维普资讯 http://www.cqvip.com

基于 DF 的协作节点选择及功率分配策略研究*)

郭金淮　赵雄伟　徐晓建　于宏毅
(信息工程大学信息工程学院　郑州 450002)

摘　要　对于无线通信系统来说,特别是单天线节点无线通信系统,采用协作通信技术可以有效地提高系统性能。其中,协作节点选择及协作策略是协作通信需要考虑的两个基本问题。以容量最大化为目标,基于 DF 中继模式,本文研究了协作节点选择及功率分配策略问题,结果表明,当协作节点满足一定条件时并采用合理的功率分配策略可有效提高系统容量。

关键词　DF,容量最大化,节点选择,功率分配

Selection of Cooperative Node and Power Allocation Scheme Based on DF

GUO Jin-Huai　ZHAO Xiong-Wei　XU Xiao-Jian　YU Hong-Yi
(Information Engineering University Information Engineering Institute, Zhengzhou 450002)

Abstract　For wireless communication systems, especially for single antenna node wireless communication systems, cooperative communication techniques can improve system performance effectively. Selection of cooperative node and cooperative scheme are two basic problems for cooperative communication. For the goal of capacity maximum, based on DF, the problems including selection of cooperative node and power allocation scheme are researched this paper, results show that when certain conditions are satisfied and reasonable power allocation scheme is adopted system capacity can be improved availably.

Keywords　Decode and forward, Capacity maximum, Node selection, Power allocation

1　引言

目前,无线通信中的移动电话业务、数据业务、多媒体业务等正得到迅速发展,未来无线网络将承担更多的高质量业务,对信息速率等系统性能提出了越来越高的要求。由于 MIMO 系统较 SISO 系统可大大提高系统容量越来越受到研究者的关注,基于 MIMO 系统容量做了大量研究工作,文[1]基于莱斯信道研究了 MIMO 系统的容量,文[2]研究了相关衰落信道下 MIMO 系统的容量,文[3]研究了时变信道下 MIMO 系统的容量,更多的文献这里不再赘述。

MIMO 系统要求收发端有多个天线。通常情况下,受体积、功率等因素的限制,单个节点难以安装多个天线。对单天线节点来说,可以通过协作的方式构成分布式 MIMO 系统,获得 MIMO 系统的好处。针对协作通信,有大量文献做了相关研究工作,文[4]按照信号处理方式将分布式 MIMO 系统中协作分集技术分为放大中继模式、解码中继模式、编码协作模式,并基于两个协作用户分析了不同分集方案的性能。考虑中断事件,以中断概率为性能指标,文[5]基于不同协作策略研究了多个节点协作分集的抗衰落性能,结果表明在没有天线阵的情况下,多个分布的节点(天线)可以通过协作实现空间分集。文[6]针对两个协作用户的情况,以误码率、误帧率为性能指标研究了编码协作的好处。

显然,协作通信可以有效提高系统性能,其中协作节点选择及协作策略研究是协作通信需要考虑的两个基本问题。文[7]考虑编码协作,研究了中继选择问题,文中提出的方法要求接收端已知接收信号的信噪比,适应于蜂窝系统等有中心的无线通信系统,结果表明,与中继随机选择的方法相比,文中提出的方法可以获得更高的分集增益。为获得协作分集的好处,文[8]提出了机会中继方案,根据瞬时信道信息进行中继选择,按照某种准则选择链路质量较好的节点作为中继,结果表明,以中断概率为性能指标,文中提出的方案与文[9]研究的基于多个中继节点的多布式 STC 协作方案有相同的分集度,同时机会中继方案易于实现,可应用于未来的无线通信系统。

本文考虑高斯信道,以容量最大化为目标,基于 DF(Decode and forward)中继模式,根据节点的位置给出了协作节点的选择准则并研究了相应的功率分配策略,结果表明,当节点位置满足一定条件时可作为协作节点,同时采用合理的功率分配策略可有效提高系统容量。

文章结构安排如下:第 2 部分描述了系统模型。第 3 部分基于两种节点位置分布模型研究了 DF 中继模式下的协作节点选择准则及功率分配策略。最后是结论及下一步工作。

2　系统模型

该部分内容主要给出协作方案、发射功率模型及节点位置分布模型,具体如下:

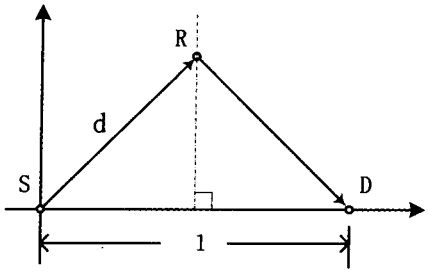
1)协作方案:考虑三个节点的情况,系统包括源节点(S)、中继节点(R)及目的节点(D)。采用时分协作方案,在第一时隙,S 发射信息,R 与 D 接收信息。第二时隙,R 发射信息,D 接收信息。

*)基金项目:国家自然科学基金(No. 60472064)。郭金淮　博士生,主要研究方向为无线传感器网节能通信及分布式协作通信。赵雄伟　博士生,主要研究方向为 Ad-hoc 网络,协作通信。徐晓建　博士生,主要研究方向为分布式 MIMO 及无线网络交互层设计。于宏毅　教授,博士生导师,主要从事信号处理、自组织网及传感器网的研究。

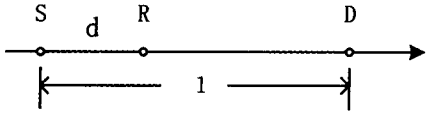
维普资讯 http://www.cqvip.com

2)发射功率模型:令平均发射功率为 T,第一时隙 S 发射功率为 αT,第二时隙 R 发射功率 βT,α,β 为功率分配系数,满足 $\alpha+\beta=2$,$0<\alpha,\beta<2$。假设 R 与 D 有相同的噪声功率 σ^2,当 S 以平均发射功率 T 发射信号时,不考虑信号衰减,D 端平均信噪比为 T/σ^2,为表示方便,令:

$$T/\sigma^2=S_{av} \tag{1}$$



节点位置分布模型一



节点位置分布模型二

图 1　节点位置分布模型

3)节点位置分布模型:不失一般性,对 S 与 D 之间的距离进行归一化,即 S 与 D 距离为 1。简单起见,本文考虑两种节点位置分布模型,一种是 R 位于 S 与 D 垂直平分线上的情况,即 S 与 R 的距离等于 D 与 R 的距离,表示为 d,满足 $d\geqslant 1/2$。另一种是 R 位于 S 与 D 连线上的情况,同样将 S 与 R 的距离表示为 d,满足 $0<d<1$,如图 1 所示。另外,路径损耗指数表示为 k,满足 $k\geqslant 2$。

3　基于 DF 的协作节点选择及功率分配策略

结合上述系统模型,DF 模式下单位带宽容量表示为[5]:

$$I_{DF}=\frac{1}{2}\min\{\log(1+SNR_{sr}),\log(1+SNR_{rd}+SNR_{sd})\} \tag{2}$$

其中,SNR_{sr},SNR_{rd},SNR_{sd} 分别表示 S 到 R,R 到 D,S 到 D 通信时接收端信噪比,min{}表示取括号内最小的数。下面基于两种节点位置分布模型分别展开讨论。

3.1　分布模型一

该模型下,式(2)可进一步整理为:

$$I_{DF}=\frac{1}{2}\min\{\log(1+\alpha d^{-k}S_{av}),\log(1+\alpha S_{av}+(2-\alpha)d^{-k}S_{av})\} \tag{3}$$

为方便研究,同时结合 R 与 S 距离过大时不宜作为协作节点的实际情况,考虑 $d<1$ 的情况,即 S 与 R 距离小于 S 与 D 距离。此时 $d^{-k}>1$,显然,式(3)函数 min{}中第一项 α 是的单调增函数,第二项 α 是的单调减函数,根据函数性质可知,当 min{}中第一项与第二项相等时,式(3)取得最大值。即 $\alpha d^{-k}S_{av}=\alpha S_{av}+(2-\alpha)d^{-k}S_{av}$,整理得:

$$\alpha=\frac{2d^{-k}}{2d^{-k}-1} \tag{4}$$

显然,满足 $1<\alpha<2$。将式(4)代入式(3)得:

$$I_{DF}=\frac{1}{2}\log\left(1+\frac{2d^{-2k}}{2d^{-k}-1}S_{av}\right) \tag{5}$$

根据上面分析可以看到,式(5)表示采用 DF 模式时系统容量最大值。为便于比较,给出不采用 R 时,S 与 D 间直接通信时系统容量:

$$I_D=\log\{1+SNR_{sd}\} \tag{6}$$

根据平均发射功率不变准则,式(6)等价为:

$$I_D=\frac{1}{2}\log\{1+2S_{av}+S_{av}^2\} \tag{7}$$

比较式(5)与(7),满足 $I_{DF}>I_D$ 时,R 可作为中继协作节点。整理得,$I_{DF}>I_D$ 等价于:

$$1/2\leqslant d<\left(\frac{S_{av}+2-\sqrt{S_{av}^2+2S_{av}}}{S_{av}+2}\right)^{1/k} \tag{8}$$

因此,根据节点位置分布模型一,满足式(8)时,R 可作为中继协作节点,且功率分配系数 $\alpha=\frac{2d^{-k}}{2d^{-k}-1}$,$\beta=2-\alpha$。可以看出,$\alpha$ 大于 β,即第一时隙发射功率大于第二时隙发射功率,原因是考虑 R 位于 S 与 D 垂直平分线上情况时,S 发射功率对 R 的影响等价于 R 发射功率对 D 的影响,另外 S 发射功率除对 R 有影响外,对 D 也有影响,因此增加 S 发射功率带来的好处多于增加 R 发射功率带来的好处,所以有上述结论。

同时,当 S_{av} 较大等效为发射功率较高时,$\left(\frac{S_{av}+2-\sqrt{S_{av}^2+2S_{av}}}{S_{av}+2}\right)^{1/k}$ 可能会小于 1/2,式(8)无法满足,此时的 R 无法作为中继协作节点。这与瑞利衰落信道等随机信道不同,原因是高斯信道下采用协作无法获得分集增益,只能获得能量叠加的好处[10],而发射功率较高时中继差错的不利影响超过了能量叠加带来的好处。

特别地,若 R 作为中继协作节点可带来好处,根据式(5),得到 $d=1/2$ 时,系统容量最大,具体可参见附录 1。

下面对上述研究结果进行验证及分析。主要比较路径损耗指数及节点位置不同时,直接发射容量、采用协作节点选择及功率分配策略容量与发射功率之间的关系。需要指出,采用协作节点及功率分配策略时若其容量大于直接发射容量,则 R 作为协作节点,否则采用直接发射。因此,图 2 中基于协作节点选择及功率分配策略容量均大于等于直接发射容量。

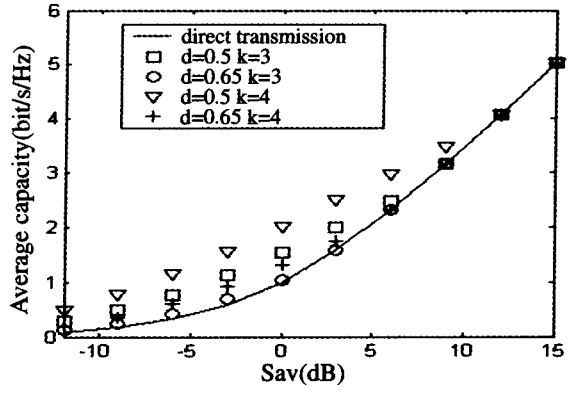


图 2　DF 模式下容量比较一

图中,横坐标表示 S 以平均发射功率 T 发射信号时,D 端平均信噪比,根据式(1),显然横坐标与平均发射功率成正比。从图中可以看出,比较直接发射,采用协作节点选择及功率分配策略在一定条件下可以提高系统容量,特别地,当 R 距离 S 较近、路径损耗指数较高时,容量提高尤为明显。这是因为 R 距离 S 较近时,R 接收到信号的功率较强,误码率较

维普资讯 http://www.cqvip.com

低；路径损耗指数较高时，采用中继可通过减少通信距离进一步提高D端接收信号功率，因此两种情况均可以提高系统容量。其中，$d=0.65$，$k=3$ 条件下，平均发射功率变化时R始终不被选为中继协作节点，原因是路径损耗指数较低且R距离S较远。另外，当平均发射功率较高时，R同样不被选为中继协作节点，这是因为R端中继差错的不利影响超过了D端接收信号功率增强的好处，这与上述分析一致。

3.2 分布模型二

基于分布模型二，式(2)可整理为：

$$I_{DF}=\frac{1}{2}\min\{\log(1+\alpha S_{av}d^{-k}),\log(1+\alpha S_{av}+(2-\alpha)S_{av}(1-d)^{-k})\} \tag{9}$$

同理，当上式 min{}中第一项与第二项相等时，上式取得最大值。整理得：

$$\alpha=\frac{2(1-d)^{-k}}{d^{-k}+(1-d)^{-k}-1} \tag{10}$$

显然，满足 $\alpha<2$。将式(10)代入式(9)，整理得：

$$I_{DF}=\frac{1}{2}\log\left[1+\frac{2S_{av}(d-d^2)^{-k}}{d^{-k}+(1-d)^{-k}-1}\right] \tag{11}$$

满足 $I_{DF}>I_D$ 时，R可作为中继协作节点，等价为：

$$(1-d)^k+d^k-d^k(1-d)^k<\frac{2}{2+S_{av}} \tag{12}$$

因此，基于节点分布模型二，满足式(12)时，R可作为中继协作节点，且功率分配系数 $\alpha=\frac{2(1-d)^{-k}}{d^{-k}+(1-d)^{-k}-1}$，$\beta=2-\alpha$。

特别地，根据节点分布模型二，若 R 作为中继协作节点可带来好处，当 $d=1/2$ 时，容量最大，具体证明见附录2。

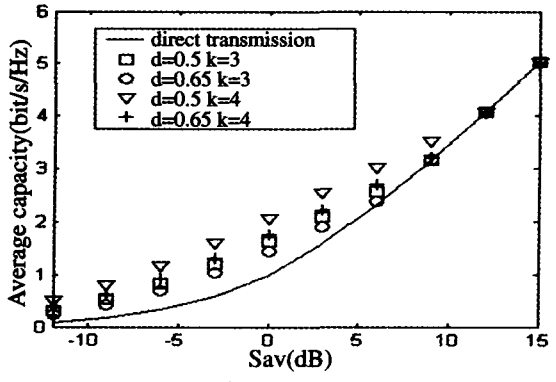


图3 DF模式下容量比较二

下面对上述研究结果进行验证及分析。根据节点分布模型二，比较路径损耗指数及节点位置不同时，直接发射容量、采用协作节点选择及功率分配策略容量与发射功率之间的关系。

可以看出，比较直接发射，采用协作节点选择及功率分配策略在一定条件下可以提高系统容量，当R距离S较近、路径损耗指数较高时，容量提高尤为明显，$d=1/2$ 时容量最大。当平均发射功率较高时，R同样不被选为中继协作节点，原因是中继差错的不利影响超过了采用中继时D端接收信号功率增强的好处。

结论及下一步工作 基于容量最大化，本文研究了基于DF中继模式下的协作节点选择及功率分配策略问题。结果表明，节点位置、路径损耗指数、发射功率满足一定条件时，选择中继协作节点并采用合理的功率分配策略可有效提高系统容量。简单起见，本文基于两种特殊的节点位置分布模型研究了协作节点选择及功率分配问题，下一步工作可考虑一般情况下的节点位置对上述问题进行研究。

参 考 文 献

1 Driessen P F, Foschini G J. On the capacity formula for multiple input multiple output wireless channels: A geometric interpretation. IEEE Trans. Commun, 1999, 47:173～176

2 Shiu D, Foschini J G, Gans M, Kahn J M. Fading and its Effect on the Capacity of Multi-Element Antenna Systems. In: Proc. IEEE Int. Conf. Universal Personal Communication(ICUPC97), Florence, Italy, 1998,1:429～433

3 Marzetta T L, Hochwald B M. Capacity of a mobile multiple antenna communication link in Rayleigh flat fading. IEEE Trans. Inform. Theory, 1999, 45:139～157

4 殷勤业，张莹等．协作分集：一种新的空域分集技术．西安交通大学学报．2005,39(6):551～557

5 Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. IEEE Trans. Inform. Theory. [Online]. Available: http://www.nd.edu/jnl/pubs/it2002.pdf, to be published

6 Hunter T E, Nosratinia A. Performance analysis of coded cooperation diversity. to appear In: Proc. IEEE ICC, Anchorage, Alaska, May 2003

7 Lin Zinan, Erkipe. Relay search algorithms for coded cooperative systems. GLOBECOM 2005, 1314～1319

8 Bletsas A, Khisti A, Reed D P, Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. IEEE J. Sel. Areas Commun. 2006, 24: 659～672

9 Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(10):2415～2425

10 Guo Jinhuai, Xu Xiaojian, Zhao Xiongwei and Yu Hongyi. A novel method to research the performance of channel diversity. IEE Communication letter, submitted

附录1：

式(5)最大等价于 $\frac{2d^{-2k}}{2d^{-k}-1}$ 最大，满足 $1>d\geqslant 1/2$，$k\geqslant 2$。

令 $d^{-k}=x$，则 $x\in(1,2^k]$，$\frac{2d^{-2k}}{2d^{-k}-1}=\frac{2x^2}{2x-1}$。令 $f(x)=\frac{2x^2}{2x-1}$，取 $1<x_1<x_2\leqslant 2^k$，有：

$$f(x_2)-f(x_1)=\frac{2x_2^2}{2x_2-1}-\frac{2x_1^2}{2x_1-1}=\frac{2(x_2-x_1)[2x_1x_2-(x_1+x_2)]}{(2x_2-1)(2x_1-1)}$$

显然，上式大于0，也就是说，$f(x)$ 在 x 取值范围内是增函数，当 $x=2^k$ 时，$f(x)$ 取得最大值。根据 d 与 x 关系，当 $d=1/2$ 时，$\frac{2d^{-2k}}{2d^{-k}-1}$ 取得最大值。

附录2：

式(11)最大等价于 $\frac{2(d-d^2)^{-k}}{d^{-k}+(1-d)^{-k}-1}$ 最大，满足 $1>d>0$，$k\geqslant 2$。

上式对 d 求导，得：

$$\frac{2(-k)(d-d^2)^{-k-1}(1-2d)[d^{-k}+(1-d)^{-k}-1]-2(d-d^2)^{-k}[-kd^{-k-1}+k(1-d)^{-k-1}]}{[d^{-k}+(1-d)^{-k}-1]^2}$$

令上式为0，等价于：

$$(2d-1)\lfloor d^{-k}+(1-d)^{-k}-1\rfloor-(d-d^2)\lfloor(1-d)^{-k-1}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$-d^{-k-1}]=0$

经整理，上式等价于：

$d^{1-k}-(1-d)^{1-k}+1-2d=0$

当 $d=1/2$ 时，满足上式；

当 $1/2>d>0$ 时，

$d^{1-k}-(1-d)^{1-k}+1-2d>0$；

当 $1>d>1/2$ 时，

$d^{1-k}-(1-d)^{1-k}+1-2d<0$。

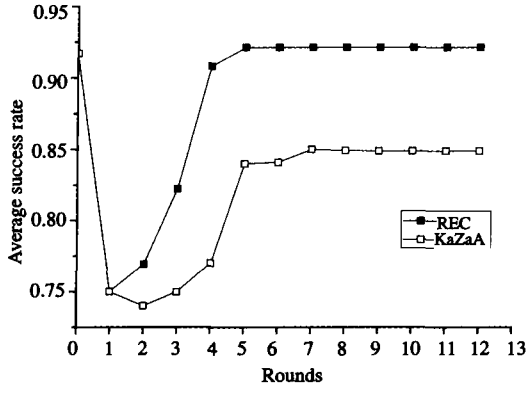
显然，在 d 的取值范围内，当且仅当 $d=1/2$ 时，满足

$d^{1-k}-(1-d)^{1-k}+1-2d=0$

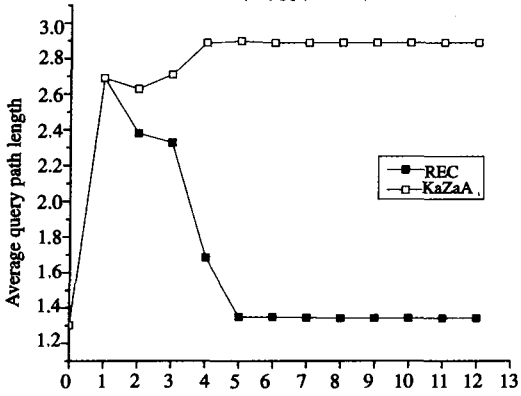
结合极值与导数的关系，$d=1/2$ 时，$\frac{2(d(-d^2)^{-k}}{d^{-k}+(1-d)^{-k}-1}$ 最大。

（上接第 40 页）

采用文[10]的 P2P 网络自组织构造方法 SOMA，对于稳定后的同一个网络拓扑，从 1500 个节点中随机选择 500 个叶节点，该 500 个叶节点发出不同于自身共享资源的搜索请求（模拟资源需求变化），其余 985 个叶节点还是针对自身资源查询，TTL(Time To Live)值设置为 5。我们在 REC 的基础上采用每个叶节点只连接一个服务节点模拟 KaZaA，每次实验进行 12 轮次的调整，数据为 10 次仿真实验的平均，图 2 展示了 REC 和 KaZaA 随拓扑变化性能的变化。



(a) 平均搜索成功率



(b) 平均搜索路径长度

图 2 REC 与 KaZaA 性能的比较

轮次 0 表示初始稳定网络拓扑下的性能。图中可以发现，由于部分节点的资源需求发生改变，在轮次为 1 时，REC 和 KaZaA 的搜索性能同时恶化，而且保持一致，这是因为 SOMA 导致的拓扑变化存在一定的滞后，此时节点的拓扑还未发生改变。在随后的过程中，REC 性能逐渐优化，这是由于 REC 中节点通过需求连接建立与所需的资源的连接，同时保持它原来所属的社区并不变化。相对而言，在缺少需求连接的情况下，图 2 中 KaZaA 的平均搜索成功率从第 3 个轮次开始提高，平均搜索路径长度始终呈上升趋势。这是因为 KaZaA 中节点逐步脱离共享资源社区，加入到查询需求的资源聚集社区，虽然提高了自身的搜索性能，但由于节点的移动影响了原有共享资源的聚集，破坏了资源社区结构，从而降低了其它节点针对节点共享资源的搜索性能，相应导致平均搜索路径长度的增长。

从图 2 我们可以观察到，基于资源连接和需求连接的 REC 整体性能优于 KaZaA，这是因为 REC 可以通过网络自组织构造，一方面将具有相似资源的节点借助资源连接松散地聚合在一起，增强搜索请求传播的针对性；另一方面，借助需求连接建立的捷径，与资源提供节点保持逻辑拓扑上的相邻，减少社区间路由转发的次数，实现节点快速获取所需资源以及被其它节点检索。相比 KaZaA 下或者通过相似资源节点的聚类，或者将最有可能包含查询结果的节点保持为邻居节点，REC 从利己和利人的双重角度充分发掘社区结构的潜能，有效提高 P2P 系统的整体性能，在动态自适应方面更具优势。

结论 REC 结合了传统集中式网络易于管理与分布式网络具有良好的区域自治、负载平衡以及健壮性的优点，针对节点能力的异构性，将系统中的节点进行分层，赋予高性能节点更多职责，能够利用节点的差异提高网络的性能；针对节点参与资源共享的不同动机，对拓扑连接进行分类，按节点资源需求和共享目的组织网络结构，体现了节点服务它人和满足自身的双重视角，为网络中的有效资源组织、高效资源搜索奠定基础。理论分析和仿真实验表明 REC 模型是合理有效的。

参 考 文 献

1 Napster. 2003. http://www.napster.com/

2 Gnutella. 2003. http://www.gnutella.com/

3 LTD S N. KaZaA media desktop, 2002. http://www.kazaa.com

4 时蓉华. 社会心理学. 浙江：浙江教育出版社，1998

5 威尔逊. 论人的天性. 贵阳：贵州人民出版社，1987

6 Shneidman J, Parkes D. Rationality and self-interest in peer to peer networks. In: Proceedings of the Second International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS). Berkeley: Springer Verlag Press, LNCS 2735, 2003. 47～52

7 Vassileva J. Motivating participation in peer to peer communities. In: Proceedings of the Workshop on Emergent Societies in the Agent World (ESAW'02), Madrid, Springer. Verlag LNAI 2577, 2002. 141～155

8 Cheng R, Vassileva J. User motivation and persuasion strategy for Peer-to-peer communities. In: Proceedings of 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'2005). Hawaii, USA, 2005. 193～202

9 Yang B, Garcia-Molina H. Designing a super-peer network. In: Proceedings of the 19th International Conference on Data Engineering (ICDE'2003). Bangalore, India, 2003

10 唐九阳，张维明，肖卫东，汤大权. 类人类社会基于社区的对等网自组织构造. 计算机研究与发展，2006，43(8)：1383～1390

11 Davison B. Web caching and content delivery resources. http://www.web-caching.com/traces-logs.html