

























得,单播延迟为 1s,多播延迟也为 1s.

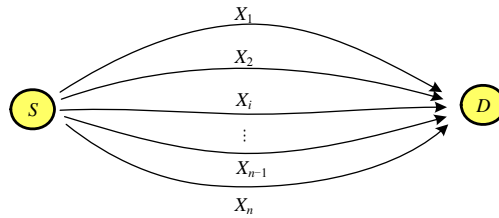


Fig.10 Multicast gain analysis

图 10 多播的收益分析

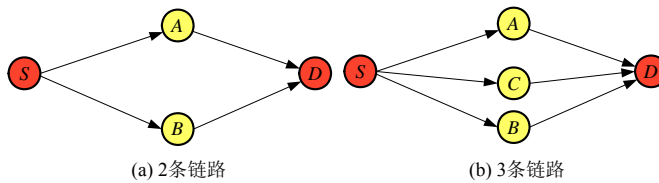


Fig.11 Influence of different link number on multicast gain

图 11 不同链路数量对多播收益的影响

Table 1 Path delay distribution (s)

表 1 不同路径延迟分布表 (s)

	路径 SAD	路径 SBD	路径 SCD
50%概率	1.5	2.5	3.5
50%概率	0.5	1.5	2.5

由上述分析可以看出,多播收益的大小取决于链路延迟的样本方差:当延迟完全已知时,多播没有收益,即  $D(C)=0$ ;而当链路延迟方差较大时,多播收益大.根据切比雪夫不等式的意义可知:多播收益大时,延迟的分布在均值附近,例如图 11(b)中的延迟分布;多播收益小时,延迟的分布离均值较远,如图 11(a)中的延迟分布.同时可以看到:多播的收益与链路选择的个数无关,即使 2 条链路也可以使多播收益达到最大.而在实际网络中,节点只能得到历史的延迟,未来的延迟分布是不可估计的,因此,多播是可以使延迟性能提高的.

2.3.3 动态多播

根据上述分析可以看出:在实际网络中,多播是存在优势的.但是多播势必会造成能量的浪费,而且会使网络中的流量增加,使发生拥塞的可能性增大.所以 RDR 的策略中,最多只使用 2 条路径的多播.关于多播的收益,本文在实验部分会给出实验数据,说明更多的路径并不会带来明显的提升.

RDR 的多播策略如下.

每当节点发送数据时,首先决策是否进行多播,决策的方法如下:节点首先检查待转发的数据包是否已经被上游节点设置为多播,已经被多播的节点不能再次进行多播,防止网络中出现广播风暴.节点对选定的发送候选节点集按照延迟进行排序:如果选定的导航节点是转发候选节点中平均延迟最低的节点,则不启用多播;如果不是,则启用多播.当不采用多播时,数据的发送如第 3.3.1 节中所述.

当使用多播时,节点首先将数据包中的多播标志位置 1,然后再设置发送候选集节点优先级,将导航节点和平均延迟表现最优的节点优先级设为最高,其余节点按照平均延迟从小到大的顺序依次设置优先级.当不使用多播时,则将导航节点设置为优先级最高的节点,其他节点按照平均延迟从小到大依次设置优先级.

发送数据时,将选定的转发节点集和他们对应的优先级同数据一起发送.这样的数据发送策略可以动态地进行链路的选择,使得数据向着延迟较低链路质量较好的节点传输,因此进一步降低了能耗,提升了鲁棒性,从而解决了低延迟高鲁棒性的挑战.

## 2.4 初始化和更新策略

### 2.4.1 初始化阶段

- 初始化阶段,从节点上电开始,所有节点在初始化过程中不休眠,由 sink 节点发起,sink 节点广播一个初始化包,表示初始化开始;
- 每个节点内部维护一个邻居节点表,表中包含邻居节点的 NODEID、平均延迟和发送成功率,初始值均为空;
- 节点收到初始化包后,将 NODEID 加入自己的邻居节点集,当节点第一次收到初始化包时,节点随机退避一段时间,在退避时间到后,节点重新广播这个初始化包,然后节点持续监听一段时间  $T_i$ ,  $T_i$  为初始化阶段的预计时长;
- 节点在监听过程中记录收到的广播包的 NODEID 并加入到自己的邻居节点集中。

这样,网络将以洪泛的方式初始化,初始化完成后,所有节点都得到一个完整的邻居节点集。

### 2.4.2 邻居信息更新

由于 RDR 需要使用邻居节点的发送成功率和延迟等数据,所以本质上说,RDR 是一个同步协议,即协议需要周期性地对邻居节点信息进行同步,同步的方法如下。

- 每个节点内部维护一个周期定时器,每当定时器时间到时,节点发起一次邻居信息更新,节点广播一个探测包,周围的邻居节点收到探测包,设置一个退避时间,在退避时间到后,将自己的邻居节点表发送给探测节点;
- 节点通过对这些信息的收集,更新维护的邻居节点表.每个节点对周围节点记录最近 10 次的发送延迟和发送成功率,并使用这些数据对延迟和发送成功率进行计算。

这样,当链路质量变化或者节点出现故障等破坏因素出现时,周围节点可以迅速感知.通过这样的更新操作,节点掌握两跳内的链接信息。

## 2.5 小结

本节提出了一种低延迟高鲁棒性的路由协议 RDR,首先对机会路由的优势进行了分析;然后,基于机会路由的思想设计了一种有效的高鲁棒性的路径探测机制,通过探测找到源节点到目的节点的一条路径和沿途的协助转发节点;然后分析了多播在数据传输阶段的优势,并以此为依据,提出一种动态的多播方法;最后介绍了协议初始化和信息更新的相关细节。

## 3 实验仿真

前文介绍了一种高鲁棒性低延迟的路由协议(RDR)理论上的建模和分析,本节将通过仿真实验,验证前文提出的协议各方面的性能表现.实验使用 OMNeT++平台,该平台对常见协议进行了封装,并且由较好的 GUI 支持,可以动态观察到协议运行情况。

### 3.1 高鲁棒性低延迟的路由协议的仿真实验

对于路由协议 RDR,仿真实验主要针对其延迟性能;此外,对传输成功率,控制包数量等也进行了分析,对比实验对比的协议主要是 ADOV 和传统的机会路由.AODV 是经典的带有路径发现的协议<sup>[19]</sup>,RDR 在此基础上进行了深入优化,所以对比实验选择了 AODV,机会路由由选取延迟表现较好且较新的 ORW<sup>[29]</sup>,该协议可以在低占空比下保证较好的延迟表现,同时又是典型的机会路由;RDR 也使用了机会路由的思想,所以选择它来进行对比,本文通过实验说明 RDR 与机会路由间的优劣。

#### 3.1.1 多播有效性的实验

首先,RDR 中使用了多播,在第 3.3.1 节中对多播的提升做了理论上的分析,得出结论是:多播的收益取决于链路的可预测性,当可预测性越高时,收益越小,可预测性越低时收益越大.本节将设计一个实验验证多播的有效性。

选取一对源节点和目的节点,网络的其他设置见表 2.

**Table 2**  
表 2

参数名称	值
单跳链路延迟	0.5ms
跳数	5
路径数量	5
丢包率	0.1
重传耗时	1.5ms

分别使用 1~5 条路径进行数据发送,得到结果如图 12 所示.

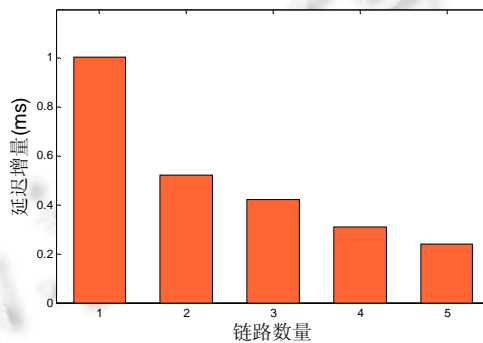


Fig.12 Link number v.s. delay increment

图 12 链路数量与延迟增量的关系图

可见:当使用 1 条路径时,端到端延迟比理想状态长 1ms 左右;而使用两条或多条链路,则可以使延迟增量降低,其中,尤其以使用两条链路对延迟的优化效果最明显.由图 12 可见:使用 2 条链路时,延迟增量下降了将近一半;而使用 3~5 条链路时,虽然延迟也有所下降,但是下降幅度不大;同时,使用多条链路会带来网络负载提升,使用链路增加会显著提升拥塞发生的概率、能耗增加等副作用,所以多播策略中只使用两条链路进行多播.由以上分析可以确定 RDR 的策略是可行并且高效的.

### 3.1.2 协议性能评估和分析

本节使用 AODV 和传统机会路由作为对比的实验,分别从以下几个方面对协议性能进行评估.

- (1) 端到端延迟;
- (2) 数据发送成功率;
- (3) 单跳延迟;
- (4) 能量消耗.

实验使用的网络拓扑包含 100~200 个节点、300 条链路,节点随机部署在 2 维平面中,由拓扑生成器直接生成.链路模型采用简单的延迟模型,节点模型采用简单节点模型.实验的其他初始设定见表 3.

**Table 3**  
表 3

参数名称	值
链路延迟	100~500( $\mu$ s)
探测包退避间隔单位	5ms
数据包退避间隔单位	10ms
重传次数	3

### (1) 端到端延迟的实验和分析

本实验首先使用 5 跳的源节点目的节点对,丢包率取值从 0.1~0.5.这里不选择更高的丢包率进行实验,是因为过高的丢包率得到的数据不具有代表性;同时,在实际应用中,如此高的丢包率也基本不存在.作为对比,此处采用 3 种不同的协议对端到端延迟进行了实验,其中,在机会路由的实验中,实验忽略了机会路由无法寻找目的节点的缺点,将数据流向手动设置为正确的方向.同时,实验只记录成功送达的数据包,实验结果如图 13 所示.可见:在丢包率较低的情况下,3 种协议的端到端延迟都较短,而三者之间的差异主要是由于协议类型所引起的,AODV 由于要重传,偶然的丢包会使延迟增加,但是由于丢包不多,所以端到端延迟不是很大;RDR 表现是最好的,由于有协助节点,所以基本不受偶然丢包的影响,而机会路由由于每一跳都要进行探测和选择,所以即使信道质量较好,丢包率较低时,延迟也不会特别短.当丢包率上升时,可见对机会路由的影响并不大,机会路由会根据路由代价动态地计算,自动选择丢包少的链路;AODV 则受到丢包影响较大,基本呈线性关系,因为丢包的发生会造成重传,而 AODV 协议的丢包必然会造成延迟的增加;反观 RDR 受到丢包影响不大,在 0.3~0.35 处的陡增可能是因为所有 helper 均失效的情况发生,而这种情况发生的概率很低,所以延迟会变长,但是不会增加太多,总体延迟情况好于其他两种协议.

### (2) 单跳延迟分析

由上节可知:当数据包丢包率较低的时,3 种协议的延迟性能都较好,所以这里使用同上一节一样的网络配置,并将数据包丢包率设置为 0.1,然后对 3 种协议的单跳延迟进行实验,实验的结果如图 14 所示.由实验结果可以发现:RDR 和 AODV 协议的第 1 条延迟都特别的长,而后面几跳延迟相对较短.这是由于这两个协议都是基于路径探测的,当节点发送数据时首先要进行路径探测,找到路径后才可以进行数据发送,而路径探测需要花费一定的时间,所以导致第 1 跳时间变长.对比两者发现:RDR 在每一跳的单跳延迟都比 AODV 要短,无论是探测的效率还是数据转发的效率,RDR 都强于 AODV.而机会路由由于是每一跳单独进行决策,所以单跳延迟比较平均;同时,由于每一跳都需要探测并决策,所以每一跳延迟都相对较长.

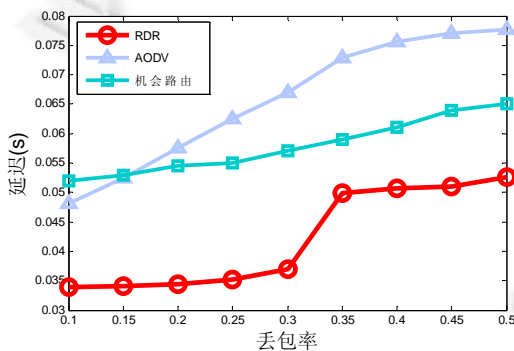


Fig.13 Package loss ratio v.s. end-to-end delay  
图 13 丢包率和延迟关系图

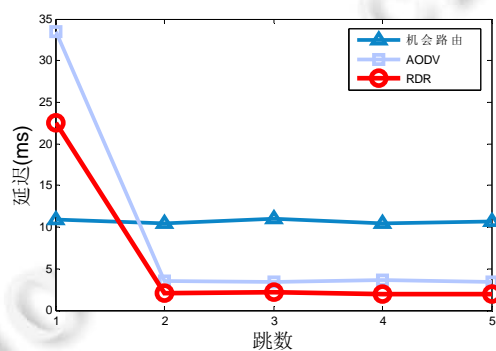


Fig.14 Hop count v.s. one hop delay  
图 14 跳数与延迟的关系图

### (3) 发送成功率的实验和分析

本实验将节点密度设为 100~200,链路丢包率设为 0.1,其他设定如前.对 3 种协议的数据发送成功率进行了比较.实验结果如图 15 所示.由图 15 可以明显地发现,数据发送成功率都很高.这主要是因为重传的存在,即使偶尔发生丢包,节点也会根据 ACK 进行判断,并及时进行重传,所以数据传输的成功率协议均可以得到保障.需要注意的是:RDR 在节点分布密集的情况下反而成功率有所下降.原因由于节点分布密集,从而导致不同的探测包和探测应答包发生碰撞引起的.而从结果上来看,碰撞的影响并不是很大.

### (4) 能量消耗分析

除了基本数据包的传输,控制包的数量直接影响了节点和网络的能量消耗,本小节使用控制包数量作为度量,分析 RDR 在能量消耗水平上的表现.控制包包括 RTS/CTS、各种探测包和 ACK,这里使用与上节相同的网

络设置,对6种协议的控制包数量进行了仿真实验.实验结果如图16所示.由图16可以明显地看出:RDR在控制包数量上远少于AODV,但是比机会路由略多一些.其原因是因为AODV协议使用的是任播(unicast),这样会使网络中的数量急剧增加;而RDR在进行广播之前会先进行选择,只对选中的节点进行发送,即使用的是(multicast),所以会使控制包数量减少.而机会路由相对来讲只需要很少的控制包,这是由于机会路由本身不需要进行路径探测,只需要每个节点发送数据之前进行单跳内探测即可,但其他两种协议需要进行路径探测,所以控制包的数量必然会相应地多一些.虽然RDR控制包在控制包数量上多于机会路由,但是本实验忽略了机会路由无法寻路的问题,所以机会路由只能适用于特定的场景,无法做到任意节点间的收发,而RDR则不受影响.

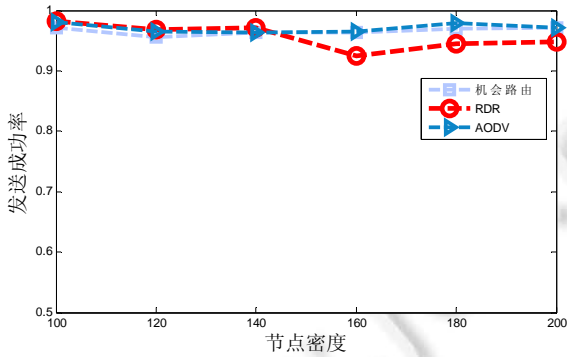


Fig.15 Node density v.s. successful ratio

图 15 节点密度与发送成功率的关系图

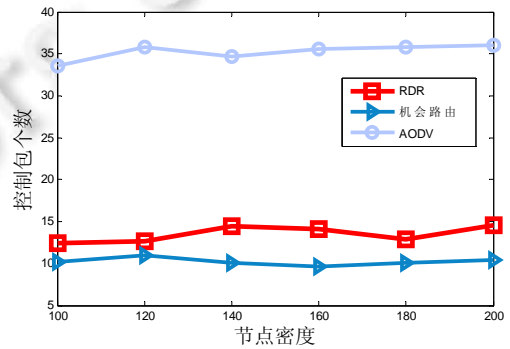


Fig.16 Node density v.s. quantity of control packages

图 16 节点密度与控制包个数的关系图

#### 4 总结与展望

无线传感网中,很多应用对数据的实时性要求很高,这类应用除了对延迟有要求外,还有对鲁棒性有很高的要求.针对这个挑战,本文提出一种高鲁棒性低延迟的路由协议(RDR),通过合理的路径探测,保证任意节点间低延迟通信.在探测的过程中确定协助转发节点,当数据发送失败时,用这些协助转发节点可以协助数据转发,以此增强鲁棒性.在数据发送阶段,使用多播来动态选取路径,保证数据从相对较好的路径被转发.最后,对提出的协议进行了仿真实验和分析,说明了本文所提出的协议的合理性和正确性.

下一步的工作包括:(1) 增加对能量消耗的优化,减少与数据无关的探测和转发,使协议更加高效;(2) 增加真实系统实现,用系统实际运行结果验证协议的可行性.

#### References:

- [1] Losilla F, Garcia-Sanchez AJ, Garcia-Sanchez F, Garcia-Haro J, Haas ZJ. A comprehensive approach to WSN-based ITS applications: A survey. *Sensors*, 2011,11(11):10220-10265.
- [2] Liang S, Hu Y, Wang KZ, Xian XD. Design of landslide warning system based on wireless sensor network. *Journal of Sensor Technology*, 2010,23(8):1184-1188 (in Chinese with English abstract).
- [3] Tang Y, Zhou MT, Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2006,17(3):410-421 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm>
- [4] Heinzelman WR, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. ACM Press, 1999. 174-185.
- [5] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: *Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. ACM Press, 2000. 56-67.
- [6] Yao Y, Gehrke J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM Sigmod Record*, 2002,31(3):9-18.



- [7] Sadagopan N, Krishnamachari B, Helmy A. The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks. In: Proc. of the 2003 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. IEEE, 2003. 149–155.
- [8] Amadeo M, Campolo C, Molinaro A, Ruggeri G. Content-Centric wireless networking: A survey. *Computer Networks*, 2014,72(7): 1–13.
- [9] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences, Vol. 2. IEEE, 2000. 10.
- [10] Marappan P, Rodrigues P. An energy efficient routing protocol for correlated data using CL-LEACH in WSN. *Wireless Networks*, 2016,22(4):1–9.
- [11] Shen B, Zhang SY, Zhong YP. Cluster-Based routing protocols for wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2006,17(7):1588–1600 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1588.htm>
- [12] Mehmood A, Lloret J, Noman M, Song H. Improvement of the wireless sensor network lifetime using LEACH with vice-cluster head. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2015,28(1):1–17.
- [13] Ma Z, Li G, Gong Q. Improvement on LEACH-C protocol of wireless sensor network (LEACH-CC). *Int'l Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016,9(2):183–192.
- [14] Zhang HY, Li YY, Liu YH. Research progress of routing protocols based on geographic location in wireless sensor networks. *Computer Application Research*, 2008,25(1):18–21 (in Chinese with English abstract).
- [15] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of the 7th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. ACM Press, 2001. 70–84.
- [16] Petrioli C, Nati M, Casari P, Zorzi M, Basagni S. ALBA-R: Load-balancing geographic routing around connectivity holes in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Parallel & Distributed Systems*, 2014,25(3):529–539.
- [17] Chang JH, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(4): 609–619.
- [18] He T, Stankovic JA, Lu C, Abdelzaher T. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In: Proc. of the 2003 23rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. IEEE, 2003. 46–55.
- [19] Lee SJ, Gerla M. AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks. In: Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2000), Vol.3. IEEE, 2000. 1311–1316.
- [20] Johnson DB, Maltz DA, Broch J. DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. In: Proc. of the Ad Hoc Networking. 2006. 139172.
- [21] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multi-hop wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004,34(1): 69–74.
- [22] Tian K, Zhang BX, Ma J, Yao Z. Opportunistic routing protocols for wireless multihop networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(10):2542–2553 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3740.htm>
- [23] Chakchouk N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015,17(4):1–1.
- [24] Zeng K, Yang Z, Lou W. Location-Aided opportunistic forwarding in multirate and multihop wireless networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2009,58(6):3032–3040.
- [25] Erramilli V, Crovella M, Chaintreau A, Diot C. Delegation forwarding. In: Proc. of the Acm Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. DBLP, 2008. 251–260.
- [26] Fang X, Yang D, Xue G. MAP: Multiconstrained anypath routing in wireless mesh networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1893–1906.
- [27] Zhang X, Li B. Dice: A game theoretic framework for wireless multipath network coding. In: Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM Press, 2008. 293–302.
- [28] Pavković B, Theoleyre F, Duda A. Multipath opportunistic RPL routing over IEEE 802.15.4. In: Proc. of the Int'l Symp. on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM 2011). Miami: DBLP, 2011. 179–186.
- [29] Ghadimi E, Landsiedel O, Soldati P, Duquennoy S, Johansson M. Opportunistic routing in low duty-cycle wireless sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2016,10(4):1–39.

附中文参考文献:

- [2] 梁山,胡颖,王可之,鲜晓东.基于无线传感器网络的山体滑坡预警系统设计.传感技术学报,2010,23(8):1184-1188.
- [3] 唐勇,周明天,张欣.无线传感器网络路由协议研究进展.软件学报,2006,17(3):410-421. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm>
- [11] 沈波,张世永,钟亦平.无线传感器网络分簇路由协议.软件学报,2006,17(7):1588-1600. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1588.htm>
- [14] 张衡阳,李莹莹,刘云辉.基于地理位置的无线传感器网络路由协议研究进展.计算机应用研究,2008,25(1):18-21.
- [22] 田克,张宝贤,马建,姚郑.无线多跳网络中的机会路由.软件学报,2010,21(10):2542-2553. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3740.htm>



兰轩宇(1991—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,主要研究领域为无线传感网.



彭瑶(1984—),女,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为无源感知网络,数模混合电路设计,SoC 设计.



陈晓江(1973—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为无线网络定位及性能研究.



房鼎益(1959—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络与信息安全,数字内容与计算机软件安全保护,无线传感器网络及其应用,移动计算,分布计算系统.



徐丹(1988—),女,博士生,工程师,CCF 学生会员,主要研究领域为物联网数据传输.

www.jos.org.cn