

基于重叠社团划分的大规模道路网络双层路由算法

杨旭华 周诗杰

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 大规模道路网络中的最短路径快速搜索算法在交通系统的导航、交通分配等方面具有广泛的应用。现有的几种分层算法虽然在计算性能上比传统的算法有所改善,但仍存在计算量较大和计算效率较低等问题。提出了基于重叠社团划分的大规模道路网络双层路由算法,该算法在道路网络中探测基于重叠社团的分层结构,将整个网络划分为若干具有重叠节点的社团,并由此构成路网的双层结构:第一层为原始道路网络,第二层为社团连接逻辑层,其中的每一个点对应第一层的一个社团,第一层社团间的重叠节点和道路连接对应第二层节点间的连接。在此网络架构下,路由被分解为第二层社团节点间启发式的总体路由和第一层社团内部节点的局域路由。该算法提出将社团间的重叠节点作为相应两个社团之间的关键路由节点,并将其引入到基于社团的分层路由算法当中,可以有效地降低算法的搜索空间和计算复杂度,有效地提高了算法效率。几个真实城市路网的实验结果表明了本算法的有效性。

关键词 重叠社团,双层路由,大规模道路网络

中图法分类号 N94,TP393 文献标识码 A

Double Layers Routing Algorithm on Large Road Networks Based on Overlapping Communities Detecting

YANG Xu-hua ZHOU Shi-jie

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract The fast searching algorithms of shortest path on large road network have wide application in navigation, transportation system, traffic assignment, etc. Although the calculated performance in several existing hierarchical algorithms has been improved, there are still some problems such as heavy computation and low calculation efficiency. By detecting the hierarchical structure based on overlapping communities, we proposed a new hierarchical routing algorithm using overlapping communities. We divided the whole network into communities containing the overlapping nodes and constituted a double-layer structure of road network. The first layer contains the original road network nodes and in the second layer the communities are regarded as nodes, the overlapping nodes and intercommunity edges are regarded as the edges. Based on the network architecture, routing is broken into two processes, the heuristic overall routing in the second layer and local routing in the communities in the first layer. We denoted the overlapping node as the key routing node and used it into the hierarchical algorithms which can reduce the searching space and computational complexity effectively. Several experimental results of the real city road networks show the effectiveness of the algorithm.

Keywords Overlapping community, Double-layer routing, Large road networks

1 引言

在实际生活中,我们每天都在处理路由问题。当需要用最小的代价到达目的地时,我们会综合考虑路程所要占用的时间、安全性和花费的成本。在网络中,路由问题对应的就是最短路径问题。早期已有的查找最短路径的算法包括 Dijkstra 算法^[1]、A* 算法^[2]等,但其在大规模网络中路由花费的计算和存储量太大,不具有很好的实时性。

当前比较有效的方法是提前计算并保存路由节点,在路由选择的过程中,通过这些路由节点信息来减少搜索的空间,降低计算的复杂度,以达到提高网络系统路由实时性的目的。采用分层的方法^[3]就是其中一种比较有效的策略,尤其在大规模道路网络中的路径规划或导航系统中有许多有价值的应

用。其思想就是将网络划分成多个区域^[4-9],每个区域包含一定数量的边缘节点,其内部节点数连接比较紧密,区域之间的连接比较稀疏,将原始网络作为底层,每个区域作为 1 个点,区域之间的连接作为这些点之间的连边,来构成高层逻辑网络。在这样的双层网络结构中,路由算法将按照先在高层宏观路由,再在低层微观路由的方法进行,该方法有利于降低算法复杂度,从而具有较好的实时性能。由此可见,区域的有效划分对整个网络的路由搜索起到至关重要的作用,复杂网络中社团探测算法为大规模道路网络中区域的划分提供了良好的技术手段。

社团结构^[10]广泛存在于大规模复杂网络中,社团内部节点之间的连接比较紧密,社团之间的连接相对来说却比较稀疏。近些年来,研究人员提出了大量有关社团划分的算法。

本文受国家自然科学基金(61374152)资助。

杨旭华(1971—),男,博士,教授,主要研究领域为复杂网络、交通网络、智能交通、数学规划和神经网络等;周诗杰(1990—),男,硕士生,主要研究领域为复杂网络、智能交通。

GN 算法^[11]由 Girvan 和 Newman 提出,是一种代表性的分裂算法。算法的具体流程是:采用某种度量方法计算网络中各节点的相似性,例如边介数;根据度量方法的不同将连接相似程度最大或最小节点的边从网络中移除,重新计算剩余网络中各节点的相似程度;重复以上步骤直到网络中没有边可以移除。除了 Newman 提出的一些算法外,还有其他的社团检测的算法,比如图分割^[12]、谱分析^[13,14]、MOCD-PSO^[15]、模块密度^[16]等。事实上,许多真实网络并不存在绝对的彼此独立的社团结构,相反,它们是由许多彼此重叠互相关联的社团构成的。即一个社团可能存在于另一个社团内部,还有一种情况就是网络中的一个节点可能同时属于不同的社团。重叠社团的发现更加具有现实意义。例如,一个人可能同时参与多个团体组织,而在科学家合作网络中,一个物理学家同时也可能是一个数学家,在社交网络中,一个人拥有一个家庭、朋友圈和工作圈等,在这些圈子里,这个个人就是一个重叠的社团。所以,研究复杂网络的重叠社团特性对真实网络结构的研究具有重要意义。而且,越来越多的学者已经提出了很多检测社团重叠的算法,例如基于渗流的技术^[17]、局部优化^[18]、聚类^[19-21]、两段策略算法^[22]等。

彼此重叠社团的重叠节点因为同时属于两个社团,往往是这两个社团联系的关键节点,同时也很可能是这两个社团的关键路由节点,因此本文将重叠社团算法引入到网络的路由中,通过将道路网络进行社团划分和重叠检测,来构建道路网络的双层结构:第一层为原始道路网络,第二层为社团连接逻辑层,其中第二层的每一个点对应第一层的一个社团,第一层社团间的重叠节点和道路连接对应第二层节点间的连接。在此网络架构下,路由被分解为第二层社团节点间的总体路由和第一层社团内部节点的局域路由。该算法提出将社团间的重叠节点作为相应两个社团之间的关键路由节点,并将其引入到基于社团的分层路由算法^[23]当中,可以有效地降低算法的搜索空间和计算复杂度,提高算法的搜索效率。

2 构建基于重叠社团划分的道路网络双层结构

2.1 模型定义

本文用图 $G=(V,E,W)$ 来表示道路网络, V 表示道路网络交叉路口的点集, E 表示道路的边集, W 表示边的权值,在道路网络中 W 为道路的距离。图 1 表示了一个道路网络模型 G 。

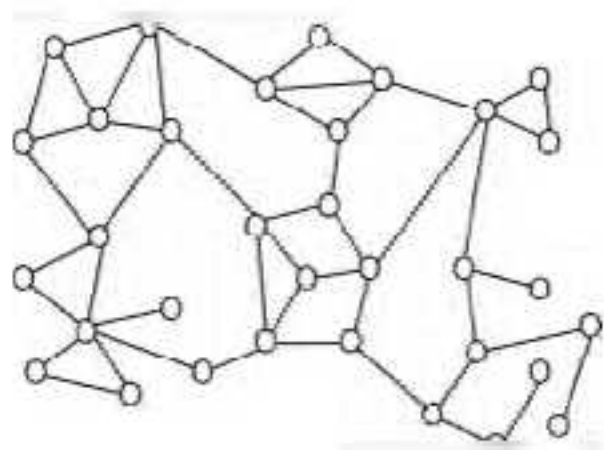


图 1 原始道路网络模型

2.2 社团划分

通过一种快速社团划分方法^[24],对道路网络进行社团划分,初始化每个节点为单一社团,对任意社团计算其相邻社团的函数模块化度,其定义为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{v,w} [A_{vw} - \frac{K_v K_w}{2m}] \delta(C_v, C_w) \quad (1)$$

其中, v,w 表示网络中的两个节点; A_{vw} 表示网络的邻接矩阵,如果节点 v,w 相连,那么 A_{vw} 为 1;如果节点 v,w 不相连,那么 A_{vw} 为 0; $m = \frac{1}{2} \sum_{v,w} A_{vw}$ 表示网络中边的数量; $k_v = \sum_w A_{vw}$ 表

示节点 v 的度, $k_w = \sum_v A_{vw}$ 表示节点 w 的度;当节点 v,w 属于同一个社团时 $\delta(C_v, C_w)$ 为 1,否则为 0;将该社团和 Q 值最大的相邻社团合并为一个社团,重复这一过程直到 Q 值不再增加为止;接着,将每个社团映射为 1 个节点,社团之间的连接映射为新节点之间的边,其边权为社团间连边的数量,从而构成一个新的网络,对此新网络再次应用上述社团划分方法,直到 Q 值不再增加为止,此时,新网络划分为若干社团,其中每个社团分别对应于原始道路网络中的一个较大社团。图 2 示出了经过社团划分后的网络具有社团结构,每个社团中用圆圈进行划分,划分成 6 个社团用 $C1-C6$ 表示。

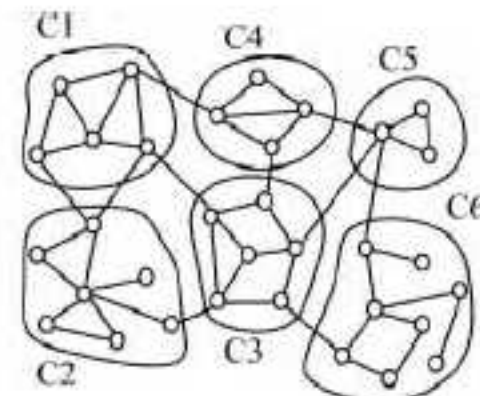


图 2 社团检测后形成的网络结构,每个社团中用圆圈进行划分

2.3 社团重叠检测

采用社团重叠检测算法^[25],在社团的边缘节点当中检测社团重叠节点,计算扩展的社团模块度函数值,其定义为:

$$Q' = \frac{1}{2m} \sum_{k=1}^c \sum_{i,j \in c_k} \frac{1}{O_i O_j} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \quad (2)$$

其中, i,j 表示网络中的两个节点; A_{ij} 表示网络的邻接矩阵,如果节点 i,j 相连,那么 A_{ij} 为 1;如果节点 i,j 不相连,那么 A_{ij} 为 0; $m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij}$ 表示网络中边的数量; $k_i = \sum_j A_{ij}$ 表示节点 i 的度, $k_j = \sum_i A_{ij}$ 表示节点 j 的度, O_i 和 O_j 分别表示节点 i 和 j 各自属于多少个社团; c 表示网络中的社团数; k 表示社团编号($1 \leq k \leq c$),检测边缘节点移除或者增加到相邻社团中对整个社团的扩展模块度函数值 Q' 的影响程度。在原有的网络中找出社团边缘节点中的重叠节点,并保存到重叠节点 OC 表中。图 3 示出了社团经过重叠检测后,找到社团的边缘节点中存在一些重叠节点,重叠节点用黑色实心圆点表示。

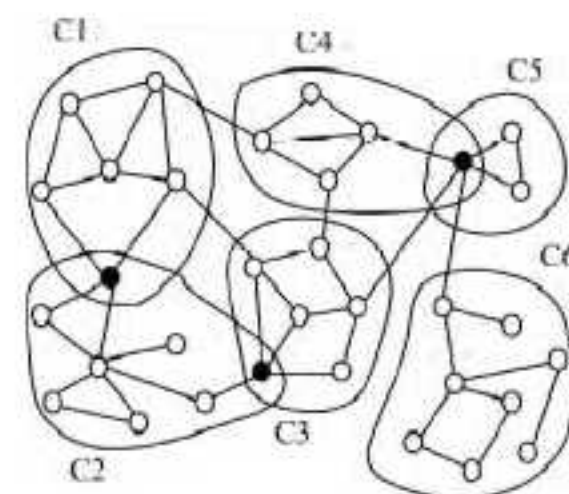


图 3 经过社团重叠检测,找到重叠社团,用黑色实心圆点表示

2.4 构建双层网络结构

通过重叠社团检测,可以将整个网络划分为多个具有重叠节点的社团,并由此构成路网的双层结构:第一层为原始道路网络,第二层为社团连接逻辑层,其中第二层的每一个点对应第一层的一个社团,第一层社团间的重叠节点和道路连接对应第二层节点间的连接,图 4 示出了经过重叠检测后社团抽象为节点构成的社团连接逻辑层,一个空心圆节点表示一个社团。

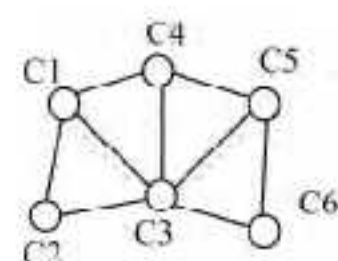


图 4 将社团抽象成一个节点,构建社团连接逻辑层

3 基于重叠社团划分的双层路由选择算法(OCHR算法)

3.1 预处理

在对双层网络模型进行路由选择之前,需要构建社团边缘节点距离 B 表和社团地理中心距离 P 表。第一层网络中的局域路由通过 B 表可以进行快速路由;通过 P 表,在路由的过程中,可以采用启发式的搜索,以减少搜索空间,提高搜索速度。

3.1.1 构建社团边缘节点距离 B 表

采用Dijkstra算法计算每个社团中的边缘节点对之间的最短距离,并保存在 B 表中。例如图5中节点1和节点3不存在一条直接相连的实边,而图6中节点1和节点3有一条虚边,该虚边记录节点1到节点3经过的最短路径。通过构建社团边缘节点距离表,原本需要访问的42个节点压缩成28个,大大减少了访问的节点数。

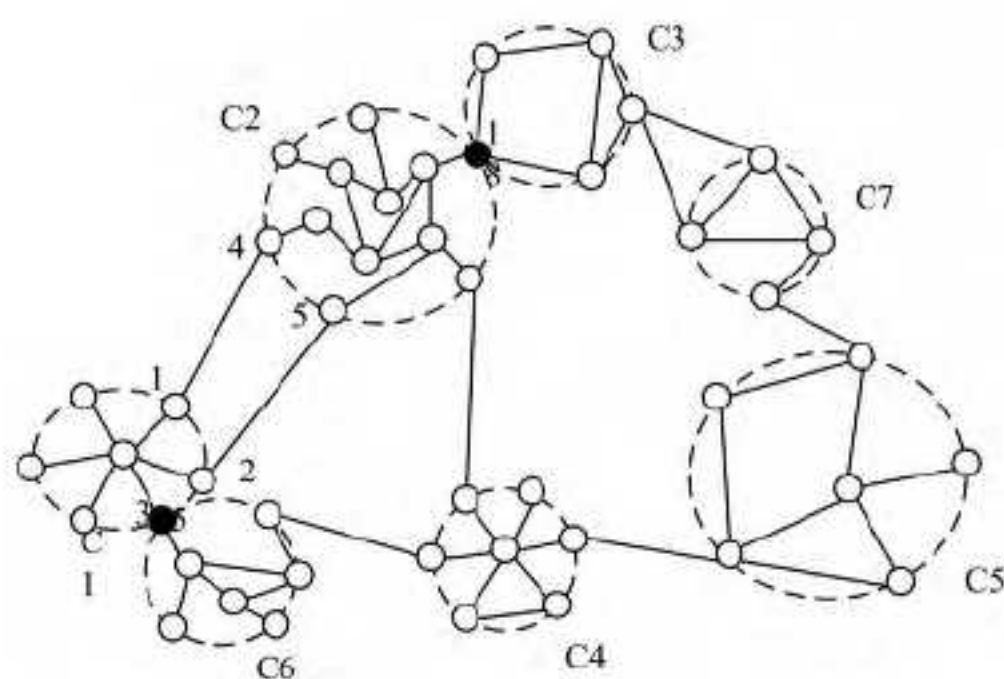


图5 原始的道路网络模型 G ,包含社团 $C1-C7$,实线边表示两个节点存在真实的边

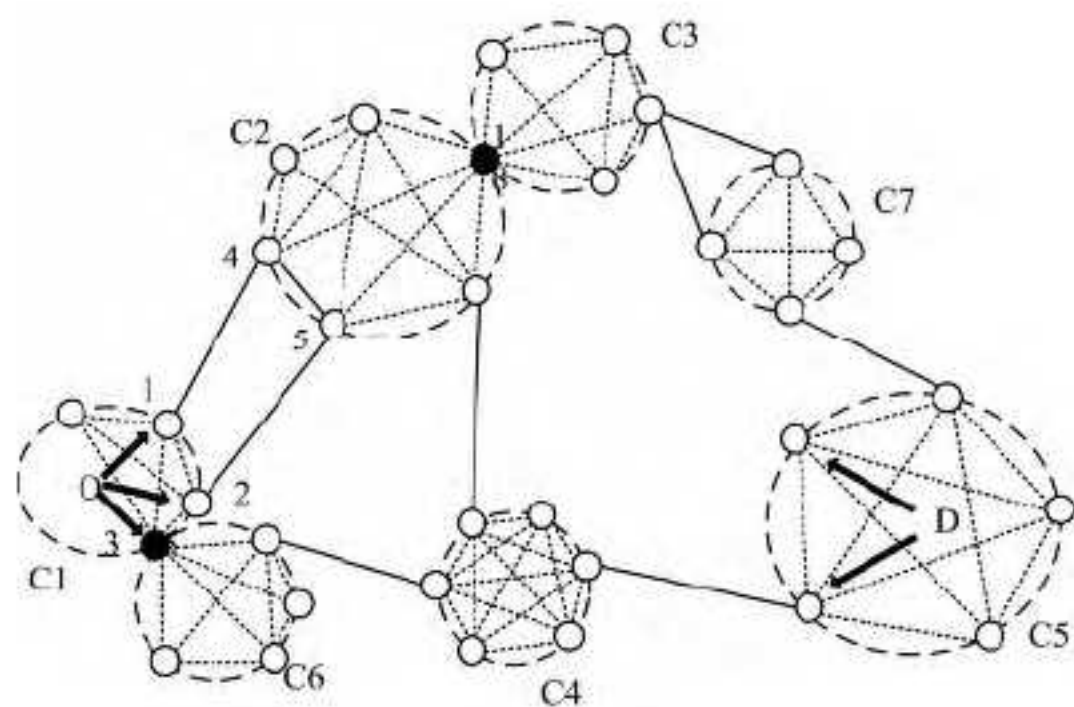


图6 社团连接逻辑层 G 由社团 $C1-C7$ 组成,虚线边表示社团边缘两个节点已经计算得到的最短路径

3.1.2 构建社团地理中心距离 P 表

从真实的道路网络可知,道路网络节点都有相应的坐标。首先,我们定义社团的中心地理坐标,为:社团内所有节点的坐标和的平均值。通过计算,可以得到社团的中心地理坐标。再由社团的中心地理坐标计算社团对之间的距离并将其保存在 P 表中。在做路由选择时,可以通过社团之间的地理中心距离来选择下一步需要访问的社团。

3.2 分层路由选择

3.2.1 出发节点 O 点和目的节点 D 点在同一个社团

做路由选择时,对任意的两个节点计算其路由,如果 O 和 D 节点在同一个社团中,而且均在社团边缘,则直接从社团内部边缘节点距离表 B 中查询得到最优路径;如果 O 和 D 节点在同一个社团中,且不同时在社团边缘,则通过Dijkstra算法计算得到最短路径。

3.2.2 出发节点 O 点和目的节点 D 点不在同一个社团

由于 O 和 D 节点在道路网络中的距离可能非常长,搜索 OD 点之间的最优路径可能涉及到非常多的节点,从而导致很高的算法复杂度。因此,为了减少搜索的空间,提高搜索速度,算法采用启发式的过程来进行双向路由选择,即算法同时从 O 和 D 点出发寻找通向对方的最佳路由,搜索双方会在中途相遇,从而获取最优路由。首先定义当前访问的社团为父社团,下一步将要访问的社团为子社团,子社团对表示双向查找中分别挑选与父社团相邻的其中一个社团,其目的是在做双向路由时,把 O 和 D 双向出发的父节点的邻居节点之间最短距离作为启发式信息,如图6中, O 点在 $C1$, D 点在 $C5$ 。 $C1$ 相邻的社团是 $C6$ 和 $C2$, $C5$ 相邻的社团是 $C7$ 和 $C4$,则包含的子社团对为 $(C2,C7)$, $(C2,C4)$, $(C6,C4)$, $(C6,C7)$,然后在做路由选择时每次挑选不大于 α 的子社团对,并且要满足挑选的 α 对子社团的地理中心距离是所有子社团对中最小的。设定 α 的值为2,每次挑选的子社团对数不能超过2,因此,我们挑选的子社团对为 $(C2,C4)$ 和 $(C6,C4)$ 。因为在双向路由选择时,向前搜索和向后搜索的过程是一样的,所以这里只介绍向后搜索的过程。

Step1 选择距离最小的 α 对子社团对,确定子社团,在图6中,父社团为 $C1$,将要访问的子社团为 $C2,C6$;

Step2 在 $C1$ 和 $C2$ 中,查找 OC 表,它们之间没有重叠节点,先确定 $C1$ 和 $C2$ 之间的相邻边 $\langle 1,4 \rangle$ 和 $\langle 2,5 \rangle$,分别用Dijkstra算法计算节点 O 到节点2和节点0到节点1的最短距离,之后遍历 $C1$ 和 $C2$ 之间的距离是否小于之前访问时记录的距离(一开始未访问时,两社团之间的距离无限大),若小于,则修改 $C1$ 和 $C2$ 之间的最小距离;

Step3 在 $C1$ 和 $C6$ 中,查找 OC 表,发现存在重叠节点(图6中节点3)。在做路由选择时,直接通过重叠节点进行路由;

Step4 确定父社团为 $C2$ 和 $C6$ 后,就可以知道下一步将要访问的子社团为 $C3$ 和 $C4$;当访问 $C3$ 和 $C4$ 时, $C2$ 和 $C6$ 就作为前驱社团(前驱社团表示当前访问社团的父社团),重复上述过程,并扫描当前访问社团的边缘节点,通过 B 表快速查找到两个节点之间的最短距离;

Step5 若下一步需要访问的社团不存在,则返回前驱社团,重新进行子社团的选择;整个过程主要集中在Step4中,在进行双向路由选择时,双向搜索过程发生碰撞表示 O 和 D 节点之间的一条路径确定,设定 β 值来表示发生 β 次碰撞后整个搜索过程结束。实验结果证得在平衡搜索效率和精度上, $\alpha \in (2,6)$, $\beta \in (\alpha, 3\alpha)$ 为最佳值。最后我们从 β 条路径中挑选其中最短的一条为 O 和 D 节点最佳路径。

4 实验

为了定量的比较本文提出的算法与以往路由算法在性能上的优劣,分别从社团重叠检测前社团数量和检测后包含的重叠节点数、路由算法的执行时间、路由结果的比率3方面出发,针对多个城市道路数据^[26]进行对比实验。实验环境为:处理器 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU@2.50GHz,内存4G,硬盘500G,操作系统 WIN7,编程语言为 python。

4.1 社团重叠检测

对实际多个美国城市道路网络进行实验,结果如表1所列。表1中包含3列数据,第一列是实验对象,即实验的城市道路网络,第二列是社团重叠检测前城市道路网络包含的社

团数,第三列是社团重叠检测后城市道路网络中包含的重叠节点数。可以看到,经过重叠检测后,城市道路网络中所拥有的重叠节点的数量比重很大。在实际的路由选择中,重叠节点就是第二层社团连接逻辑层的总体路由关键节点,通过先找重叠节点,可以快速地进行路由选择,有效地降低算法的复杂度。

表 1 美国各大城市重叠检测前社团数和检测后拥有的重叠节点数

城市	重叠检测前 (社团数)	重叠检测后 (重叠节点数)
New York	423	112
San Francisco Bay Area	643	209
Colorado	1119	298
Florida	3125	1013
California and Nevada	6783	1953

4.2 路由算法执行时间

本文提出的算法主要是应用在实时道路网络中,算法的执行时间是衡量该算法是否有效的最好方式。这里的执行时间是我们开始进行路由选择的时间,不包括我们前期的预处理时间。本文通过 3 种路由算法:OCHR 算法、Dijkstra 算法和 A* 算法在城市道路网络中的应用,分别计算在相同的始末节点条件下,寻找一条最短路径所执行的时间。由表 2 可知,通过 5 组测试数据,本文提出的 OCHR 算法在执行时间上比其他两种算法要短,在速度上远远快于其他两种算法,而且平均快 2~4 倍。

表 2 OCHR 算法与以往路由算法的执行时间比较(s)

算法	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5
OCHR	0.014	0.062	0.136	0.241	0.312
Dijkstra	0.038	0.246	0.549	0.768	0.811
A*	0.029	0.181	0.473	0.675	1.476

4.3 路由结果的比率

路由结果的比率是衡量该算法有效性的一个重要指标。以 Dijkstra 算法得到的最短路径结果作为基准,将 OCHR 算法和 A* 算法得到的结果分别与之对比,得到的比值即为路由结果的比率。比率越小说明得到的结果越好,相比 Dijkstra 算法,得到的最短路径越短。本文通过这 3 种路由算法在城市道路网络中的应用,分别计算在相同的始末节点条件下,最短路径的权值和,再进行比率计算。由表 3 可知,通过 5 组测试数据的比较,本文提出的 OCHR 算法在提高搜索速度的同时,可以保证路由结果的比率在[0.8,1.2]之间浮动。

表 3 基于 Dijkstra 算法路由结果的比率

算法	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5
OCHR	0.862	1.093	0.856	1.174	0.928
A*	1.126	0.934	0.763	0.973	1.395
Dijkstra	1	1	1	1	1

结束语 在大规模道路网络中,通过分层的路由策略,可以有效地降低搜索空间和计算量,从而达到网络系统路由实时性的目的。为了将网络结构进行有效的划分,构造分层网络模型,社团方法的引入很好地解决了网络结构划分的难题。而在分层的模型结构中,保存有效的路由节点,可以进一步提高搜索效率。本文提出基于社团重叠检测的方法,进一步构建双层路由结构,将重叠节点作为启发式的总体路由的关键节点,社团边缘节点作为局域路由的关键节点,提升了原有的基于社团划分的路由算法效率。最后,实验证得,本文提出的算法能够有效地降低搜索空间和计算复杂度,并且有效地提

高了算法的效率。当然,该算法仍需不断改进,主要从以下方面进行:(1)引入或者提出更加有效的社团重叠检测方法,使网络分层结构更加精确;(2)选择更为有效的路由策略。

参考文献

- [1] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische mathematik, 1959, 1(1): 269-271
- [2] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107
- [3] Song Q, Wang X. Efficient routing on large road networks using hierarchical communities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 132-140
- [4] Geisberger R, Sanders P, Schultes D, et al. Exact routing in large road networks using contraction hierarchies[J]. Transportation Science, 2012, 46(3): 388-404
- [5] Abraham I, Dellinger D, Goldberg A V, et al. Hierarchical hub labelings for shortest paths[M]// Algorithms-ESA 2012. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 24-35
- [6] Gubichev A, Bedathur S, Seufert S, et al. Fast and accurate estimation of shortest paths in large graphs[C]// Proceedings of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. ACM, 2010: 499-508
- [7] Bauer R, Dellinger D, Sanders P, et al. Combining Hierarchical and Goal-Directed Speed-Up Techniques for Dijkstra's Algorithm [J]. ACM JEA, 2010, 15(2/3): 1-31
- [8] Jin R, Ruan N, Xiang Y, et al. A highway-centric labeling approach for answering distance queries on large sparse graphs[C]// Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2012: 445-456
- [9] Kriegel H P, Renz M, Schubert M. Route skyline queries: A multi-preference path planning approach[C]// 2010 IEEE 26th International Conference on Data Engineering (ICDE). IEEE, 2010: 261-272
- [10] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826
- [11] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826
- [12] Yang J, Leskovec J. Defining and evaluating network communities based on ground-truth[C]// Proceedings of the ACM SIGKDD Workshop on Mining Data Semantics. ACM, 2012: 3
- [13] Fortunato S, Castellano C. Community structure in graphs [M]// Computational Complexity. Springer New York, 2012: 490-512
- [14] Mucha P J, Richardson T, Macon K, et al. Community structure in time-dependent, multiscale, and multiplex networks[J]. Science, 2010, 328(5980): 876-878
- [15] 黄发良, 张师超, 朱晓峰. 基于多目标优化的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2013, 24(9): 2062-2077
- [16] 付立东, 高琳. 模块密度谱分的网络社团发现方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 916-290
- [17] Xie J, Szymanski B K, Liu X. Slpa: Uncovering overlapping communities in social networks via a speaker-listener interaction dynamic process[C]// 2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). IEEE, 2011: 344-349
- [18] Havemann F, Heinz M, Struck A, et al. Identification of overlapping communities and their hierarchy by locally calculating com-

- munity-changing resolution levels[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2011, 2011(1): P01023
- [19] 刘玉华, 张翼, 徐翠, 等. 一种基于数据场的复杂网络聚类算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 70-73, 93
- [20] Sun P G, Gao L, Shan Han S. Identification of overlapping and non-overlapping community structure by fuzzy clustering in complex networks[J]. Information Sciences, 2011, 181(6): 1060-1071
- [21] 杨博, 刘大有, Liu Ji-ming, 等. 复杂网络聚类方法[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 54-66
- [22] 陈端兵, 尚明生, 李霞. 重叠社区发现的两段策略[J]. 计算机科

学, 2013, 40(1): 225-228

- [23] Song Q, Wang X. Efficient routing on large road networks using hierarchical communities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 132-140
- [24] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008, 10(10): P10008
- [25] Wang X, Jiao L, Wu J. Adjusting from disjoint to overlapping community detection of complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388(24): 5045-5056
- [26] <http://www.dis.uniroma1.it/challenge9/download.shtml>

(上接第 275 页)

其中, γ 为删减因子, k 为上次相遇后经历的时间片数。

另外, 如果节点 a 与节点 b 经常相遇, 且节点 b 也与节点 c 经常相遇, 则:

$$p_{(a,c)} = p_{(a,c)dd} + (1 - p_{(a,c)dd}) \times p_{(a,b)} \times p_{(b,c)} \times \beta \times \frac{T_{ab}}{c^{(T_a+T_b)/2}} \times \frac{T_{bc}}{c^{(T_b+T_c)/2}} \times \frac{k_b - k_b'}{k_b} \times \frac{k_c - k_c'}{k_c}$$

其中, β 为传递因子。

与 PROPHET 路由协议算法相比, 该算法在数据传输可靠性的方面主要有以下改进: (1) 无线体域网传感器节点的缓存有限, 该算法考虑了下一跳节点的使用情况, 邻居节点中剩余缓存大的被选为下一跳节点的概率大于剩余缓存小的。(2) 该算法不仅考虑了相遇概率, 还综合考虑了连接时间的长短, 连接时间长、相遇概率大的节点被选为下一跳节点的概率也大, 而相遇概率短、连接时间却很长的节点, 被选为下一跳节点的概率也大。该算法综合考虑本节点与邻居节点的相遇概率、缓存和相遇之后的连接时间, 理论上该算法能够提高无线体域网数据传输的可靠性。

3 仿真与分析

为了比较两种协议在身体姿势变化过程中数据传输可靠性方面的表现, 对这两种协议进行比较, 在 NS2 试验平台上对其进行了仿真分析, 布置了 13 个传感器节点和一个 sink 节点, 模拟人体在行走、躺着、坐着的动作变换过程之中的数据传输的可靠性, 其中节点 A 为采集节点, 其余节点为转发节点, 节点 S 为 sink 节点, 节点的通信半径为 40cm, 节点的布置如图 1 所示, 评价路由协议可靠性的标准包括 3 条:

- (1) 平均交付比: 数据包成功被接收采集的总数据包的比值。
- (2) 平均端到端时延: 数据包从采集到被 sink 节点接收所用的时间。
- (3) 平均路由跳数: 数据包从采集到 sink 节点所经过的中间节点的总和。

该算法的目标是最大化交付比, 最小化端到端时延, 尽量缩小路由跳数。为了实验顺利进行, 本文提出了如下假设: 节点之间具有相同的初始相遇概率(在通信范围内的节点); 转发节点只转发数据包不采集数据包; 采集的信号为连续信号; 转发节点的能量冗余。

结束语 本文所提出的可靠性算法的核心思想是综合考虑了节点缓存大小、节点相遇概率和相遇时连接时间长短等因素, 并得到一条概率最大的路由路径。本文提出的算法能够很好地满足 WBAN 要求的低时延和数据传输高可靠性, 在

解决身体姿势变化造成的网络时断时续的问题上, 相比于现在提出的解决方法, 具有比较大的优势。

参考文献

- [1] pEhyaie A, Hashemi M, Khadivi P. Using Relay Network to Increase Lifetime in Wireless Body Area Sensor Networks[C] // Kos; Proceedings of International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2009: 1-6
- [2] 宫继兵, 王睿, 崔莉. 体域网 BSN 的研究进展及面临的挑战[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(52): 737-753
- [3] 卢先领, 彭能明, 徐保国. 无线体域网中能量高效且可靠的自适应路由协议[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(6): 1520-1524
- [4] Spyropoulos T, Psounis C S, Raghavendra K C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 63-76
- [5] Yang Song, Lu Jia-liang, Yang Fan, et al. Behavior-Aware Probabilistic Routing For WirelessBody Area Sensor Networks[C] // Globecom 2013 Ad-Hoc and Sensor Networking Symposium. 2013
- [6] Hassanpour S, Asadi B, Vejdandparast Y. Improving Reliability of Wireless Body Area Sensor Networks Using Genetic Algorithm[C] // 2011 IEEE. 2011: 590-593
- [7] 彭能明, 金智明. 基于转发节点的无线体域网节能策略研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31(6): 103-106
- [8] Spyropoulos T, Psounis C S, Raghavendra K C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 63-76
- [9] Yang Li-li, Xie Xian-zhong, Zheng Yi. A historical-information-based algorithm in dynamic spectrum allocation[C] // Proc of International Conference on Communication Software and Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 731-736
- [10] Ramanathan R, Hansen R, Basu P, et al. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks[C] // Proc of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. New York: ACM, 2007: 62-66
- [11] Li Yun, Chen Xin-jian, Liu Qi-lie, et al. A novel congestion control strategy in delay tolerant networks[C] // Proc of the 2nd International Conference on Future Networks. 2010: 233-237
- [12] Lindgreny A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20