

# 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

张可<sup>①②</sup> 曾家智<sup>②</sup> 刘伟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054)

<sup>②</sup>(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**摘要:** 该文提出了一种基于概率复制的数据传输策略 PRD(Probability Replication Delivery scheme)用于空间中间断连通的延迟容忍移动传感器网络(DTMSN)数据传输。PRD 由选择复制策略和队列管理组成,前者根据节点将消息传递给汇聚点的可能性,选择下一跳进行复制传输;队列管理则利用引入传输概率及复制数的消息生存时间决定队列中消息丢弃原则。仿真分析表明,与现有的几种数据传输策略相比,PRD 能以较低的数据复制数及传输延迟获得较高的数据传输成功率。

**关键词:** 延迟容忍移动传感器网络; 数据采集; 概率复制; 数据传输; 队列管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0677-05

DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00262

## Data Delivery Scheme of DTMSN Based on Probability Replication and Its Performance Research

Zhang Ke<sup>①②</sup> Zeng Jia-zhi<sup>②</sup> Liu Wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Research Institute of Electronic Science and Technology,

University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

<sup>②</sup>(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A new data delivery scheme-PRD (Probability Replication Delivery scheme) is proposed for pervasive data gathering in DTMSN (Delay Tolerant Mobile Sensor Networks) that networks with intermittent connectivity in space. PRD consists of two key components for data transmission and queue management, respectively. The former makes decisions on when and where to transmit data messages according to the node delivery probability. The latter employs the message survival time based on probability and delivery copies to decide dropping for minimizing transmission overhead. Simulation results show that the proposed PRD data delivery scheme achieves the higher message delivery ratio with the lower transmission overhead and data delivery delay than other DTMSN data delivering approaches.

**Key words:** DTMSN; Data gathering; Probability replication; Data delivery; Queue management

### 1 引言

无线传感器网络<sup>[1,2]</sup>可以在空间中部署并执行一定感知任务<sup>[3]</sup>,如无人机电传感器网络、大气数据传输传感器网络、移动水下设备网络、部署在建筑物各层的传感器网络以及放置在树木上监视森林环境的传感器网络等。即使部署在地面的传感器网络,由于地形起伏,网络往往也并非理论假设的那样是完全平坦的。

然而如大气监测传感器网络、海洋监测传感器网络、飞鸟生活习性监控传感器网络以及战场复杂环境下小型无人机电传感器网络等,都具有移动性、

数据延迟以及信息采集透明性等特点,即对延迟容忍特性有较高的要求。

延迟容忍的移动无线传感器网络DTMSN (Delay Tolerant Mobile Sensor Networks)由两种节点组成:随机移动的传感器节点和数据汇聚点<sup>[4-6]</sup>。前者在运动物体上用来收集数据信息并形成了一个间断连接的移动无线传感器网络,后者是放置在特定位置的高端节点作为汇聚点用来收集传感器中的数据。

DTMSN中移动传感器间的连通性差,形成一个相互连通的网路困难,传统的传感器网络数据传输策略在DTMSN下并不适用,为了达到一定的数据传输成功率,进行数据的复制是必要的,而复制必将增大传输开销,如何有效地把传感器节点收集到的数据传递给汇聚点,以达到数据交付成功率、传输

2009-03-04 收到, 2009-10-16 改回

国家自然科学基金(60703114, 60673142)和电子科技大学青年科技基金(JX0862)资助课题

通信作者: 张可 kezhang@uestc.edu.cn

复制以及传输延迟之间的平衡就成了DTMSN要解决的首要问题<sup>[7]</sup>。目前可以应用于DTMSN中常见的算法包括泛洪(Flooding), 直接传递(Direct Transmission)<sup>[8,9]</sup>, FAD(Fault Tolerance Delivery)<sup>[10]</sup>, MPAD(Mobility Prediction-based Adaptive Data Gathering Protocol)<sup>[11]</sup>等。

本文在MPAD的基础上提出了一种数据传输策略PRD(Probability Replication Delivery scheme), 其基本思想是对多个影响数据复制的因素进行综合分析计算, 把消息动态地复制给空间中更有可能与汇聚点通信的传感器节点, 同时采用传输队列管理消息。根据节点运动趋势、邻居节点数、访问记录等因素计算出不同时刻各传感器节点的传输概率, 本文将该概率定义为传感器节点把消息传递给汇聚点的可能性。而后选择下一跳节点并进行数据复制传输。队列管理则利用消息的生存时间ST(survival time)<sup>[11]</sup>值决定队列中消息的重要程度和丢弃原则。仿真实验表明, 与其他DTMSN算法相比, PRD能以较低的数据传输复制数和传输延迟获得较高的数据传输成功率。

## 2 网络模型与传输策略

### 2.1 网络模型

本文假设初始状态时,  $N$ 个传感器节点随机分布在一个  $M \times M \times M$  的正方形空间区域内, 网络中唯一的汇聚点也部署在区域内且固定。所有节点的通信半径均为  $R$ 。此外, 假设该传感器网络具有如下性质:

(1) 传感器节点运动规律符合空间中 random waypoint<sup>[11]</sup>运动模型, 节点的运动过程示例如图1所示。

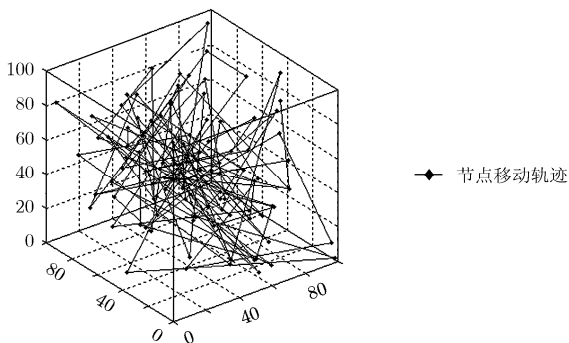


图1 移动节点运动模型运动示例

(2) 对于所有移动节点来说, 汇聚点的位置已知。各个移动节点均明确本节点此次运动的目的地  $D$  以及任意时刻自己的坐标位置。

(3) 所有传感器节点保持时间同步。

### 2.2 传输策略

传输概率表示移动节点和汇聚点通信的可能性, 数据复制传输根据传输概率大小执行。令  $P_i$  表示传感器节点  $i$  的传输概率, 可见由于节点  $i$  的随机运动,  $P_i$  的值是变化的, 它取决于节点的运动趋势、邻居数、访问历史等因素。

首先, 我们来定义节点的运动趋势概率  $P_M$ , 如图2所示, 节点  $i$  判断此刻自己本次运动的起点  $S$  以及终点  $D$  的位置, 若发现  $S$  或者  $D$  位于汇聚点的通信范围内, 表明此时节点  $i$  可以直接与汇聚点发生通信, 因此置  $P_M = 1$ 。判断  $S$  或  $D$  是否位于汇聚点通信范围内, 计算  $S$  或  $D$  点与汇聚点  $O$  之间空间直线距离  $k$ 。设汇聚点 Sink 所在位置为原点  $O$ , 那么  $O$  的通信范围是面积为  $x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2$  的球。设  $I$  的起始坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 当前目的点  $D$  的坐标为  $(x_2, y_2, z_2)$ , 有

$$k = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \text{ 或者 } k = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} \quad (1)$$

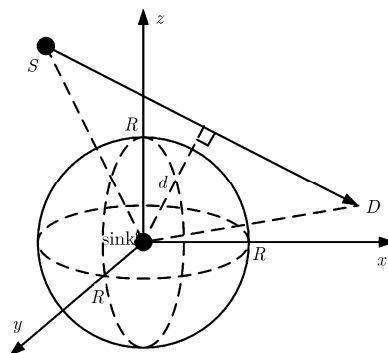


图2 节点传输概率说明示意图

若  $k \leq R$ , 则可以判断  $S$  或者  $D$  位于汇聚点的通信范围内。

否则查看节点  $i$  的本次运动起始位置  $S$  和这次运动的目的地  $D$  的连线是否与汇聚点的通信范围相交(线段穿越球), 若相交, 则置  $P_M = 1$ 。因为若节点  $i$  的本次运动的起始位置和本次运动的目的地  $D$  的连线与球相交, 表明节点  $i$  正朝着汇聚点运动且马上就能和汇聚点发生直接通信。

显然, 当球心到线段所在直线的距离小于圆的半径, 线段与圆相交。

则线段  $SD$  所在的空间直线方向向量为

$$\mathbf{s} = SD = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (2)$$

该空间直线方程  $l$  为

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (3)$$

在空间直线方程式(2)取  $z=0$  时, 得到空间直线方程  $l$  上的点  $A$ 。再根据点到空间直线的距离公式, 计算  $d$

$$d = \frac{\|s \times AO\|}{\|s\|} \quad (4)$$

若  $d \leq R$ , 则可以判断节点本次运动起始位置  $S$  和目的点  $D$  的连线与汇聚点的通信范围相交。

若上述两个条件均不满足, 那么根据本文的运动模型, 节点  $i$  一直朝着本次运动的目的点  $D$  运动直到停止, 可见本次运动的线段  $SD$  标志着当前传感器节点  $i$  的运动方向, 同时  $SD$  离汇聚点越近, 节点  $i$  与汇聚点的最终运动趋势传输概率越高。因此可以利用此次运动的线段  $SD$  来计算当前时刻节点  $i$  的运动趋势概率  $P_M$ 。

$$P_M = \begin{cases} 1, & R/d \geq 1 \\ R/d, & R/d < 1 \end{cases} \quad (5)$$

当  $R/d \geq 1$  时, 说明路线与球相交或相切, 运动趋势概率为1。当  $R/d < 1$  时, 说明路线同球的接近程度, 偏向1则更接近球, 反之偏离球。

可见, 已知传输半径  $R$  及当前运动路线与汇聚点的距离  $d$ , 可以计算出节点当前的运动趋势概率  $P_M$ , 并且路线离汇聚点越近, 运动趋势概率  $P_M$  的值也越大。这避免了不考虑运动情况的模型, 也避免了文献[11]只考虑移动终点的偏颇。

运动趋势概率  $P_M$  仅仅反映了节点间相对运动对传输复制的影响, 但是并未充分考虑影响传输概率的多个因素, 邻居数  $n$ 、访问历史都是传输概率必须考虑的重要因素。

设置一个最大历史访问时间  $MVT$ , 同时设置节点访问记录变量  $VT_i$ , 其初始值为  $MVT$ , 一旦某移动节点访问了 Sink 节点, 将  $VT_i$  值设置为0, 然后随着时间的推移增加  $VT_i$  值, 一旦增加到  $MVT$ , 便不再变化。

由于  $P_i$  因为已经不是传统意义上的概率值, 仅仅用于反映一种可能性大小, 故该值可以大于1。综合分析对其产生影响的多个因素, 传输概率公式可以采用如下式的表示方式。

$$P_i = \alpha P_M + \beta(1 + (MVT - VT_i)/MVT) + \gamma(n/N) \quad (6)$$

其中  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别为运动趋势概率、访问历史以及邻居数系数, 在本文中默认设置分别为3, 0.1, 5, 其反映了对传输概率影响的权重。此外最大历史访问时间  $MVT$  默认设置为180 s。

PRD中节点均有一个与MPAD相同的队列保存准备要发送的数据消息, 这些消息有3个来源<sup>[11]</sup>: (1) 节点从自身的传感单元获取收集的数据; (2) 节点收到其他的节点发送来的消息; (3) 节点把消息发送到其他节点(非汇聚点)后, 保存发送出去的消息中属于自身产生的那部分消息的复本。

当消息到达存储队列已满的节点时, 比较新消息ST值与队尾消息ST值, 若新消息ST值大则被丢掉, 反之丢弃队尾消息并把新消息根据ST值插入到队列中适当位置; 队列在更新ST值中, 发现某个消息ST值过大, 则丢弃此消息。传输概率高的节点的消息、复制数量多的消息, 其生存时间应该快速增加, 以减少其本已经到达Sink节点, 依然继续在网络中复制传输, 占用网络资源, 影响网络性能的情况。

设定消息  $M$  中的ST值为  $T_0$ , 经过传输策略选定将要传输的多个节点, 采用统一的ST值更新方式, 随着消息复制到多个相邻节点, 其ST值增加, 增值与接收各个节点的传输运动趋势概率  $P_M$ 、节点访问记录变量  $VT_i$  以及该消息复制副本数  $m$  相关。综合分析, 设定其ST值更新公式如式(7)所示, 其中  $\eta$  为系数1, Step 为时间步长值。

$$T_0' = T_0 + \eta \cdot \text{Step} \cdot (P_M + (MVT - VT_i)/MVT)^m \quad (7)$$

### 3 仿真分析

在仿真分析实验中, 定义所有传感器节点的运动速度均相同且在运动过程中保持恒定。针对如无人机自组织网络<sup>[12]</sup>等, GPS设备其通信传输耗电与飞行能耗相比很小, 暂不考虑能量问题。其他网络参数以及相应的缺省值见表1。

表1 算法仿真环境设置

参数	默认值
网络空间大小(m <sup>3</sup> )	200×200×200
传感器节点数量	100
传输半径(m)	10
传感器节点速度(m/s)	10
传感器节点队列最大长度	200
最大历史访问时间(s)	180
时间步长 Step(s)	1
Sink 节点空间坐标	(100,100,100)
FAD Fault tolerance 门限值	0.8
FAD 的 $\alpha$ 值	0.4

#### 3.1 4种算法性能对比

将数据传输算法Flooding, DT, FAD及PRD分别应用于该仿真环境, 就数据交付率、平均副本数以及平均延迟3个性能指标进行多次仿真实验分析。仿真初始环境可由图3所示。表2为默认参数状态时候4种算法的性能仿真对比结果。

可以看出, 本文的PRD的数据交付率最高, 因而能够提供更为精确的感知数据。同时, PRD减少

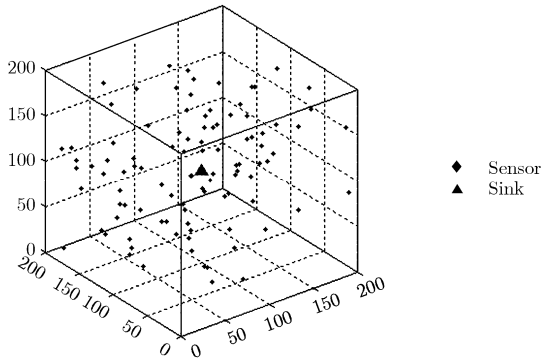


图3 仿真初始环境

表2 4种算法在默认仿真环境下性能对比

	PRD	FAD	DT	Flooding
数据交付率(%)	78.6	71.1	55.1	65.1
平均副本数	6.62	14.50	1	9.18
平均延迟(s)	208.532	526.547	885.874	727.170

了平均副本数以及平均延迟时间，较其他算法有所提高。直接传递算法的传输能耗最低、传输延迟最长，泛洪算法的队列管理策略使它的传输能耗较大、传输延迟稍低于直接传递算法。PRD的传输延迟低于FAD算法，这是因为PRD的下一跳节点的选择比FAD算法准确，因此消息传递只需经过较少跳数就能被传输到接收节点。同时，有效的消息队列管理机制还使PRD的传输复制数低于FAD和泛洪算法。

### 3.2 节点密度对算法性能的影响

由于网络的拓扑结构与节点的密度相关，本组实验主要研究不同节点密度情况下不同算法的性能。节点密度的变化通过改变节点的总数量 $N$ 来实现，实验结果如图4(a)-4(c)所示。

从图4(a)可以看出，采用PRD可以提高数据传输成功率，特别是节点密度较大的时候。当节点数量达到一定时，4种算法的传输成功率大体不变，PRD始终保持相对高的数据传输成功率，可见PRD在节点密度极少的情況以外，都可以有效提高数据传输效率。图4(b)显示随着节点密度的增大，PRD、

FAD以及泛洪算法的平均消息副本数均有所上升，这是因为密度增大导致每个节点邻居数量增多，从而引起满足传输条件的邻居数量的增多，进而引发了消息副本数的上升，可以看到PRD一直保持较低的消息副本数，优势明显。图4(c)讨论了节点的密度与平均传输延迟的关系，PRD算法一直保持相比其他三种算法较低的数据延迟，因其选择传输复制节点主要依据了到达汇聚节点的传输概率，使得消息更快到达汇聚节点。

### 3.3 传输半径对算法性能的影响

网络的连通程度与传感器通信半径紧密相关，本组实验主要研究不同通信半径情况下不同算法的性能。改变网络中各个节点的通信半径，实验结果如图5所示。

从图5(a)可以看出，随着通信半径的增加，4种算法的数据传输成功率都在增加。当通信半径较小时，传输效率都比较低，当通信半径增大时，4种算法的数据传输成功率都快速增长，PRD算法增长的速度最快。通信半径对数据传输成功率的影响很大，PRD最先到达较优且稳定的数据传输率区域，因此相比于其他4种算法来说效果最好。图5(b)反映了通信半径对副本数的影响。随着通信半径的增加，除DT算法以外，PRD，FAD，泛洪的复本数都在增加。通信半径的增加，最直接的影响就是扩大了通信范围，从而使得可传递信息的节点增多，导致复本数的增加。PRD算法由于其选择复制节点的机制不同，所以复本数增加速度并没有其他两种算法的快，具有一定优势。由图5(c)可以看出，在通信半径增加的情况下，4种算法都出现了平均传输延迟下降的趋势。PRD由于其初始平均传输延时较小，因此其相对于其他两种算法，平均延时相对较小。此外，由图可见在通信半径较大时，FAD在平均延时指标上要优于PRD算法。

## 4 结束语

DTMSN具有的特性使得传统传感器网络数据传输策略并不适用。因此本文提出了一种基于概率

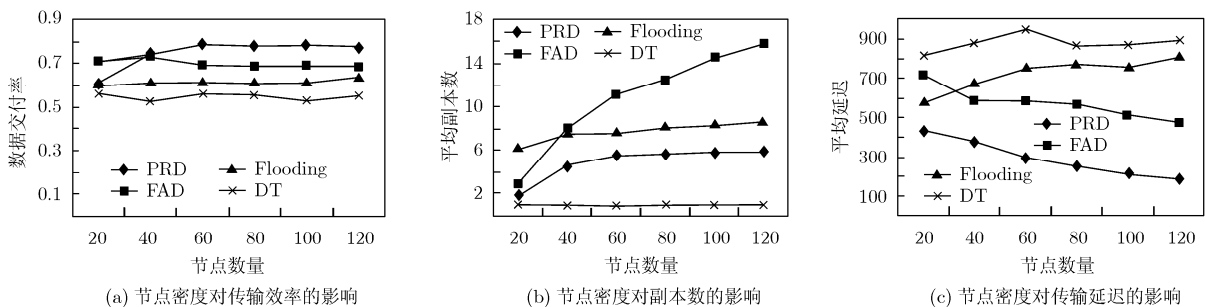


图4 节点密度对算法性能的影响

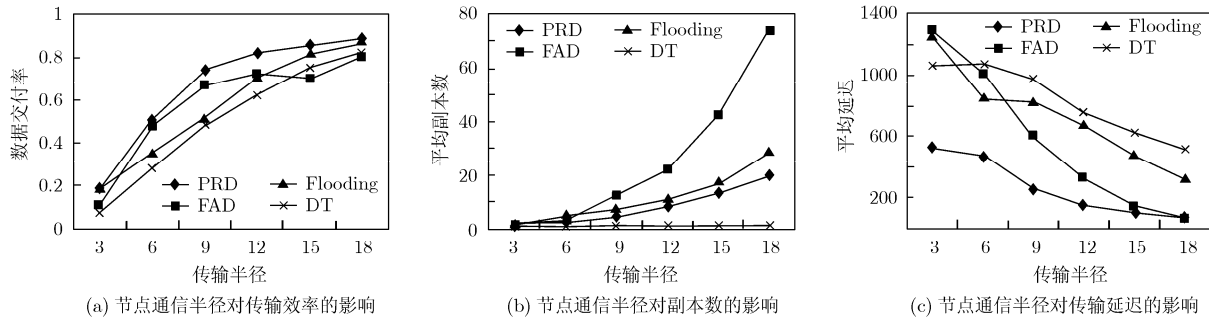


图5 节点通信半径对算法性能的影响

复制的数据传输策略PRD。与已有工作相比, PRD的主要贡献在于以下几个方面: (1)提出了一种有效的动态选路策略, 通过节点运动趋势、邻居节点数、访问记录定义的节点传输概率, 选择更为有效的下一跳传输传感器节点。(2)引入基于传输概率与复制数的生存时间队列管理机制, 对网络中的消息进行高效管理。

大量的模拟实验验证了PRD的优异性能, 与现有的几种数据传输算法相比, 特别是与FAD算法策略相比, PRD能以较低的数据复制数及传输延迟获得较高的数据传输成功率。

### 参考文献

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 4-57.  
Sun Li-ming, Li Jian-zhong, Chen Yu, and Zhu Hong-song. Wireless Sensor Network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 4-57.
  - [2] 罗武胜, 翟永平, 鲁琴. 无线多媒体传感器网络研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1511-1516.  
Luo Wu-sheng, Zhai Yong-ping, and Lu Qin. Study on wireless multimedia sensor networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1511-1516.
  - [3] Verdone R. A statistical analysis of wireless connectivity in three dimensions. IEEE International Conference on Communications(ICC2005)[C]. Seoul, 2005: 3207-3210.
  - [4] Wang Y, Lin F, and Wu H. Poster: efficient data transmission in delay fault tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN), Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'05) [C]. Boston, 2005: 1-2.
  - [5] Lin Yun-feng, Li Bao-chun, and Liang Ben. Efficient network coded data transmissions in disruption tolerant networks. Proceedings of IEEE INFOCOM 2008 [C]. Phoenix, 2008: 2080-2188.
  - [6] Luo Pei-en, Huang Hong-yu, Shu Wei, Li Ming-lu, and Wu Min-you. Performance evaluation of vehicular DTN Routing under realistic mobility models. Wireless Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, 2008: 2206-2211.
  - [7] Shah R C, Roy S, Jain S, and Brunette W. Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. Proc. of the First International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications[C]. Anchorage, 2003: 30-41.
  - [8] Wang Y and Wu H. Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): A new paradigm for pervasive information gathering[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 6(8): 1021-1034.
  - [9] Zhang H, Shen H, and Tan Y. Optimal energy balanced data gathering in wireless sensor networks. Parallel and Distributed Processing Symposium[C]. Long Beach, 2007: 1-10.
  - [10] Wang Y, Wu H Y, and Dang H. Analytic study of delay/fault-tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN's) [R]. Tech Report, Lafayette: CACS, University of Louisiana at Lafayette, 2006.
  - [11] Zhu J Q, Cao J N, Liu M, Zheng Y, Gong H G, and Chen G H. Mobility prediction-based adaptive data gathering protocol. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. New Orleans, 2008: 1-5.
  - [12] Zhang Ke, Zhang Wei, and Zeng Jia-zhi. Preliminary study of routing and date integrity in mobile Ad hoc UAV network. IEEE International Conference on Apperceiving Computing and Intelligent Analysis[C]. Chengdu, 2008, 12: 347-350.
- 张可: 男, 1979年生, 助理研究员, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、移动自组织网络等。  
曾家智: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机网络、新型网络体系结构等。  
刘伟: 男, 1985年生, 硕士生, 研究方向为传感器网络、移动自组织网络等。