

延迟容忍网络状态感知的路由策略研究

吴亚辉* 邓 苏 黄宏斌

(国防科技大学 C4ISR 重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 延迟容忍网络具有间歇连通的特点, 这为数据传输提出了很大的挑战。目前的路由算法没有充分考虑节点的整个状态(位置、速度), 该文提出了一种节点状态感知的路由策略 SARM(Situation-Aware Routing Method)。SARM 根据节点的状态估计它能把消息传送到汇聚节点的可能性, 并把消息复制到那些比自身可能性大的节点上。该文根据消息的生存时间、剩余时间及复制次数提出了一种消息队列管理机制。仿真实验表明, SARM 在不增加消息副本数量的情况下提高了传输成功率并降低了传输延迟。

关键词: 延迟容忍网; 路由策略; 传输概率; 队列管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0575-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00410

Research of Situation-aware Routing Method in Delay Tolerant Network

Wu Ya-hui Deng Su Huang Hong-bin

(Key Laboratory of C4ISR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The characteristic of loose connectivity of Delay Tolerant Network (DTN) is a huge challenge for data delivery. All of the routing methods do not thoroughly use the status of the peer, so SARM (Situation-Aware Routing Method) is proposed. SARM estimates the delivery probability of a peer according to the peer's situation, and copies the message to its neighbor whose delivery probability is bigger. A queue management method is proposed according to the message's age, time of left and the number of copies. Simulation shows that SARM achieves a higher message delivery ratio and lower delivery delay without more transmission overhead.

Key words: Delay Tolerant Network (DTN); Routing method; Delivery probability; Queue management

1 引言

移动自组网(Mobile Ad hoc Network, MANET)是近年来的一个研究热点, 传统 MANET 的研究大都假设底层网络是连通的, 即任意收发节点之间在数据传输之前存在一条完整的通信路径。然而, 许多新兴网络都无法满足以上要求, 如星际网络(IPN)^[1]、战术通信网^[2]及野生动物检测传感网络^[3]等, 在这些应用中, 节点高速移动、节点稀疏、交替活跃及恶意攻击等原因造成网络在很多情况下是不连通的, 具有间歇连通的特点, 这可能导致节点对由于不存在通信路径而无法及时传输信息。所以, 以上应用必须能够容忍一定程度的延迟, 这类网络统称为延迟容忍网(Delay Tolerant Network, DTN)^[4]。由于无法保证存在完整的通信路径, 传统 MANET 的一系列路由策略不能直接应用到 DTN 中。

目前已有学者对 DTN 的路由策略进行了一定

的研究, 其中最基本的传输策略是直接传输(Direct Transmission, DT)^[5]和泛洪(Flooding)。在直接传输策略中, 节点需要把数据存储起来, 直到与汇聚节点相遇才进行数据传输, 这种策略延迟非常大, 传输成功率低, 泛洪策略则把消息复制给运动到其通信范围内的所有节点(不管是不是汇聚点), 显然这种策略冗余非常大且需要耗费大量的节点能量。以上两种路由策略非常简单, 但也存在很多问题。设计合适的信息转发策略, 将信息尽可能复制到更有可能与汇聚节点相遇的节点上, 取得传输成功率、传输延迟及能耗之间的一个平衡, 是 DTN 路由策略的一个研究重点。

文献[6]提出了基于历史信息的路由方法 ZEBraNet, 以节点过去成功地将消息直接传输到汇聚节点的概率作为路由决策的依据, 具有高概率值的节点意味着更有可能把数据传输到目的地, 当两个节点接触时, 消息将传递给具有更高概率的节点。

文献[7]提出 RED(Replication-based Efficient data Delivery)策略, 它对传输概率的计算采用了改进的基于历史记录的方法, 每当发生消息传输时,

2010-04-23 收到, 2010-11-15 改回

*通信作者: 吴亚辉 yahui_wu@163.com

就增加节点的传输概率,若一段时间内没有发生通信,则适当减小传输概率的值。

以上算法在一定程度上提高了传输效率,但在很多场景中,节点运动无记忆性,根据历史记录来决定转发策略在这些场景中并不能取得效率的提高。

文献[8,9]分别提出了SRAD(Selective Replication-based Adaptive data Delivery)和RDAD(Relative Distance-Aware data Delivery)策略,这两种算法都是根据节点与汇聚节点的相对距离来计算概率,与ZebraNet和RED算法相比在节点随机运动的场景中效率更高,但是仍然存在一些问题:首先,它们都假设知道节点在每一步随机选择的目的地 D ,并根据 D 来设计自己的算法。事实上,很多情况下,节点并不知道自己下一步运动到什么位置,它可能在遇到突发事件时随时随地改变自己的运动方向及运动速度,这导致以上算法不适用。其次,以上算法主要考虑节点的位置,没有充分利用节点的运动速度。

2 网络模型及 SARM 策略

2.1 网络模型

本文假设 N 个普通节点及 K 个汇聚点随机部署在一个 $M \times M$ 的2维区域 A 内, N 个节点的通信半径均为 r ,汇聚点的通信半径为 R ,且节点可以通过GPS在任意时刻获取自己的位置。所有节点均遵循Random Way Point(RWP)^[10]运动模型,该模型可以描述为:节点在运动空间 A 内随机选取起始点 S 和目的点 D ,随机选取 v 作为此次运动的速度,其速率在 (v_{\min}, v_{\max}) 范围内选取,匀速从 S 沿直线运动到 D ,在 D 随机选取一个时间 t 属于 (T_{\min}, T_{\max}) 保持静止,这样完成一次运动过程,如此重复。

为了使得RWP模型更加符合实际,本文对它进行了少许改进。事实上,在很多情况下节点很少急剧改变自己的运动速度(包括方向,速率),也就是说,节点在任一起始点并不是完全随机选择自己的运动速度,而是以更大的概率从自己当前速度附近的一个区间内进行选择,在试验部分我们会验证不同概率所造成的影响。

2.2 SARM传输概率计算

如图1所示,黑色的点为汇聚节点,其余均为普通节点,大虚线圆表示汇聚点广播的覆盖范围,小虚线圆表示普通节点的通信覆盖范围,箭头表示节点运动方向。大虚线圆内的所有节点都能收到汇聚节点的广播消息,从而就能知道自己到汇聚点的距离,基于相对距离的算法(RDAD等)就依据此距离

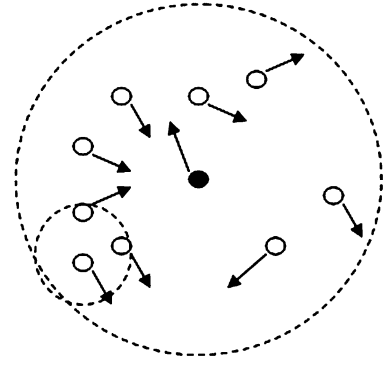


图1 节点状态图

(有些会用到历史距离)来计算传输概率。

然而,影响消息传输的不只是相对距离,节点与汇聚节点的相对移动速度也会影响到消息的有效传输,如图1中小虚线圆中的3个节点,处于圆心位置的节点向汇聚点发送信息,按照RDAD算法,小圆中最右侧的那个节点会得到一个消息副本。然而,从图中我们可以看出,其运动方向与汇聚点运动方向相反,且节点保持该运动模式的概率较大,因此,该节点有较大的概率远离汇聚节点,这很可能造成较大的传输延迟。SARM算法充分考虑到了这一点。

令 P_i 表示节点 i 的传输概率,如果有汇聚节点在节点 i 的通信范围内,意味着节点 i 可以把消息直接传输到汇聚点,因此置 P_i 为1,否则就要通过节点的位置及速度信息来计算。如图2所示,节点 i 表示普通节点,其上箭头表示该节点的运动速度 v_1 ,黑色节点表示汇聚节点, v_2 代表其运动速度, $v = v_2 - v_1$ 代表两个节点的相对速度, d 代表节点 i 与汇聚点的相对距离向量,并且我们规定该向量的指向都是从汇聚点指向目标节点, θ 代表 v 与 d 之间的夹角,显然 $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ 。

对于任一速度向量 v ,我们用 $\|v\|$ 表示其大小,即速率,同样 $\|d\|$ 代表向量 d 的大小。因为 $\|v_1\|, \|v_2\| \in (v_{\min}, v_{\max})$,所以可以得出 $0 \leq \|v_2 - v_1\| \leq 2v_{\max}$ 。

为了计算节点 i 的传输概率 P_i ,我们有公式:

$$P_i = (1 - \alpha)P_{vi} + \alpha P_{di} \quad (1)$$

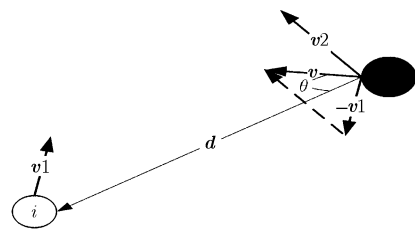


图2 节点速度示意图

其中 P_{vi} 根据相对速度进行计算, P_{di} 利用相对距离进行计算, α 代表加权因子。

从图2可以看出,夹角 θ 越大,节点 i 与汇聚点之间就越可能相互背离,因此夹角越大传输概率应该越小,反之,则越大,故我们有公式:

$$P_{vi} = \frac{\|v\|}{2v_{\max}} \left(\frac{\theta}{90} - 1 \right) \quad (2)$$

显然 $0 \leq \|v\| / (2v_{\max}) \leq 1$, $-1 \leq (\theta/90) - 1 \leq 1$, 由此可知 $-1 \leq P_{vi} \leq 1$, 因为传输概率并非真正意义上的概率,所以本文中可以为负值。根据两向量的夹角余弦公式,可以得到 θ 为

$$\theta = \arccos \left(\frac{v \cdot d}{\|v\| * \|d\|} \right) \quad (3)$$

P_{di} 的计算借鉴文献[11]的方法,不同的是我们用的是普通节点的通信距离,因为这里的数据传输主要是从普通节点到汇聚节点,所以只有汇聚节点到达普通节点的通信范围才能发生数据传输。计算公式如下:

$$P_{di} = \begin{cases} 1, & r \geq \|d\| \\ r / \|d\|, & r < \|d\| \end{cases} \quad (4)$$

至此,式(1)中还有一个未知参数 α ,该参数决定了 P_{vi} 以及 P_{di} 哪个所占比重更大,直观上,我们可以想象如果节点与汇聚点的距离较近,则 P_{di} 应该占居较大的比重,反之,速度应该起更加重要的作用,因此,我们可以有公式:

$$\alpha = P_{di} = \begin{cases} 1, & r \geq \|d\| \\ r / \|d\|, & r < \|d\| \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,如果汇聚点在节点 i 的通信范围内,则 $\alpha = 1$,这时候只需要考虑相对距离即可,否则速度就会影响到传输概率,且距离越远影响越大。

2.3 SARM路由及队列管理策略

SARM路由策略的基本思想为:每当节点 i 需要传输数据,检查消息目的地,如果存在对应汇聚点在其通信范围内,则直接完成传输,并在本地删除相应消息。否则,检查自己的所有邻居节点,对于任一邻居节点,如果其对应传输概率大于自己的概率值,则把消息复制到该邻居,如此反复,直至传输到汇聚节点。由于该策略采用复制的方式传输数据,会造成极大的数据冗余,能否有效地管理消息队列会对路由策略产生很大的影响^[12,13]。

假设每个节点最多可容纳 L 条消息,任一消息 s_i 可用一个5元组 $\{sou_i, des_i, T_{ai}, T_{li}, n\}$ 表示,其中 sou_i 表示消息 i 的起始节点, des_i 表示目标节点, T_{ai} 表示消息年龄,也就是生存时间, T_{li} 表示消息还有

多长时间的有效期,即剩余时间, n 表示转发次数。显然对于一条消息,其起始节点与目标节点保持不变,需要不断更新的主要是最后3个属性。假设两个节点 i 和 j 到达各自的通信范围,则相应属性更新策略如表1所示。

表1 相应属性更新策略

表1 相应属性更新策略	
Foreach(Node $i.s_p = $ Node $j.s_q$)	
{	//如果两个节点中存在相同消息,则比较这些相同消息的 T_{ai} , T_{li} , n 属性值,对于属性 T_{ai} 和 n ,取较大的那个值,对于属性 T_{li} 则取较小的值。
	Node $i.s_p.T_{ai} = $ Node $j.s_q.T_{aj} = \max(\text{Node } i.s_p.T_{ai}, \text{Node } j.s_q.T_{aj});$
	Node $i.s_p.T_{li} = $ Node $j.s_q.T_{lj} = \min(\text{Node } i.s_p.T_{li}, \text{Node } j.s_q.T_{lj});$
	Node $i.s_p.n = $ Node $j.s_q.n = \max(\text{Node } i.s_p.n, \text{Node } j.s_q.n);$
}	
If(Node i send message s_k to Node j)	
{	//假设两个相邻节点传输信息所用时间忽略不计,如果节点 i 向 j 传输信息 s_k ,则 s_k 的属性 n 加1,且把该消息作为一个新消息存储,属性与节点 i 的 s_k 相同。
	Node $i.s_p.n++;$
	Node $j.s_{\text{new}} = $ Node $i.s_k;$
}	

此外,无论是否发生信息交换,属性 T_{ai} , T_{li} 都要随着时间的推移不断更新。

上面介绍了消息属性的更新策略,那么消息队列如何管理呢?也就是说,当一个节点的消息存储已满,但又有新消息到达时,我们应该丢弃那一条消息呢?为了有效地进行消息队列管理,在存储时我们就对所有消息排队,首先按照生存时间排队,然后是转发次数,最后是剩余时间, T_{ai} 越大,消息约靠前,如果 T_{ai} 相同,则比较 n , n 越大越靠前,如果 T_{ai} 和 n 均相同,则比较 T_{li} , T_{li} 越小越靠前。这样每当接收到一条新消息,就与消息队列中的第一条消息 s_1 进行比较,如果经比较新消息比 s_1 还要靠前,由于存储已满,则丢弃新消息,否则丢弃 s_1 ,并把新消息与队列中的其余消息比较,然后插入相应位置。

3 模拟实验

本文基于NS-2平台进行仿真,NS-2(Network Simulator Version 2)^[14]是一种开源的免费软件,使用者可以自由下载并对其进行改进以符合自己的需要。它主要基于Unix平台,在Windows下,需要首先安装Cygwin虚拟Unix环境。本文即使用Windows+Cygwin+NS-2方式。

实验基本参数如表2所示。

表2 算法基本参数

参数	默认值
网络空间尺寸	200 m × 200 m
汇聚点最大广播半径	100 m
传感器节点速度范围	1~10 m/s
停止时间范围	0~120 s
消息队列长度 L	150
节点个数 N	100
汇聚点个数 K	2
节点通信半径	5 m
消息最大生存时间	500~2000 s

汇聚节点每隔5 s广播一次,广播内容包括自己的位置及当前速度,节点数据产生过程遵循平均到达时间间隔为100 s的泊松过程。

3.1 节点运动模式对性能的影响

前文提到,为了使RWP模型更符合实际运动规律,我们认为节点一般不会急剧改变自己的运动速度,因此假设节点以一定概率 P 在当前速度附近变化,本实验就是为了验证 P 的不同取值对传输性能的影响,并把SARM与Flooding、Direct Transmission(DT)及RDAD算法进行比较。为简单起见,如果节点当前速度为 v ,我们把所谓的当前速度附近设置为 $(\max(0, v-2), v+2)$,因为速度取值范围为1~10,如果是均匀分布,则在范围 $(\max(0, v-2), v+2)$ 内取值的概率是0.4,大于0.4,就说明在节点在当前速度附近取值的概率越大,反之越小。实验结果如图3(a)~3(c)所示。

从图3(a)可以看出随着概率 P 的增大,SARM算法的传输成功率不断提高,但在 P 较小的时候,SARM算法的传输成功率不如RDAD,这是因为节点速度发生较大改变的机率很大,根据当前速度计

算的传输概率很快就会失效。与RDAD算法一样,SARM也是在每一步查看自己的邻居节点,将信息复制到最可能到达目的地的节点上,只不过RDAD仅仅依靠相对距离,SARM算法依据整个节点状态,所以说状态决定了一个节点是否可以得到副本,从而就决定了每一步产生副本的数量。然而,节点状态具有随机性,这导致我们无法决定每一步到底哪个算法产生的副本多,因此,与RDAD相比,SARM在平均副本数方面并没有很大的提高,而且由于节点运动的随机性,平均副本数存在一定得波动,这些从图3(b)就可以看出。图3(c)显示出SARM算法在 P 较大时,平均延迟比其它算法都小,且RDAD算法的传输延迟随着概率增加有所上升,这是因为此时速度变化比较小,速度对信息传输影响较大。

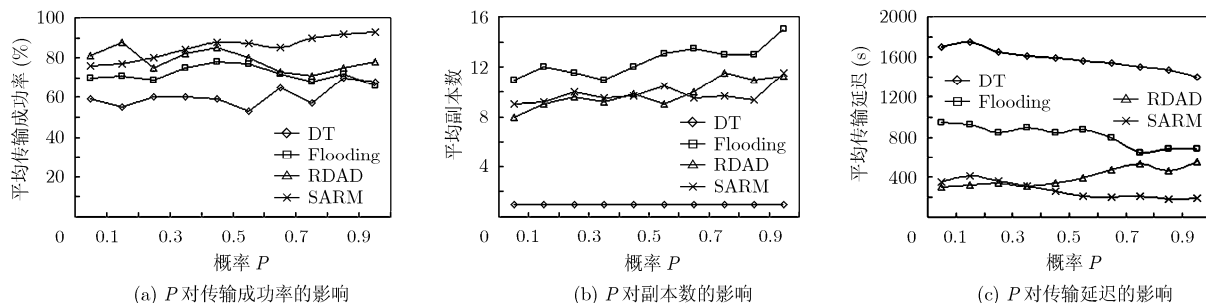
3.2 节点密度对性能的影响

本实验将 P 设置为常数0.6,即在范围 $(\max(0, v-2), v+2)$ 内取值的概率为0.6,同时将节点数量从20不断增长到160。实验结果如图4(a)~4(c)。

从图4(a)可以看出RDAD算法与SARM算法随着节点密度的提高,传输成功率都有所提高,但是增幅都不是很大,不过还是可以看出SARM算法比其它3个算法成功率更高。由于节点密度的增加,节点间相遇机会增大,从而副本数量也在增加,而DT算法是与汇聚节点之间交换信息,并不产生拷贝,因此,副本数量始终为1,从图4(b)可以看出。图4(c)说明SARM算法平均延迟最小,并且与RDAD算法一样随着密度增加,延迟不断降低。

4 结束语

目前已有许多关于DTN网络的路由策略,但都没有充分地考虑节点的整个状态(位置、速度),正是针对这一点本文提出了SARM策略,并且综合考

图3 概率 P 的影响

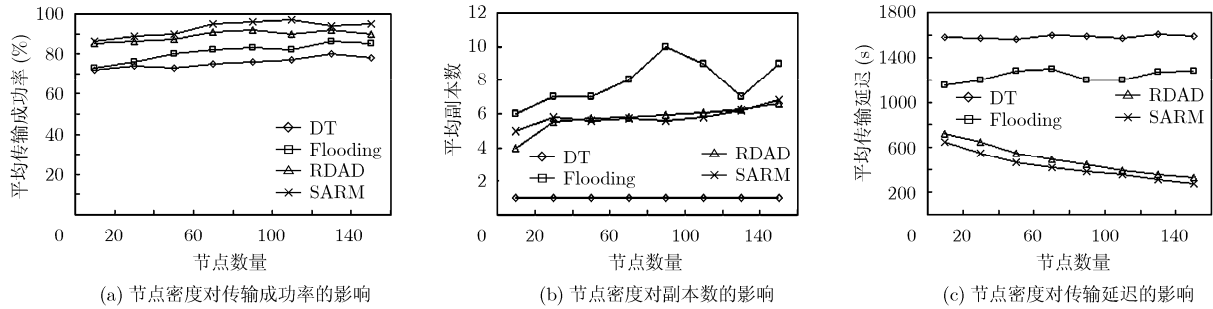


图4 节点密度对算法的影响

考虑消息年龄、剩余时间及副本数量, 提出了一种有效的消息队列管理机制, 模拟实验证明了该方法的有效性。

本文假设普通节点是同构的, 未来可以进一步考虑异构节点的路由策略, 节点异构情况下, 通信范围是不一样的, 在计算传输概率的时候, 必须考虑到这一点。为了简单起见, 本文中的消息大小也是一样的, 实际上这是不可能的, 在此情况下, 每当消息队列拥挤时, 是丢弃一个大消息还是几个小的也是值得进一步深入研究的问题。

参考文献

- [1] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, Fall K, Cerf V, Durst B, and Scott K. Delay-Tolerant networking: an approach to interplanetary Internet[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(6): 128-136.
 - [2] Krishnan R, Basu P, Mikkelsen J M, Small C, and Ramanathan R. The SPINDLE disruption-tolerant networking system[C]. *IEEE Military Communications Conference*, Orlando, FL, USA, 2007: 1-7.
 - [3] Sadler P Z C, Liu T, Fishchhoff I, Martonosi M, Lyon S, and Rubenstein D I. Habitat Monitoring with ZebraNet: Design and Experiences [M]. *Wireless Sensor Networks: A Systems Perspective*, Artech House, 2005.
 - [4] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]. *Proc. of the 2003 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. Karlsruhe: ACM, 2003: 27-34.
 - [5] Zhang H, Shen H, and Tan Y. Optimal energy balanced data gathering in wireless sensor networks[C]. *Parallel and Distributed Processing Symposium*. Long Beach, 2007: 1-10.
 - [6] Juang P, Oki H, Wang Y, Martonosi M, Peh L S, and Rubenstein A D. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebraNet[J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2002, 36(5): 96-107.
 - [7] Wang Y and Wu H. Replication-based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN) [C]. *Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Washington: IEEE Computer Society, 2006: 485-489.
 - [8] 朱金奇, 刘明, 龚海刚等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输[J]. *软件学报*, 2009, 20(8): 2227-2240. Zhu Jin-qi, Liu Ming, and Gong Hai-gang, *et al.* Selective replication-based data delivery for delay tolerant mobile sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(8): 2227-2240.
 - [9] 许富龙, 刘明, 龚海刚等. 延迟容忍传感器网络基于相对距离的数据传输[J]. *软件学报*, 2010, 21(3): 490-504. Xu Fu-long, Liu Ming, and Gong Hai-gang, *et al.* Relative distance-aware data delivery scheme for delay tolerant mobile sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(3): 490-504.
 - [10] Muhammad Abdulla and Robert Simon. Simulation study of common mobility models for opportunistic networks[C]. *Simulation Symposium, ANSS2008, 41st Annual*, Ottawa, 2008: 43-50.
 - [11] 张可, 曾家智, 刘伟. 延迟容忍移动传感器网络中基于概率复制的数据传输策略及其性能研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(3): 677-681. Zhang Ke, Zeng Jia-zhi, and Liu Wei. Data delivery scheme of DTMSN based on probability replication and its performance research[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 677-681.
 - [12] Krifa A, Barakat C, and Spyropoulos T. Optimal buffer management policies for delay tolerant networks[C]. *Proc. of IEEE SECON*, San Francisco, 2008: 260-268.
 - [13] Li Yong, Qian Mengjiong, and Jin Depeng, *et al.* Adaptive optimal buffer management policies for realistic DTN[C]. *Proc. of IEEE GLOBECOM*, Honolulu, Hawaii, 2009: 1-5.
 - [14] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- 吴亚辉: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为延迟容忍网络、无线传感器网络。
 邓 苏: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为物联网、传感器网络。
 黄宏斌: 男, 1975年生, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、延迟容忍网络、信息管理。