x, & \text{比特率} = 128 \text{ kbps} \\ -0.511 - 16.680x, & \text{比特率} = 192 \text{ kbps} \end{cases} \quad (5)$$

其中: y 为用户体验质量, x 为丢包率。

在高比特率下,实验数据的散点图呈现出高度的线性关系

而非曲线关系,因而使用了一元线性方程形式,回归方程组通过了拟合优度检验和回归方程显著性检验,具有统计学意义。

4 结语

本文基于音频流媒体仿真传输实验和用户体验的客观评价方法,建立了丢包率与体验质量之间的映射关系,从而能够实时地、准确地预测丢包对用户体验的损害。实验平台实现了对平均丢包率与丢包突发长度的主动控制,对多种现实网络环境进行仿真,使得映射关系具有广泛的适用性。现阶段仅采用了简单的错误隐藏技术,更多的错误隐藏与恢复技术对用户体验的改善还有待进一步的研究。同时,延迟和抖动也是重要的网络性能指标,它们与体验质量间的关系以及综合的网络传输性能与体验质量间的映射关系都是我们将来研究的目标。

参考文献:

- [1] Architecture & Transport Working Group. Triple-play Services Quality of Experience (QoE) requirements, TR 126 [R]. Digital Subscribe Line Forum, 2006.
- [2] ITU-T recommendation P.862, Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs [S]. 2001.
- [3] ITU-R recommendation BS.1387, Method for objective measurements of perceived audio quality [S]. 2001.
- [4] 陈国, 胡修林, 张蕴玉, 等. 语音质量客观评价方法研究进展 [J]. 电子学报, 2001, 29(4): 548–552.
- [5] MEDDAHI A, AFIFI H. "Packet-E-Model": E-Model for VoIP quality evaluation [J]. Computer Networks, 2006, 50(15): 2659–2675.
- [6] DING L, GOUBRAN R A. Speech quality prediction in VoIP using the extended E-Model [C]// Proceedings of GLOBECOM '03. San Francisco: IEEE Press, 2003, 7: 3974–3978.
- [7] YAJNIK M, MOON S, KUROSE J, et al. Measurement and modeling of the temporal dependence in packet loss [C]// Proceedings of INFOCOM '99. New York: IEEE Press, 1999, 1: 345–352.