

基于链路带宽利用率的路由选择算法

杨晓琴^{1*}, 章丽芳², 曹庆皇³, 孙海燕¹, 李卓青¹

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 南京 210007; 2. 浙江广播电视大学 临海学院, 浙江 临海 317000;

3. 中国移动通信集团江苏有限公司 镇江分公司, 江苏 镇江 212000)

(* 通信作者电子邮箱 yxq86810@163.com)

摘要:为避免网络拥塞,针对现有路由调整算法没有考虑网络流量均衡分布和用户使用感知的问题,提出一种路由选择算法。在保证网络时延,不影响用户服务质量的前提下,选择带宽利用率最小的路径,最大限度实现负载均衡。为尽可能反映实际情况,实验采用真实的 Abilene2 网络拓扑,结果表明:该算法能有效缓解网络拥塞,网络可利用率提高超过 50%。与现有算法相比,该算法能同时满足带宽利用率和网络时延两方面要求。此外,通过调整参数值可以满足实际网络中不同业务的要求。

关键词:带宽利用率;服务质量;路由算法;负载均衡;网络拥塞

中图分类号:TP393.2 **文献标志码:**A

Routing algorithm based on link bandwidth utilization rate

YANG Xiao-qin^{1*}, ZHANG Li-fang², CAO Qing-huang³, SUN Hai-yan¹, LI Zhuo-qing¹

(1. Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. Linhai Institute, Zhejiang Radio and Television University, Linhai Zhejiang 317000, China;

3. Zhenjiang Branch, China Mobile Group Jiangsu Company Limited, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: In order to avoid network congestion, concerning that the current algorithms have not considered the aspects of network flow distribution and user's perception, a routing algorithm which can realize maximum load balance was proposed. The algorithm can decrease the maximal bandwidth utilization rate of network with delay guaranteed. The experiment based on real Abilene2 network topology shows that the proposed algorithm can alleviate the network congestion and improve the network utilization rate over 50% effectively. Compared with the existing algorithms, the proposed algorithm can meet two requirements of the bandwidth utilization and network delay. In addition, by adjusting the parameter values it can meet different business requirements in actual networks.

Key words: bandwidth utilization; service quality; routing algorithm; load balance; network congestion

0 引言

流媒体业务和 P2P 下载业务的飞速发展对网络实时性和带宽提出更高的要求,而且随着用户数目的增加,网络中的流量将呈指数级增长,很容易造成网络拥塞。运营商一般采用过量提供带宽的方法减少网络拥塞的发生^[1]。这种方法治标不治本,只能在一定程度上缓解拥塞,却不能从根本上解决问题。现实中网络流量变化非常复杂,经常在一个较大的时间范围内波动^[2]。采用过量提供带宽的方法结果就是导致网络中一部分链路发生了拥塞,而另一部分链路却处在空闲状态而被浪费。而且,实际上互联网业务的快速发展导致网络建设的速度很难赶上流量增长的速度。由此可见,单纯增加链路带宽是不够的,如何在满足用户服务质量的同时使网络中的流量分布更加均匀合理,避免网络拥塞发生,是亟待解决的问题,同时也是近几年来网络研究的热点。

解决网络拥塞的方法大致分为两类:一是为分组重新选择路由。文献[3]提出了当网络发生故障时,由最靠近故障位置的节点把故障位置信息记录到分组头部并且重新计算下一跳接口,下游节点收到该分组时,根据分组头部中的故障位

置信息重新选路。这种方法需要修改分组头部信息,并需对每个分组重新计算路由,因此复杂度高,不易实现。文献[4]计算分组路径上应该经过的一些中间节点,而这些中间节点之间仍然通过最短路径优先算法计算路由。但本文提出的 N-hub 问题属于 NP 完全问题,只能求得近似解。二是提供冗余路径备份。文献[5]设定了几组不同的路由方案,当故障发生时,选择一套不经过故障点的路由方案。这种方法能够有效解决故障造成的分组丢失问题,但要求网络中节点统一管理。文献[6-7]都是为每条流选择两条不相交的主备路径,并对路径长度作了限制。这种方法得到的两条路径比较固定,不能结合网络当前的流量分布动态选择路由。

以上方法均存在如下两个问题:1)没有考虑网络流量的均衡分布,只强调路由的可达性,很容易造成新的拥塞。2)服务质量不能得到保证。服务质量主要受时延影响,时延越大用户感知越差,导致服务质量越差。时延由排队时延、发送时延和传输时延组成。路由器接口的转发速率很快,因此发送时延可以忽略。正常情况下,网络不发生拥塞时,时延的绝大部分由传输时延组成,而传输时延与路径长度成正比。因此,在重新选择路由时需将路径长度控制在一定范围内。

收稿日期:2012-03-02;修回日期:2012-05-12。

作者简介:杨晓琴(1986-),女,安徽安庆人,助教,硕士,主要研究方向:网络性能分析、网络安全;章丽芳(1973-),女,浙江临海人,讲师,硕士,主要研究方向:网络服务质量、传输控制;曹庆皇(1986-),男,江苏盐城人,工程师,硕士,主要研究方向:IPv6;孙海燕(1977-),女,江苏南京人,馆员,硕士,主要研究方向:EPON 网络通信;李卓青(1954-),女,山东海阳人,高级工程师,主要研究方向:分布式网络。

针对以上两个问题,本文提出一种路由选择算法,能够绕开带宽利用率较高的链路,有效阻止拥塞发生。同时为了保证服务质量,还对路径的长度做出一定限制。与传统方法相比,本文方法综合考虑了服务质量和流量分布两个方面,在满足服务质量要求的同时,最大限度使网络中的流量分布均衡,使网络能够提供更好的服务。

1 问题建模

网络中的流量分布是不均匀的,在某些链路发生拥塞的同时,另一部分链路可能正处于空闲状态,因此需要对某些流量选择新路由。在选择新路由的过程中需遵循两个原则:首先,保证用户的服务质量。服务质量主要受时延影响,一般情况下可简单认为,时延与流量传输的距离成正比。因此,新选择的路径长度需要限制在某一范围内以满足用户的服务质量。并且,只要路径长度满足条件,不一定选择最短的路径,因为在实际中只要路径长度在用户接受的范围内,用户的感知差别并不明显。其次,均衡网络中的流量。为了减少网络拥塞的发生,提高网络利用率,应该使网络中的流量越均衡越好。本文采用流量工程中常用的最小化最大带宽利用率(max-min)原则衡量网络中流量的均匀程度^[7]。所谓最小化最大带宽利用率原则指,当存在多种路由选择方案时,选择使网络中最大带宽利用率最小的那种方案。

用有向图 $G(V, E)$ 表示网络拓扑,其中 V 表示网络中节点的集合, E 表示链路集合。用 M, N 分别表示节点数量和链路数量,即 $M = |V|, N = |E|$ 。一条从源点 s 到终点 t 的路径 P 由一组不重复的链路 (l_1, l_2, \dots, l_n) 组成。对于 $\forall l_i \in E (1 \leq i \leq n)$ 都对应一个长度值,用 d_{l_i} 表示。路径 P 的长度 $len(P)$

为组成路径的所有链路长度值的和,即 $len(P) = \sum_{i=1}^n d_{l_i}$ 。用 w_{l_i} 表示流量经过链路 l_i 后链路的带宽利用率。路径 P 的带宽利用率 $W(P)$ 为组成该路径的各链路带宽利用率的最大值,即 $W(P) = \max\{w_{l_i} | l_i \in P\}$ 。将选择新路由问题抽象为:

在一个有向图 G 中,找到一条从源点 s 到终点 t 的路径 P ,并指定一个长度上限 D ,使其满足以下两个条件:

1) $len(P) \leq D$ 。

2) $\forall P', len(P') \leq D$, 有:

$$\max\{w_{l_i} | l_i \in P\} \leq \max\{w_{l_j} | l_j \in P'\}$$

其中:条件1)使得每条路径的长度不超过上限,保证用户服务质量;条件2)确保在满足条件1)的所有路径中,选择最大链路带宽利用率最小的路径。

2 本文算法

本文提出一种回溯算法用于解决上述问题,算法核心思想为:在有向图中,以深度优先搜索的方式找出源点与终点间所有满足长度限制条件的路径,并在这些路径中选择带宽利用率最低的路径。具体如下。

输入 有向图 G 、源点 s 、终点 t 、长度上限值 D 、节点数 M 。

输出 最短路径 P 。

Begin

Stack $stack$; //定义栈来存放当前搜索的路径

Boolean $stack[100]$; //定义数组记录节点是否可以被访问

Array U ;

//定义数组来存放所有满足长度限制的路径, $U = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$

Array W ;

//定义数组来存放数组 U 中的所有路径的带宽利用率

For $i = 0$ to M

//初始化节点状态数组都为 true,表示节点都可以访问

$stack[i] = \text{true}$;

End For

$U = \text{DFS-Path}(G, s)$;

//深度优先搜索从源点 s 到终点 t 的所有路径

$W = \text{ComputeUsage}(U)$;

//计算带宽利用率

$P = \text{SelectMinUsage}(U, W)$;

//选择带宽利用率最小的路径

Return P ;

End

其中,核心函数 DFS-Path 实现如下:

Function DFS-Path(Graph G , int v)

Begin

$stack.push(v)$;

//节点 v 入栈,表示将节点 v 加入路径

$stack[v] = \text{false}$;

//将节点 v 状态置为不可访问

int $len = \text{ComputeLength}(stack)$;

//计算栈中当前路径的长度

If $len \leq D$ then

//如果长度小于上限值 D ,则继续;否则该路径被剪枝

If $v = t$ then //如果节点 v 就是终点 t ,则表示找到一条路径

$U.AddPath(stack)$;

//将栈中路径加入数组 U

End If

For each w in AdjVex(v) //对节点 v 的每一个邻接节点 w

If $states[w] = \text{true}$ then

//如果节点 w 可以访问

DFS-Path(G, w);

//深度优先搜索从节点 w 到终点 t 的路径

End If

End For

$stack.pop(v)$;

//节点 v 出栈,表示将节点 v 从路径中去掉

For each w in AdjVex(v) //对节点 v 的每一个邻接节点 w

$states[w] = \text{true}$;

//如果节点 v 出栈,将其所有的邻接节点 w 的状态都置为 true,

//保证邻接节点 w 可以从其他路径被访问

End For

End If

Return U ;

//返回所有路径

End

上述算法中使用栈 $stack$ 来存放当前深度优先搜索的路径,并用数组 $states$ 来记录节点状态,表示节点是否可以访问。

算法时间复杂度主要包括两个部分:

1) 深度优先搜索所有路径。假设用邻接矩阵存储图 G ,最坏情况下遍历过程中所有路径均满足剪枝条件,其时间复杂度为 $O(N^2)$ 。

2) 查找带宽利用率最低的路径,该步骤时间复杂度为 $O(N)$ 。

综上所述,算法总体的时间复杂度为 $O(N^2)$ 。

实际中,为便于管理一般将较大网络划分为较小的自治系统(Autonomous System, AS),自治系统内部再划分为更小的区域(Area),区域内的节点数一般不会太多,很多路由协议也限制跳数(如 RIP 路由协议限制跳数为 15,即网络中不应超过 15 个节点)。另一方面,随着设备硬件水平的发展,路由器内部的处理时延极短,与传输时延相比,可以忽略。通过以上分析可知,算法的计算量和时延对网络的影响较小。

3 实验仿真

为了尽可能反映算法的实际效果,实验采用真实的美国 Abilene2 网络拓扑^[8]来仿真。如图 1 所示,Abilene2 网络共有 12 个节点和 30 条链路,分布在美国 11 个城市中,其中

Atlanta 市有 2 个节点。在 30 条链路中,除了 Atlanta 与 Indianapolis 之间双向链路的带宽都是 2.5 Gbps 外,其余 28 条链路带宽都是 10 Gbps,具体如表 1 所示。

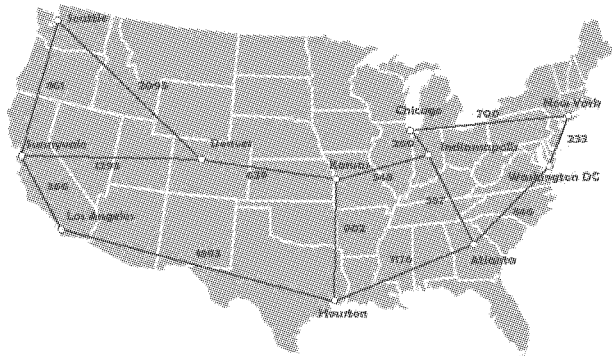


图 1 Abilene2 网络拓扑

表 1 Abilene2 网络的链路及带宽

起点	终点	带宽/Gbps
Atlanta1	Atlanta2	10.0
Atlanta2	Atlanta1	10.0
Atlanta1	Houston	10.0
Atlanta1	Indianapolis	2.5
Atlanta1	Washington, DC	10.0
Houston	Atlanta1	10.0
Houston	Kansas City	10.0
Houston	Los Angeles	10.0
Indianapolis	Atlanta1	2.5
Indianapolis	Chicago	10.0
New York	Chicago	10.0
New York	Washington, DC	10.0
Denver	Kansas City	10.0
Denver	Sunnyvale	10.0
Denver	Seattle	10.0
Indianapolis	Kansas City	10.0
Washington, DC	Atlanta1	10.0
Washington, DC	New York	10.0
Kansas City	Denver	10.0
Kansas City	Houston	10.0
Kansas City	Indianapolis	10.0
Los Angeles	Houston	10.0
Los Angeles	Sunnyvale	10.0
Chicago	Indianapolis	10.0
Chicago	New York	10.0
Sunnyvale	Denver	10.0
Sunnyvale	Los Angeles	10.0
Sunnyvale	Seattle	10.0
Seattle	Denver	10.0
Seattle	Sunnyvale	10.0

为了验证算法在网络拥塞或链路带宽高利用率情况的性能,采用了文献[9]提出的实验方法:向网络中不断地注入静态流,直到网络中某条链路带宽利用率达到 100%,从而出现拥塞现象。静态流是指一旦被注入网络中就一直占用链路带宽直至到实验结束的流^[10]。流的源点从节点 Seattle、Sunnyvale 和 Los Angeles 中随机选取,同样流的终点随机从节点 Chicago、New York 以及 Washington, DC 中选择,流的大小服从区间(1, 3)的均匀分布。仿真实验程序用 Java 语言实现。

实验中,选取了其他两种算法作为对比,分别是 SP 最短路径优先算法^[11]和 N-hub 最短路径算法,并从以下 3 个方面进行对比:1)网络所能承受流的个数;2)最大流长;3)平均流长。网络中承受流的个数能够反映网络资源的利用率以及流量分布的均匀程度,流个数越多流量越大分布越合理^[12]。流长反映用户服务质量及用户感知,长度越小越好。另外,选择最短路径长度的 1.2 倍和 1.5 倍分别作为本文算法的路径长度上限 D 。每种算法分别做 30 次实验。

从图 2 承载流个数的曲线可看出,SP 算法中流个数最少,这是因为 SP 算法只考虑路径长度最小,而没有让流量分布均匀,使得某些链路过于拥挤,导致所能加入的流个数较少。而本文算法同时考虑路径长度和流量分布两个因素,在路径长度允许的范围内选择带宽利用率最小的链路,使网络中的流量分布更均匀。当路径长度上限为最短路径 1.2 倍时,承载流个数已明显好于 SP 算法,仅次于 N-hub 算法。随着路径长度上限增加到 1.5 倍,所承载流个数已达到 SP 算法的两倍,且远远高于 N-hub 算法。

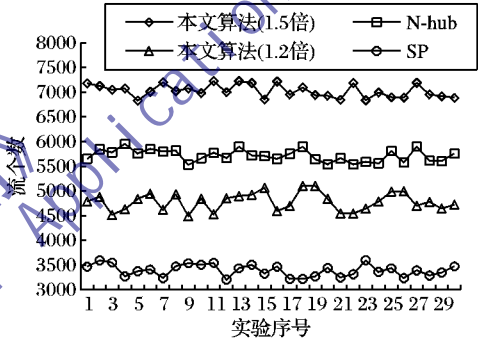


图 2 承载流个数对比

图 3 和图 4 分别是最大流长和平均流长对比曲线图,从中可看出,当 D 较小时,本文算法的路径长度与 SP 最短路径算法接近,尤其是在最大流长方面,两者几乎一致。随着路径长度上限的增加,算法的路径长度也增加,最终略低于 N-hub 算法。

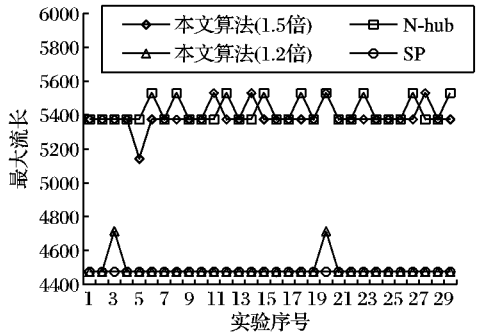


图 3 最大流长对比

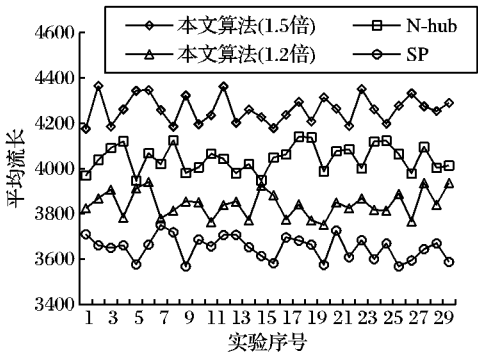


图 4 平均流长对比

综上所述,本文算法是一种比 SP 算法和 N-hub 算法更适合实际网络的路由调整算法。通过灵活对算法调整不同的参数,可以使算法更能适合复杂的实际网络。对于下载类等时延要求不高的业务,可以调高路径长度上限值 D ,从而使网络中的流量更趋于均匀;而对于视频、聊天等实时性较高的业务,可以设置较小的路径长度上限值 D 来降低时延,提高用户的感知。另外,算法对路径选择的更新周期可参考实际网络中已有的路由协议,如 RIP 协议默认更新周期是 30 s,OSPF 协议默认是 10 s,同时可通过手动设置方式满足不同网络要求。

4 结语

由于网络拓扑的复杂性以及路由协议固有的缺陷,造成某些链路会发生拥塞,而另外一部分链路会处于空闲状态,网络流量分布不均匀。这样的结果是服务质量越来越差,同时网络可利用率极差。现有的路由调整算法都不够全面,仅仅考虑单个方面,很难满足实际需要。

本文提出一种路由选择算法,充分考虑服务质量和流量分布两个因素,在满足用户服务质量的前提下,尽可能使网络中的流量分布均匀,提高网络可利用率。仿真实验结果表明,该算法能够在保证路径长度在一定范围的基础上,提高网络所能容纳的流量,使流量分布更加均匀。

实际中,由于网络中流量巨大且受网络设备硬件条件限制,不可能对每条流都应用路由选择算法,而应有选择地调整。但本文未对使用该算法的流对象做过多研究,下一步工作就是识别出网络中容易造成拥塞的大流或者汇聚流,通过应用本文算法使网络流量分布更加均匀。

参考文献:

- [1] NOVAK D C. Managing bandwidth allocations between competing recreational and non-recreational traffic on campus networks [J]. *Decision Support Systems*, 2008, 45(2): 338 - 353.
- [2] MARINO P P, MANRUBIA B G, PARDO R A. Multi-hour network planning based on domination between sets of traffic matrices [J]. *Computer Networks*, 2011, 55(3): 665 - 675.
- [3] LAKSHMINARAYANAN K, CAESAR M, RANGAN M, *et al.* Achieving convergence-free routing using failure-carrying packets [C]// *Proceedings of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. New York: ACM Press, 2007: 241 - 252.
- [4] COHEN R, NAKIBLY G. On the computational complexity and effectiveness of N-hub shortest path routing [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 691 - 704.
- [5] KVALBEIN A, HANSEN A F, CICIC T, *et al.* Fast IP network recovery using multiple routing configurations [C]// *INFOCOM 2006: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 1 - 11.
- [6] ORDA A, SPRINTSON A. Efficient algorithms for computing disjoint QoS paths [C]// *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 738.
- [7] ASSI C, HUO W, SHAMI A. Multiple link failures survivability of optical networks with traffic grooming capability [J]. *Computer Communications*, 2006, 29(18): 3900 - 3912.
- [8] ZHANG Y. 6 months of Abilene traffic matrices [EB/OL]. [2011-10-08]. <http://www.cs.utexas.edu/~yzhang/research/A-bileneTM/>.
- [9] QIN TAO, GUAN XIAOHONG, LI WE, *et al.* Monitoring abnormal network traffic based on blind source separation approach [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(5): 1732 - 1742.
- [10] SHARAFEDDINE S, DAWY Z. Robust network dimensioning for realtime services over IP networks with traffic deviation [J]. *Computer Communications*, 2010, 33(8): 976 - 983.
- [11] HE YONG, HE JU, ZHU DAOLI, *et al.* Traffic network equilibrium with capacity constraints and generalized Wardrop equilibrium [J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2010, 11(5): 4248 - 4253.
- [12] LIN Y K. Evaluate the performance of a stochastic-flow network with cost attribute in terms of minimal cuts [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(5): 539 - 545.
- [13] 朱燕民,李明禄,倪明选. 车辆传感器网络研究 [J]. *中兴通讯技术*, 2009, 15(5): 28 - 32.
- [14] 郑增威. 车辆无线传感器网络与智能交通 [J]. *信息化建设*, 2009(12): 21 - 22.
- [15] 陈立家,江昊,吴静,等. 车用自组织网络传输控制研究 [J]. *软件学报*, 2007, 18(6): 1477 - 1490.
- [16] 常促宇,向勇,史美林. 车载自组网的现状与发展 [J]. *通信学报*, 2007, 28(11): 116 - 126.
- [17] ZHANG WENSHENG, CAO G, PORTA T L. Data dissemination with ring-based index for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(7): 832 - 847.
- [18] HAN K-H, KO Y-B, KIM J-H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks [C]// *VTC 2004: Proceedings of the 59th IEEE International Conference on Vehicular Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004, 4: 2979 - 2983.
- [19] 郑明才,张大方,赵小超. MHR 无线传感器网络梯度场动态调整策略 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(8): 83 - 86.
- [20] HAERRI J, FILALI F, BONNET C. Mobility models for vehicular Ad Hoc networks: a survey and taxonomy [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2009, 11(4): 19 - 41.
- [21] ZHAO J, CAO G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad Hoc networks [C]// *INFOCOM 06: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 1 - 12.
- [22] 苏金树,胡桥林,赵宝康,等. 容延容断网络路由技术 [J]. *软件学报*, 2010, 21(1): 119 - 132.
- [23] 李向群,刘里祥,胡晓惠,等. 延迟/中断可容忍网络研究进展 [J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(8): 1270 - 1277.
- [24] YI S, HEO J, CHO Y, *et al.* PEACH: Power-efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks [J]. *Computer Communication*, 2007, 30(14): 2842 - 2852.
- [25] 郑明才,赵小超,赵晋琴,等. 基于定向扩散的车辆传感器网络连通性研究 [J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(1): 266 - 269.
- [26] LAI Y-C, LIN P, LIAO W J, *et al.* A region-based clustering mechanism for channel access in vehicular Ad Hoc networks [J]. *IEEE Journal on Communications*, 2011, 5(11): 1619 - 1631.

(上接第 2421 页)

更好的距离信息获取途径将是下一步的主要研究内容。

参考文献:

- [1] 朱燕民,李明禄,倪明选. 车辆传感器网络研究 [J]. *中兴通讯技术*, 2009, 15(5): 28 - 32.
- [2] 郑增威. 车辆无线传感器网络与智能交通 [J]. *信息化建设*, 2009(12): 21 - 22.
- [3] 陈立家,江昊,吴静,等. 车用自组织网络传输控制研究 [J]. *软件学报*, 2007, 18(6): 1477 - 1490.
- [4] 常促宇,向勇,史美林. 车载自组网的现状与发展 [J]. *通信学报*, 2007, 28(11): 116 - 126.
- [5] ZHANG WENSHENG, CAO G, PORTA T L. Data dissemination with ring-based index for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(7): 832 - 847.
- [6] HAN K-H, KO Y-B, KIM J-H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks [C]// *VTC 2004: Proceedings of the 59th IEEE International Conference on Vehicular Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004, 4: 2979 - 2983.
- [7] 郑明才,张大方,赵小超. MHR 无线传感器网络梯度场动态调