

即时消息系统的好友关系网络拓扑建模与分析

王福林 高 强 刘衍珩 王 健

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

(吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)

摘 要 即时消息系统目前已成为人们交友和沟通的主要工具,建模和理解其中的好友关系网络的建立和演化规律对于设计更加友好的即时消息系统很有益处。针对世界最大的即时消息系统之一的QQ,分析了好友关系网络的特点,统计了QQ用户的交友取向特征,考虑了实际的QQ联系人作为节点的出度和入度情况。不同于传统的基于节点度的优先附着规则,提出了即时消息系统的好友关系网络基于用户属性进行建模和演化的规则,设计了相应的拓扑生成算法,讨论了模型各参数对拓扑演化的影响。实验结果表明,提出的生成模型较BA模型更好地体现了实际好友关系网络的特点,例如节点度分布、平均最短路径长度等。

关键词 用户属性,即时消息系统,拓扑演化,BA模型,拉普拉斯谱

中图法分类号 TP393.08 **文献标识码** A

Modeling and Analysing Network Topology of Friend Relationships in Instant Messaging System

WANG Fu-lin GAO Qiang LIU Yan-heng WANG Jian

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract Instant messaging (IM) system has become primary communication tools between people. In order to design a more friendly instant messaging system, it is necessary to understand how the friend relationships are built and evolved in the real instant messaging system. This paper studied the characteristic of friend relationships in network and the trend of making friends with other QQ users and considered nodes in degree and out degree of actual QQ users. At the same time a new algorithm for IM topology was proposed by considering the influence of both node property and the trend of making friends of QQ users. We call it Attribute-based model (ABM) which is different from traditional rules in which node degree is top-priority. The experiments show that ABM behaves better than BA algorithm when friend relationship is considered.

Keywords User property, Instant messaging system, Topological evolution, BA model, Laplacian spectrum

1 引言

随着人们生活节奏的加快,即时消息系统(Instant Messaging, IM)在商业沟通和个人交流中的应用越来越普及,即时、多向、多种类的网络信息交流使得通过IM发送信息的模式展现出与以往广泛研究的万维网和邮件系统不同的特点,同时,IM用户通常依据自己的偏好在巨大的用户空间里寻找朋友并建立好友关系,这种好友关系并不具备对称性,即:用户B是用户A的好友,反之并不一定成立,从而好友关系网络可以表示为以用户为节点,以好友指向关系为边的有向图。建模和理解这种好友关系网络的产生方式和演化规则将有利于设计用户友好的IM系统。

目前已经存在一些网络生成模式,例如小世界模型和

BA无标度模型^[1]。小世界模型无论是WS构造算法^[2]还是NW构造算法^[3]都着重反映了朋友关系网的一种特性,即大部分人的朋友都具有一定地域的局限性,同时也有一些人的朋友较远,这种情形WS通过重新连线或者NW通过加入连线实现。在IM系统中,基于即时消息的传送而建立起来的好友关系不仅仅局限于小世界模型,它具有更广泛的地域性和自由度。BA无标度模型追求增长和优先连接两条规则。优先附着能否反映实际的IM系统中用户之间的网络连接关系,需要进一步的讨论。

基于以上的认识,针对世界最大的IM系统之一的QQ,本文建模IM系统的好友关系网络拓扑演化方式,分析用户节点的连接情况,讨论BA算法生成拓扑和实际网络的差别,提出IM系统的好友关系网络应基于用户属性进行建模和演

到稿日期:2010-09-12 返修日期:2010-12-17 本文受国家自然科学基金(60973136, 61073164),科技部国际科技合作与交流专项项目(2008DFA12140),欧盟合作项目(155776-EM-1-2009-1-IT-ERAMUNDUS-ECW-L12)资助。

王福林(1988-),女,硕士生,主要研究方向为复杂网络, E-mail: wangfulin_jlu@126.com; 高 强(1964-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为网络安全, E-mail: cjb@jlu.edu.cn(通信作者); 刘衍珩(1958-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络安全、移动IP和网络服务质量; 王 健(1981-),男,博士生,CCF学生会会员,主要研究方向为车载自组网和网络安全。

化的规则。本文的主要贡献如下:

(1)根据收集到的 QQ 用户及其各自的好友信息,统计出 QQ 用户的交友取向;

(2)采用 BA 拓扑生成算法,得到和实际好友关系网络规模(用户数目和好友连接数)相同的网络,分析实际好友网络和 BA 算法生成拓扑的参数以及交友取向的差别;

(3)引入基于节点属性的拓扑生成算法 ABM,并与 BA 算法和实际拓扑进行对比。

本文第 2 节介绍 IM 相关研究和网络测度背景知识;第 3 节详细研究实际 QQ 用户之间的连接情况,并与 BA 拓扑生成图进行对比;第 4 节提出 ABM 算法,与实际网络和 BA 网络进行对比并且阐述其所采用的用户属性信息的真实性对实验的影响;最后为结论。

2 相关工作

2.1 IM 研究现状

复杂网络理论已经被广泛应用于研究 Internet 的拓扑结构和发展。基于 Internet 的 IM 系统不但呈现出与 Internet 相似的统计特性,同时也是一种特殊的社会网络。对 IM 的拓扑研究主要有两方面:一是分析 IM 拓扑的统计特征;另一方面是设计 IM 模型。

Smith 曾经研究过 nioki.com 的 IM 数据库,包括 50158 个节点以及将近 50 万条边,Smith 指出 nioki.com 呈现了小世界特性和无标度特性^[4]。2005 年,Cheryl D. Morse 和 Haining Wang 分析了美国在线即时信息网络系统(AIM),发现该系统具有很高的聚集度和很短的平均路径长度,同时这个 IM 网络也呈现小世界特性和无标度特性^[5]。姚园园对于已经存在的 GBA 演化模型进行改进得到 Clique-VGBA 模型,讨论了基于 Clique-VGBA 模型的 IM 演化特性^[6],并和几种经典的网络模型进行比较,证明了 Clique-VGBA 模型的合理性;同时,在分析节点(用户)的出度和入度时指出,节点的度分布呈现存在幂律(power-law)规律。Jure Leskovec 和 Eric Horvitz 分析了 Microsoft Instant Messenger 24000 万在线用户的静态和动态的通信情况以及网络参数^[7]。他们发现几乎一半的会话发生在两个用户之间并且这种拓扑存在路径长度为 29 的好友链,具有很强的聚集性;他们分析了 IM 系统会话参数,包括参与会话用户数目、每个用户好友数会话时长等,其中会话时长呈现幂律规律。此外,闫强等人对 MSN 中的群和团体进行了讨论^[8],证明在 IM 系统的群具有幂律分布,系数 γ 从 0.76 变化到 1.22,也从即时消息的接受和发送以及会话的发起和维持方面对 IM 用户的行为进行了分析。

以往工作多是在对 IM 系统的用户行为和网络拓扑的统计特征进行分析,或是只考虑了节点的度及其相关的参数对 IM 系统进行建模,并没有考虑节点本身的属性对 IM 网络的形成和建立起到的重要作用,本文提出的 ABM 算法,从节点属性的角度阐述了 IM 网络的形成过程。

2.2 主要网络测度

一个实际的网络可以抽象为一个由节点集 N 和边集 E 组成的图 $G=(N, E)$ 。节点集合 N 代表实际系统中的实体,

边集合 E 表示系统中实体之间的关系。本文是对 QQ 联系人的关系进行研究,联系人之间的好友关系具有不对称性,属于有向图。网络测度对于准确区分和刻画拓扑结构具有重要作用,下面介绍本文关注的主要网络测度。

节点度及其分布:对于有向图节点的度由出度和入度构成。从节点 i 发出的边数称为节点的出度,记为 $K_{out} = \sum_j a_{ij}$,其中节点 j 是节点 i 所指向的节点。指向节点 i 的边数称为节点的入度,记为 $K_{in} = \sum_j a_{ji}$,其中节点 j 是指向节点 i 的节点。节点的总度被定义为 $K_i = K_{out} + K_{in}$ 。所有节点的度分布可以用分布函数 $P(K)$ 描述, $P(K)$ 定义为随机选择度值为 K 的节点的概率, $P(K)$ 可以描述图 G 最基本的拓扑特性。另一种表示度分布的方法是补累积度分布^[9],它刻画了度不小于 K 的节点的概率分布。将补累积度分布记为 $P'(K)$, $P'(K) = 1 - \sum_{n=1}^K P(n)$ 。

平均最短路径长度^[10]:节点 i 和节点 j 间的最短路径长度是指,从节点 i 到达节点 j 所有路径中最短的路径长度,记为 P_{ij} 。平均最短路径长度 P 是网络中所有顶点之间最短路径长度的平均,即 $P = \frac{\sum_{i \neq j} P_{ij}}{n}$ ($i \neq j, n$ 为图中所有的路径数目)。有向图只统计两点之间可达的路径长度,如果节点 i 和 j 间不存在路径, $P_{ij} = 0$ 。

平均邻居节点度分布^[11]:度为 K 的所有节点的平均度分布。设图中有 n 个度为 K 的节点,节点度分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$,则度为 K 的节点的平均邻居节点度 $P_k = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}$,其中, K 从 0 到图中所有节点的最大度为 m 。由于各个用户交友的情况和节点的出度有关,本文对节点的出度进行了平均邻居节点度分布的统计。

拉普拉斯谱^[12]:图 G 的无符号拉普拉斯谱矩阵 $|L|$ 定义为 $|L| = D + A$ (D 是描述 G 的节点度对角矩阵, A 是 G 的邻接矩阵)。无符号拉普拉斯谱(SLS)就是 $|L|$ 的特征值集合。对图论的研究表明, SLS 对区分不同结构的拓扑图具有显著效果。

3 用户属性分析

通过对实验室成员¹的调查,共收集了 33 个 QQ 用户信息及其全部好友信息,其中 2 个人的注册年龄分别是 2 和 3,与实际年龄不符,只采用了余下 31 个用户的相关信息,如表 1 所列。

根据 31 个用户的好友信息统计各自的交友偏好,主要考察年龄和性别两项属性。直观上预计用户会倾向于添加同一年龄段的用户为好友,同时更倾向于添加异性为好友。若 QQ 用户的年龄为 a ,将同一年龄段的范围界定为 $[a - \Delta a, a + \Delta a]$, Δa 分别为 1, 2, 3, 4, 5。实际数据如图 1 所示,随着 Δa 的增加用户同年龄段好友的所占比例增加, $\Delta a \geq 2$ 时,大部分 QQ 用户的同年龄段好友比例都在 0.5 以上。可见,用户倾向于选择和同年龄段的人交友,同时并不是像预测的那样,用户更倾向于和同性交友。

¹ 实验室主页: <http://ccst.jlu.edu.cn/mcns>

表1 实验用户信息

用户编号	性别	年龄	好友数
1	male	29	169
2	male	33	166
3	female	26	234
4	male	33	197
5	male	25	192
6	male	27	348
7	male	26	223
8	male	25	192
9	female	25	215
10	male	27	181
11	male	24	106
12	male	27	313
13	male	23	232
14	male	28	496
15	female	24	115
16	male	26	109
17	female	25	221
18	female	25	85
19	female	23	173
20	female	23	191
21	male	24	146
22	female	24	306
23	female	25	161
24	male	23	109
25	female	25	171
26	male	25	115
27	male	22	150
28	female	23	79
29	male	23	113
30	female	22	76
31	female	36	24

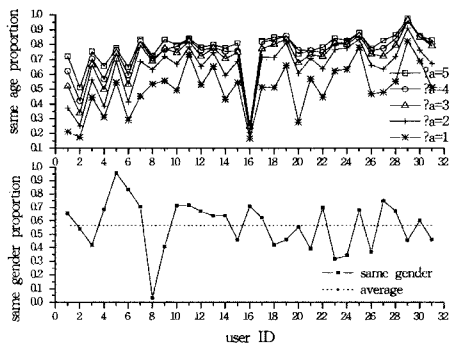


图1 QQ用户好友中相同年龄段和相同性别的比例

目前大多数关于拓扑演化的研究均是基于BA算法展开的,它的主要规则是:(1)增长:从一个具有 m_0 个节点的网络开始,每次引入一个新的节点,并且连到 m 个已经存在的节点上,这里 $m \leq m_0$;(2)优先连接:一个新节点与一个已经存在的节点 i 相连接的概率 Π_i 与节点 i 的度 k_i 、节点 j 的度 k_j 之间满足 $\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 。但是在IM系统中,用户在查找好友时,并不知道谁的好友多(节点度大),或者谁具有更高的社会地位,使得优先附着规则可能并不适用。

图2给出了BA算法与实际网络度分布的对比,网络规模都为31个节点,年龄和性别属性分别与实际用户对应。BA算法生成图是无向的,由于好友关系的不对称性,在BA无向图生成边的过程中,生成线段 (a, b) ,则对应一条起点为 b ,终点为 a 的有向边。对应实际交友中节点 b 加入已经存在的好友关系网络的过程,节点 b 指向好友关系网络已经存在的节点 a ,表示 b 将 a 加入到自己的好友列表中。可以发现,

在节点的度分布上,BA图和实际网络很接近,这可能是由于实验数据均来源于同一个实验室,QQ好友同时也是实际生活中的好友或同事,彼此之间可能会了解谁是Hub节点,从而使得优先规则依然奏效。

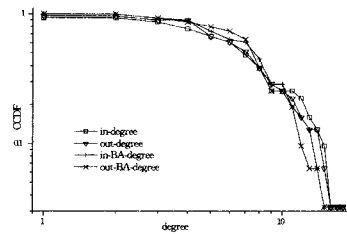


图2 实际拓扑图和BA算法生成图度分布比较

但是,对BA算法生成图进行多次统计后得出的交友偏好如表2所列。相同年龄段和相同性别百分比平均数分别为:0.501260,0.420156。而在实际网络拓扑中则分别为:0.919431,0.61896。可见,实际好友关系网络中的交友偏好并没有被BA模型体现。

表2 BA算法得出的同年龄段和同性别比例

实验组号	相同年龄段比例($\Delta a=5$)	相同性别比例
1	0.488372	0.334884
2	0.666667	0.466670
3	0.511628	0.372093
4	0.700000	0.500000
5	0.666670	0.466667
6	0.666667	0.500000
7	0.488372	0.348837
8	0.488372	0.372093

为了兼顾各网络测度和用户交友偏好,本文基于用户属性设计一种网络生成算法,该算法不仅能够反映真实的好友关系网络拓扑结构,同时也能够反映节点之间的内在属性关联关系,称该算法为Attribute-based Model (ABM)。

4 ABM算法

ABM算法是属性优先的算法,和BA模型的度优先连接规则不同,属性最相似的节点间将会具有最高的连接可能性。算法需要统计实际网络中同性用户连接的概率 p_1 (所有有向边中同性连接的比例)和同年龄段连接的概率 p_2 (所有有向边中同年龄段连接的比例)。生成 n 个节点, e 条边网络拓扑的ABM算法描述如下:

Step 1 优先连接:将 n 个节点两两相互连接。

Step 2 计算连接概率:节点 i 与节点 j 的连接概率 p_{ij} 按照如下方法定义:如果节点 i 与节点 j 处于相同年龄段,同性节点和异性节点的连接可能性分别为:

$$p = p_1 * w + (1-w) * (1 - |age_i - age_j| / \Delta a) * p_2 \quad (1)$$

$$p = (1-p_1) * w + (1-w) * (1 - |age_i - age_j| / \Delta a) * p_2 \quad (2)$$

若节点 i 与节点 j 处于不同年龄段,同性节点的连接概率:

$$p = p_1 * w + (1-w) * (1-p_2) \quad (3)$$

异性节点的连接概率:

$$p = (1-p_1) * w + (1-w) * (1-p_2) \quad (4)$$

式中, w 和 $1-w$ 分别代表性别和年龄在交友过程中所占的权重。

Step 3 去除多余边:随机地选取不同的有向边 (i, j) ,以

$1 - p_{ij}$ 的概率去除该边。若节点 i 指向节点 j 的边被去掉, 则 p_{ij} 变为 0。重复以上操作, 直到网络中剩下 e 条边。

算法时间复杂度为 $O(n^2)$, 涉及到年龄段界定参数 Δa , 实际网络同性连接概率 p_1 , 同年龄段连接概率 p_2 和性别属性所占权重 w 。其中 p_1 和 p_2 由实际数据确定 $p_1 = 0.61896$, $p_2 = 0.919431$, Δa 取为 5。接下来讨论 w 对 ABM 算法的影响, 同时从整个生成网络中节点度的角度, 确定 w 的适当取值。 $w = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 的度分布如图 3 所示。

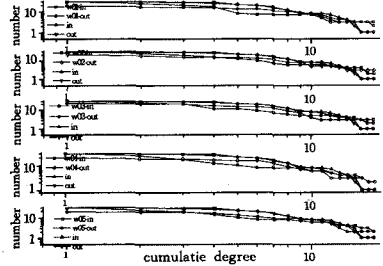


图 3 $w = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 时的 ABM 度分布图 ($n = 31, e = 231$)

从网络节点的度分布情况来看, ABM 算法生成图累积度小于 14 的节点数目要比实际网络少。利用度分布不能区别不同 w 取值对 ABM 算法生成图的影响。但是比较不同 w 取值的 ABM 算法生成网络相同年龄段和相同性别的比例, 可发现当 $w = 0.2$ 时和实际的情况最接近, 如表 3 所列。ABM 网络生成拓扑中相同年龄段和相同性别百分比的平均数分别为: 0.955498, 0.542338, 实际网络为: 0.919431, 0.61896, 比 BA 网络更加接近实际网络。

表 3 ABM 算法得出的同年龄段和同性别比例

实验组号	相同年龄段比例 ($\Delta a = 5$)	相同性别比例
1	0.948052	0.523810
2	0.947826	0.552174
3	0.952381	0.523810
4	0.956332	0.532751
5	0.973799	0.524017
6	0.952174	0.573913
7	0.961039	0.558442
8	0.952381	0.549784

ABM 算法更能够反映实际交友情况, 但能否与实际的网络拓扑具有很高的相似性呢? 对于各个网络测度进行计算和对比发现在平均最短路径长度方面, 实际图测量为 1.924138, ABM 算法生成图为 1.913978, BA 生成图为 1.878495。可知, 在实验数据中的好友关系网络, 任意一个用户找到另一个用户所需要经过中转的用户平均数量是 2 人。BA 算法和 ABM 算法生成拓扑在这一点上都接近真实情况, 且 ABM 算法更为接近。3 类数据的平均邻居节点度分布如图 4 所示。

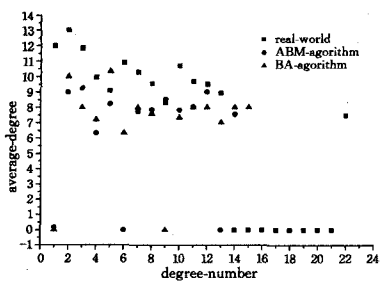


图 4 平均邻居节点度分布对比

图中实际网络平均邻居节点度高于 BA 算法和 ABM 算

法, 原因可能是实际好友关系网络中某几个节点具有很高的入度和出度(富人俱乐部现象)^[13], 使得把他们加入好友的用户获得了很高的邻居节点出度。同时 BA 算法生成网络比 ABM 算法生成网络具有更高的平均邻居节点度, 原因在于 BA 算法的优先附着规则不同于 ABM 算法的属性优先, 优先附着规则更有可能产生富节点。

实际数据、BA 算法和 ABM 算法各自拓扑图的拉普拉斯谱如图 5 所示。实际图除了第一个特征值很大以外, 其余都比 BA 算法生成图小。而 BA 算法和 ABM 算法的拉普拉斯谱是十分接近的。

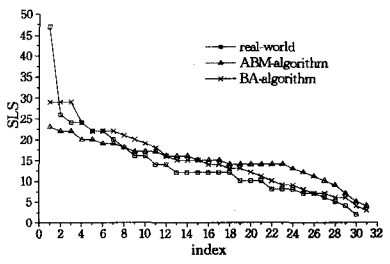


图 5 拉普拉斯谱分析图

ABM 算法是基于节点的属性进行演化的, 有必要讨论一下 ABM 算法对于节点属性的容错性。实验从 31 个节点中分别随机地选取 5%, 10% 和 15% 的节点, 将它们的性别改为和原来相反。图 6 显示节点性别属性改变前 ($w02_in, w02_out$) 和改变后算法生成图的出度和入度情况 ($W02_IN_5, W02_OUT_5$ 分别表示 5% 的节点性别属性变为相反后出度和入度的补累积度分布, 以此类推)。可以看出, 节点性别信息变为相反后, 节点的出度和入度均有减小的趋势, 但 ABM 算法的误差不会因为错误属性比例的增加而扩大。10% 的节点属性改变前后平均邻居节点度分布对比如图 7 所示(改变前为 ABM_algorithm, 改变后为 ABM_ALGORITHM), 除了度为 1, 7 和 8 的节点平均邻居节点度没有发生变化, 其他均不同。拉普拉斯谱情况如图 8 所示(改变前 ABM_algorithm, 5% 的节点性别属性改变后为 ABM_ALGORITHM_5, 以此类推), 属性改变前后比较接近。可见虽然节点属性的改变影响了 ABM 算法生成网络拓扑, 但不同比例的错误属性对应的度分布和拉普拉斯谱曲线变化趋势一致, 表明 ABM 算法对属性具有较强的容错性。

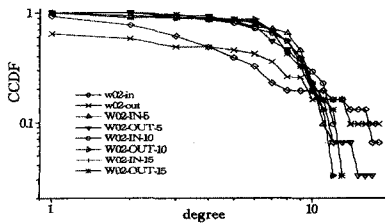


图 6 $w = 0.2$ 属性改变前后 ABM 算法节点度分布

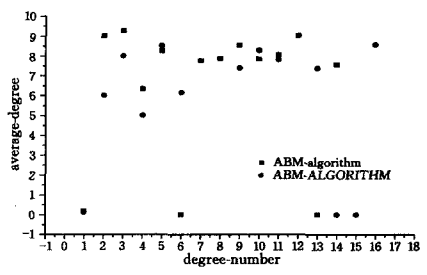


图 7 10% 的节点属性改变前后 ABM 算法平均邻居节点度分布

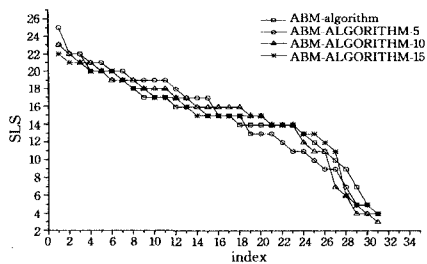


图8 属性改变前后 ABM 算法拉普拉斯谱对比

结束语 本文针对 QQ 这种 IM 工具下的用户交友情况进行了详细的研究。考察实际网络中的拓扑参数,从 QQ 用户的年龄和性别属性角度出发,提出了基于属性的拓扑构造算法并从网络测度和交友取向角度与实际网络及 BA 算法生成网络进行对比。得出的结论是:

1)在 IM 系统中,用户间好友关系的建立很大程度上依赖于用户的属性信息。ABM 算法能够反映真实好友关系网络的拓扑结构,同时也能够反映节点之间的内在属性关联关系。已有的经典模型如 BA 模型没有将除了度以外的节点属性考虑进去,从而在用户交友取向方面不及 ABM 算法更接近实际好友网络。

2)ABM 算法生成需要统计的实际网络参数,并且要求生成网络拓扑时采用的节点集合要和实际节点集合相同。这些要求实际数据可靠和精确。

3)容错性实验表明,ABM 算法对于节点属性具有较强的容错性,对于节点属性的不真实,算法在一定程度上可以保证其正确性。

实验中采用了 31 个 QQ 用户的信息,包括 QQ 用户信息及其全部好友信息。其从数量和地域上均具有局限性,进一步的工作应该在更加广泛的数据集合上进行实验,考虑其它即时通讯系统所构造的网络,从节点属性这个角度提出在拓扑层面和实际网络相似,在属性连接方面也 and 实际网络更相近的生成算法。

(上接第 48 页)

跨层的混合 MAC 协议与路由算法是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 谭力,苏钢,朱光喜,等. MIMO 系统中的自适应比例公平调度算法研究[J]. 计算机科学,2010,37(3):67-69
- [2] 黄志杰,李峰,高强. 无线多媒体传感器网络实时 MAC 协议[J]. 计算机科学,2010,37(11):81-85
- [3] 张晓彤,李培娅,王沁,等. 接入网 MAC 层 QoS 系统的多业务令牌桶流量整形算法[J]. 计算机科学,2009,36(1):68-70
- [4] Zhang Qian, Zhang Ya-qin. Cross-layer design for Qos support in multi-hop wireless networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2008,96(1):64-76
- [5] 马华东,陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报,

参考文献

- [1] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science,1999,286(5439):509-512
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world' networks[J]. Nature,1988,393(6684):440-442
- [3] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model[J]. Phy. Lett. A,1999,263:341-346
- [4] Smith R D. Instant messaging as a scale-free network[J]. e-print cond-mat/0206378,2002
- [5] Morse C D, Wang H. The Structure of an Instant Messenger Network and its Vulnerability to Malicious Codes[C]//Proc. of ACM SIGCOMM. 2005
- [6] Yao Yuan-yuan. Internet topology study and its application in IM network modeling[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006
- [7] Leskovec J, Horvitz E. Planetary-Scale Views on a Large Instant-Messaging Network[C]//Proc. of the 17th International Conference on World Wide Web. New York, USA: ACM Press, 2008
- [8] Yan Qiang, Huang Xiao-yan. User Behavior and IM Topology Analysis[J]. Journal of Networks,2008,3(7)
- [9] 李超,赵海,张昕,等. 基于多点测量的网络节点度分布研究[J]. 计算机科学,2008,35(10):98-99
- [10] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006
- [11] Mahadevan P, Krioukov D, Fomenkov M, et al. Lessons from three views of the Internet topology[J]. arXiv:cs. NI/0508033, 2005
- [12] 王健,刘衍珩,梅芳,等. 基于网络拥塞的 Internet 级联故障建模[J]. 计算机研究与发展,2010,47(5):772-779
- [13] Zhou S, Mondragon R J. The rich-club phenomenon in the Internet topology[J]. IEEE Communication Letters,2004,8(3):180-182
- [14] 2006,17(9):2013-2028
- [6] Kwon H, Lee W I, Lee B G. Low-over resource allocation with load balancing in multi-cell OFDMA systems[C]//Proceedings of VTC 2005 Spring. IEEE Press,2005:3063-3067
- [7] 白铂,曹志刚,陈巍. IEEE 802. 16 网络中保障 QoS 的多用户业务调度算法[J]. 通信学报,2009,30(11):37-47
- [8] 侯华. 跨层无线资源管理算法研究[D]. 合肥:中国科技大学, 2008
- [9] 仲崇显,杨绿溪. 下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统动态资源分配[J]. 通信学报,2008,30(12):2972-2975
- [10] Koutsopoulos I, Tassioulas L. Adaptive resource allocation in SDMA based wireless broadband networks with OFDM signaling [C]//INFOCOM 2002. New York: IEEE Pres,2002:1376-1385
- [11] 陈婷,李建东,钟绍波. 一种面向公平保证 QoS 的 WiMAX 二级调度方案[J]. 计算机研究与发展,2009,46(07):1094-1101