



## 社区结构感知的间断连接无线网络路由机制

吉福生<sup>1</sup>, 张洪沛<sup>1</sup>, 张炎<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学宽带泛在接入技术研究所 重庆 400065;

2. 中国信息通信研究院 北京 100191)

**摘要:**针对间断连接无线网络中消息投递成功率低的问题,依据网络中节点社会关系的差异性,提出了一种社区结构感知的路由机制。该机制根据节点在各个运动周期内的状态信息建立马尔可夫模型,以描述节点运动状态转换过程,进而以分布式的方式感知节点中心度,并以社区中心度为参数,采用社区标签交换方法对网络结构进行动态检测,最终利用社区内中心节点为中继辅助完成消息的转发。仿真结果表明,所提出的路由机制在投递率方面的性能改善程度接近 90%,极大地优化了网络性能。

**关键词:**间断连接无线网络;社会网络;社区检测;中心节点

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015104

## Community Structure Perception Routing Mechanism in Intermittently Connected Wireless Network

Ji Fusheng<sup>1</sup>, Zhang Hongpei<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>2</sup>

(1. Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. China Academy of Telecommunications Research, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Based on the differences of social relations between nodes, a community structure perception routing mechanism was proposed for the reason of low message delivery probability in intermittently connected wireless network. According to state information of nodes in each movement cycle, Markov models was established to show the state transition process among nodes, further, the centrality of node was obtained. Then considering about the centrality of node and exploiting the method of community label switching, network structure was checked dynamically. Finally, the central node in the community was chosen as the relay node to forward messages. Results show that the proposed method is accurate, and the performance of delivery ratio can be improved 90% approximately, optimizing the network performance greatly.

**Key words:** intermittently connected wireless network, social network, community detecting, central node

收稿日期:2015-03-05;修回日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61371097),重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTC2013JJB40001, No. CSTC2013JJB40006),重庆市青年科技人才培养计划基金资助项目(No. CSTC2014KJRC-QNRC40001)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61371097), Chongqing Natural Science Foundation (No. CSTC2013JJB40001, No. CSTC2013JJB40006), Youth Talents Training Project of Chongqing Science & Technology Commission (No. CSTC2014KJRC-QNRC40001)

论文引用格式:吉福生,张洪沛,张炎. 社区结构感知的间断连接无线网络路由机制. 电信科学,2015104

Ji F S, Zhang H P, Zhang Y. Community structure perception routing mechanism in intermittently connected wireless network. Telecommunications Science, 2015104

## 1 引言

为了充分地利用节点运动过程带来的相遇机会,国内外研究人员提出了间断连接无线网络体系结构,区别于传统移动自组织网络 (mobile Ad Hoc network, MANET) “存储—转发”的方式,消息在网络中以更加灵活的存储—携带—转发的方式进行传输,极大地提高了实用性<sup>[1]</sup>。然而,实际测量结果表明,此种网络具有非常显著的社会特性<sup>[2]</sup>。根据各个节点聚集程度的不同,网络的逻辑结构可抽象为若干个社区,且各个节点均与某个逻辑社区相互匹配,同时,同一社区内各个节点的活跃程度不同,存在相对活跃的中心节点,此类节点以较高的概率在各个社区之间漫游<sup>[3]</sup>。可见,消息转发过程需要充分考虑节点的社会性,以合理地选择中继节点。

显然,间断连接无线网络中的路由机制对其性能影响严重。通过感知不同节点的活跃程度,参考文献[4]提出了相应的路由策略,以利用活跃度高的节点来实现消息的快速传输。利用节点之间的通信频繁程度,参考文献[5]提出了离线式的节点逻辑关系估计方法,并以此为依据实现了消息副本数量自适应控制的目的。上述机制均以预先获知网络逻辑结构为前提条件,无法满足消息携带与转发过程的分布式特性。基于对社会网络的研究,参考文献[6]提出一种有效的消息转发策略,一跳邻居节点能够有效地覆盖大部分网络,利用两跳请求确认机制来估计节点的效用值,进而利用节点效用值选择合适的中继节点。然而,仅通过所预测的节点移动性难以准确衡量节点效用值,同时,在选择查询节点时采用固定的阈值难以适应网络的动态特性,使得该算法的可扩展性降低。参考文献[7]以社区数量和节点在社区中的停留时间定义节点社会度,将消息转发给社会度较高的节点进行携带。但是,节点运动过程具有随机性,此种方法无法反映出节点的固有属性及逻辑关系。因此,中继节点选择也具有不确定性。针对基于社区的网络结构,参考文献[8]提出了一个有效的消息转发机制,该机制中的消息副本被转发给具有更高全局等级的节点,当消息转发到与目标节点具有相同归属社区的节点后,以本地等级代替全局等级进行消息的传递,而收到消息副本的节点继续转发直到到达目标节点。尽管在转发过程中网络负载相对较小,但在社区规模较大且负载较高的网络中网络的性能会急剧下降。参考文献[9]提出了节点向心度和相似度的概念,并设计了一种动态发现

连通各孤立区域中继节点的方法,进而完成消息的转发。然而,该机制并未对节点归属社区进行划分,进而导致消息进入非目标社区进行扩散,使得网络负载较大,导致资源的浪费。

本文提出了一种动态网络结构感知的间断连接无线网络路由机制,首先,根据本地监测所获取的网络状态信息,节点以分布式方式检测其归属社区的中心节点,并获取节点之间的社会关系,以感知网络结构,进而,合理地选择中继节点进行消息转发。

## 2 网络结构感知方法

为了准确地评估节点之间的关系及网络结构,同时降低感知过程的资源开销,根据网络中节点的社会属性,节点感知自身的中心度,同时,利用节点运动过程所获知的历史状态信息完成邻居节点检测。随着节点的不断运动,中心度较高的节点将社区标签逐渐感染给其他节点,最终与中心节点社区标签一致的节点组成对应的逻辑社区。

### 2.1 节点中心度

间断连接无线网络从逻辑上可抽象为若干个区域,各个区域内的节点数量不同,且节点的运动模式具有区域特性<sup>[10]</sup>。关系较为紧密的节点组成了相应的逻辑社区,节点分别以一定的概率在归属社区内部和归属社区外部运动。根据给定运动周期内节点状态与归属社区的关系,可将其分为本地状态和漫游状态,其中漫游状态相关的情况主要包含3种:节点在连续运动周期均处于漫游状态;节点从本地状态转换为漫游状态;节点从漫游状态转换为本地状态。

根据节点运动特性,节点各个运动周期的状态转移可采用马尔可夫模型描述,令  $p_l$  表示节点当前在本地社区,且持续停留在本地社区的概率; $p_r$  表示节点为漫游状态,且持续处于漫游状态的概率。若节点在给定运动周期内为本地状态的概率是  $\pi_l^{(i)}$ ,处于漫游状态的概率为  $\pi_r^{(i)}$ ,则可采用式(1)和式(2)描述稳态下节点运动周期内处于本地和漫游状态的概率:

$$\pi_l^{(i)} = \frac{1-p_r^{(i)}}{2-p_l^{(i)}-p_r^{(i)}} \quad (1)$$

$$\pi_r^{(i)} = \frac{1-p_l^{(i)}}{2-p_l^{(i)}-p_r^{(i)}} \quad (2)$$

在给定时间段内,节点稳态下处于漫游状态的概率与



其切换社区的频繁程度成正比。任何一个运动周期内,若节点  $i$  和  $j$  分别为中心节点和普通节点,则两个节点处于漫游状态的运动周期数量均值满足式(3):

$$\frac{\hat{e}_i}{\hat{e}_j} = \frac{\pi_i^{(i)}}{\pi_i^{(j)}} \quad (3)$$

其中,  $\hat{e}_i$  和  $\hat{e}_j$  分别为节点  $i$  与  $j$  处于漫游状态的运动周期数目,  $\pi_i^{(i)}$  和  $\pi_i^{(j)}$  分别为稳态下节点  $i$  和  $j$  处于漫游状态的概率。

根据间断连接无线网络中的节点运动特性及消息转发原理,处于漫游状态概率较高的中心节点更加适合承担中继任务。显然,节点中心程度的衡量需要充分考虑给定时间段内其处于各种状态的运动周期比例。节点漫游至其他社区的概率越高,则表明其活跃程度越高,更适合作为社区中心节点,进而,通过此种节点所携带的消息能够以较高的概率转发至目的节点的归属社区。分布式地统计节点在各个运动周期下的状态,根据式(4)可以得到节点  $i$  的中心度  $Centrality(i)$ 。

$$Centrality(i) = \frac{\hat{e}(i)_r}{\hat{e}(i)_r + \hat{e}(i)_l} \quad (4)$$

## 2.2 邻居节点发现过程

节点中心度属于相对数值,需通过与归属社区内的邻居节点进行比较。传统的 MANET 通常采用相遇次数和相遇持续时间来确定节点间的邻居关系<sup>[8]</sup>。但是,间断连接无线网络中的节点分布较为稀疏,利用节点运动过程中所产生的临时链路持续时间短暂;同时,节点之间的相遇频繁程度与节点之间的社会关系直接相关。因此,本文使用相遇频繁程度来判定所相遇的节点是否为邻居节点。

各个节点根据本地记录的相关信息以分布式的方式利用式(5)与式(6)计算相遇频繁程度均值。

$$C_{sum} = \sum_{i=1}^n c_{ui} + \sum_{j=1}^m c_{uj} \quad (5)$$

$$C_{ave} = C_{sum} / (m+n) \quad (6)$$

其中,  $C_{sum}$  表示节点  $u$  与网络中节点的相遇次数总和,  $c_{ui}$  为节点  $u$  与  $i$  的相遇次数,  $n$  和  $m$  分别表示节点  $u$  相遇本地社区节点与漫游社区节点的数目,  $C_{ave}$  为节点  $u$  与网络中节点的平均相遇次数。

进而,通过比较节点之间的相遇次数及相关均值,能够达到确定邻居关系的目的。若节点  $u$  在运动过程中与节点  $k$  相遇,则两者根据各自本地维护的相遇次数信息  $c_{uk}$ ,

利用式(7)判定邻居关系,若满足式(7),则节点  $k$  为节点  $u$  的邻居节点。

$$c_{uk} \geq C_{ave} \quad (7)$$

网络运行过程中,各个节点以自身的 ID 为标签初始化社区标签,即假设所属社区的中心节点为其自身。各个节点利用更新的相遇状态信息计算并比较各自的中心度数值,进而以分布式的方式确定中心节点,最终,中心度较低的节点利用中心度较大节点所对应的社区标签替换自身标签。随着节点标签以分布式的方式进行更新和替换,网络中的节点根据各自的关系以自组织的方式形成多个逻辑社区。

## 3 社区路由机制

利用文中所提出的邻居节点发现方法以及节点中心度估计方法,提出了一种适用于间断连接无线网络的消息转发机制 CCR (community centrality routing),源节点产生消息之后,将其归属社区的中心节点作为中继节点,以携带消息并转发至目的社区以及目的节点。

为了减少消息转发过程中的中继次数,节点以社区标签以及节点 ID 为判定依据,进而确定节点之间的社会关系。若本地社区标签与所遇节点  $N_j$  的 ID 相同,则表明其与相遇节点具有相同的归属社区,且相遇节点为中心节点,进而将消息转发给  $N_j$ ,否则,不需要将消息转发至节点  $N_j$ ,具体的转发决策如式(8)所示。

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{UniqueID}_j = \text{Comm\_label}_j \\ 0, & \text{UniqueID}_j \neq \text{Comm\_label}_j \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\text{UniqueID}_j$  为节点  $N_j$  的 ID,  $\text{Comm\_label}_j$  为  $N_j$  的社区标签。

为了满足消息转发过程中的分布式运行特性,本文所提出的机制采用并行方式转发副本,携带消息的源节点和中心节点分布式地执行消息传输过程。

以图 1 所示场景为例,当源节点  $i$  产生新消息之后,若其目的节点与节点  $i$  具有相同的归属社区,则直接将消息副本转发至目的节点;否则,节点  $i$  保存消息直到其与社区的中心节点  $k$  相遇,并将消息副本转发至节点  $k$  以快速到达目的社区,或借助与目的节点属于同一社区的节点完成携带。当中心节点所携带消息遇到节点  $m$  或节点  $b$  时,则再次执行中继传输;若遇到目的节点,则直接完成转发。

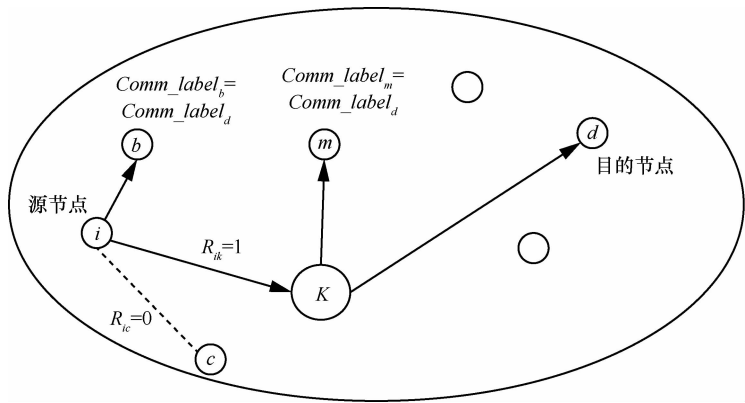


图 1 消息传输路径

4 数值分析

本文采用广泛使用的间断连接无线网络仿真平台对所提出的机制进行验证<sup>[11,12]</sup>,并与间断连接无线网络中两种经典的路由机制(喷洒等待(spray-and-wait, SNW)<sup>[13]</sup>路由以及传染(Epidemic)<sup>[14]</sup>路由)的性能进行比较。其中, SIGCOMM 会议上提出的 SNW 路由机制分为喷洒和等待两个阶段,源节点将若干个消息副本转发给所遇到的节点,之后携带消息节点进入等待阶段,直到与目标节点相遇并成功投递;而提出于美国杜克大学的 Epidemic 机制采用泛洪的方式广播数据分组,而不需要额外的网络状态信息。具体仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

| 参数设定                         | 参数数值        |
|------------------------------|-------------|
| 网络区域/m <sup>2</sup>          | 4 500×3 400 |
| 网络仿真时间/h                     | 24          |
| 社区内节点数量/个                    | 30          |
| 无线传输范围/m                     | 10          |
| 传输速度/(kbit·s <sup>-1</sup> ) | 250         |
| 消息间隔时间/s                     | [25, 35]    |
| 节点的缓存/MB                     | 5           |
| 单个消息大小/KB                    | [80, 150]   |
| 运动速度/(m·s <sup>-1</sup> )    | 1~6         |
| 停留时间/s                       | 0~10        |

图 2 描述了节点缓存容量对所提出的 CCR 机制、SNW 机制以及 Epidemic 机制的影响情况。随着节点缓存的增加,三者的消息传输率逐渐上升,同时,CCR 机制所

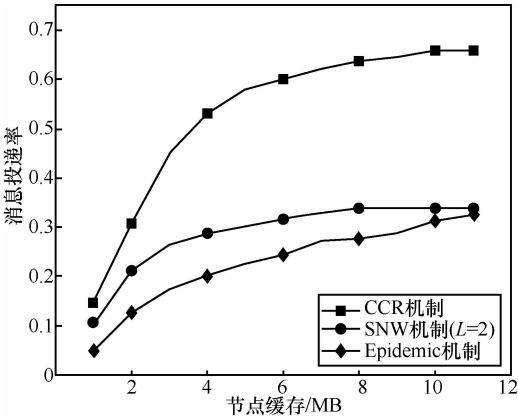


图 2 消息投递率和节点缓存的关系

带来的性能增益较为明显,其消息投递率比 SNW 机制高 90%,比 Epidemic 机制高 100%。其主要原因在于 SNW 以及 Epidemic 机制在选择中继节点时并未考虑网络结构状态,无法充分利用节点间的社会关系,带有较强的随意性。

图 3 描述了网络负载率与节点缓存之间的关系。Epidemic 机制在消息传输过程采用泛洪方式,浪费了较

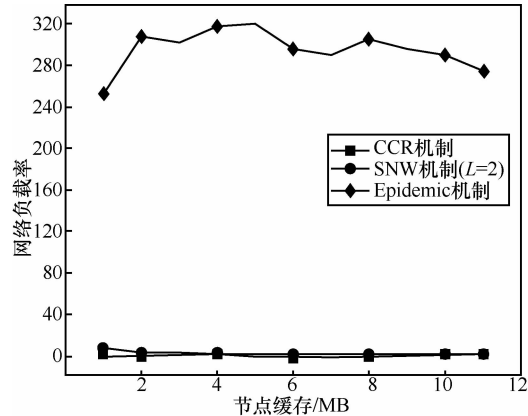


图 3 网络负载率和节点缓存的关系



多的网络资源,而 SNW 机制属于典型的两跳路由机制,且所设定的副本数量为 2,因此,SNW 与 CCR 机制在消息副本数量上比较接近。另外,采用 CCR 机制之后,节点产生的消息以较大概率选择归属社区的中心节点作为中继节点,进而转发至目的节点的归属社区,显著降低了节点转发次数。

图 4 描述了节点缓存容量与消息缓存时间的关系。消息的缓存时间越长,则中继节点选择的合理性能够得到更大程度的增强。虽然 SNW 机制中的消息缓存时间较长,但根据该机制的工作原理,源节点将消息转发给较早遇到的节点,然后进行等待。根据间断连接网络的基本原理,较早遇到的节点与源节点以较大概率属于相同社区,若散发阶段没有将消息转发给中心节点,则其他节点活跃程度较低,无法成功传输至目的节点,导致网络性能下降。因此,中继节点选择的合理性直接决定了网络性能。

图 5 描述了节点缓存与消息平均跳数的关系。消息在传输过程中所经历的跳数直接决定了网络资源利

用率。如前所述,SNW 机制是典型的两跳路由机制,相对跳数较少。对于 CCR 机制来说,大部分成功转发的消息要借助中心节点,消息成功投递只需要经过 1~3 跳,因此相对于 Epidemic 机制,其消息转发平均跳数有较大幅度的下降。

## 5 结束语

间断连接无线网络中,节点具有较强的社会属性,同时网络资源相对有限,消息转发过程受到多个方面因素的制约。按照本文所提出的路由方法,节点逐渐感知网络结构以及节点中心程度,并在消息转发过程中,合理地选择归属社区的中心节点作为中继节点,利用其较高的活跃程度,将消息“携带”至目的节点的归属社区。所提出方法的路由选择具有较强的针对性,能够根据网络状态动态地进行调整,有效地提高了网络资源利用率。

## 参考文献

- 1 Li Y, Zhang Z H, Wang C G, *et al.* Blind cooperative communications for multi-hop Ad Hoc wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(7): 3110~3122
- 2 Khabbaz M J, Assi C M, Fawaz W F. Disruption tolerant networking: a comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2012, 14(2): 607~640
- 3 Zhu Y, Xu B, Shi X H, *et al.* A survey of social-based routing in delay tolerant networks: positive and negative social effects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 387~401
- 4 Jiang P, Bigham J, Bodanese E, *et al.* Publish/subscribe delay-tolerant message oriented middleware for resilient communication. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(9): 124~130
- 5 牛建伟,周兴,刘燕等.一种基于社区机会网络的消息传输算法. *计算机研究与发展*, 2009, 46(12): 2068~2075
- 6 Fan J L, Chen J M, Du Y, *et al.* DelQue: a socially aware delegation query scheme in delay-tolerant networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(5): 2181~2193
- 7 王贵竹,张家勇,王炳庭. SA-DTN: 基于节点社会活跃度的 DTN 路由研究. *计算机应用研究*, 2011, 28(4): 1524~1526

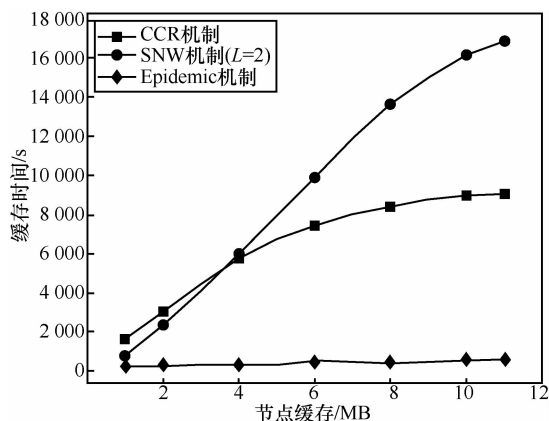


图 4 节点缓存和缓存时间的关系

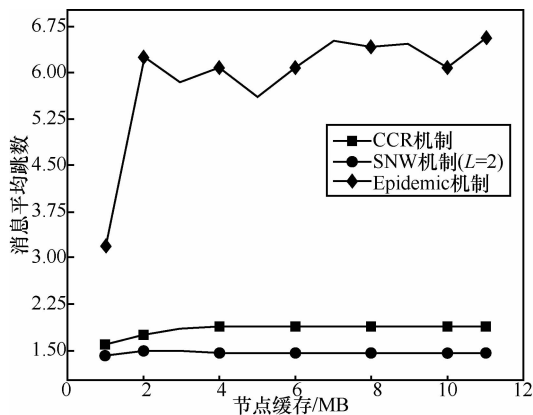


图 5 节点缓存和消息平均跳数的关系

- Wang G Z, Zhang J Y, Wang B T. SA-DTN: research of DTN routing based on node social activity. *Application Research of Computers*, 2011, 28(4): 1524~1526
- 8 Pan H, Crowcroft J, Yoneki E. Bubble rap: social-based forwarding in delay tolerant networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 10(11): 1536~1550
- 9 Dale E M, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETS. *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Montreal, Quebec, Canada, 2007: 32~40
- 10 Gao W, Li Q H, Zhao B, *et al.* Social-aware multicast in disruption-tolerant networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2012, 20(5): 1553~1566
- 11 Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation. *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (ICST)*, Athens, Greece, 2009: 1~10
- 12 黄沛昱, 应俊. 消息替换风险动态感知的缓存管理策略. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2014, 26(2): 233~237
- Huang P Y, Ying J. Dynamical message replicating risk aware cache management scheme. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2014, 26(2): 233~237
- 13 Spyropoulos T, Psounis K, Raghvendra C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. *Proceedings of SIGCOMM*, PA, USA, 2005:252~259
- 14 Vahdat A, Becker D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks. Technical Report CS-200006, Duke University, 2000

## [作者简介]



吉福生,男,重庆邮电大学宽带泛在接入技术研究所工程师,主要研究方向为网络管理及无线网络核心技术。



张洪沛,男,重庆邮电大学宽带泛在接入技术研究所硕士生,主要研究方向为社会化泛在无线网络路由技术及服务发现机制。



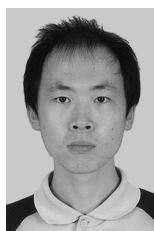
张炎,男,中国信息通信研究院工程师,主要研究方向为物联网技术及网络测试技术。

2015104-6

(上接 2015099-9)



熊钢,男,国家数字交换系统工程技术研究中心博士生,主要研究方向为新型网络体系、网络安全。



刘释然,男,国家数字交换系统工程技术研究中心硕士生,主要研究方向为新型网络体系、网络安全。



胡宇翔,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为新型网络体系、网络安全。



程东年,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心教授,主要研究方向为宽带信息网络、网络建模。

2015099-10