# 机会传感网络连通性参数研究

舒坚郭凯刘群刘琳岚

(南昌航空大学物联网技术研究所 南昌 330063)

**摘 要**由于物理条件的限制、成本考虑和节点失效等原因导致节点稀疏分布,在实现较大范围感知时,机会传感 网络往往会形成多个不连通的区域,区域间节点的通信需要通过移动节点的运动来实现,这对其连通性的研究提 出了挑战.研究机会传感网络连通性参数是构建连通性模型的基础.针对机会传感网络消息传输的特点,将整个网 络划分为3个层次;定义子网消息投递成功率和子网消息平均投递时延为机会传感网络的连通性指标,并通过仿 真实验验证了连通性指标的合理性和适应性;分析了连通性参数与连通性指标的关系,采用因子分析法对连通性 参数间的相关性进行分析,提取出4个连通性参数;利用基于粒子群优化的小波神经网络对提取的连通性参数构 建连通性模型,用于所提取连通性参数的验证,仿真实验和试验床实验均表明所提取的连通性参数是合理性的.

关键词 机会传感网络;连通性参数;连通性指标;小波神经网络;因子分析法;物联网 中图法分类号 TP393 **DOI**号 10.11897/SP.J.1016.2016.01067

### **Research of Connectivity Parameters in Opportunistic Sensor Networks**

SHU Jian GUO Kai LIU Qun LIU Lin-Lan

(Internet of Things Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

**Abstract** There are many factors that make networks have sparse distribution, such as physical constraints, cost considerations and node failure. Opportunistic sensor networks (OSNs) may be split into some isolated regions when they sense the large-scale area. The network connectivity is achieved by mobile nodes. It is a challenge how to study the OSNs connectivity in this scenario. The study of OSNs connectivity parameters is the foundation of constructing connectivity model. According to the features of OSNs, the OSNs 3-layered model was designed. The sub-network message delivery success rate and sub-network message average delivery delay were defined as OSNs connectivity metrics. The rationality and applicability of these metrics were verified by simulation. The relationship between connectivity parameters and connectivity parameters so that 4 connectivity parameters were extracted. The wavelet neural network based on particle swarm optimization algorithm was employed to build an OSNs connectivity model via extracted parameters so as to verify these parameters. The results of simulation and test bed show that the extracted connectivity parameters are reasonable.

**Keywords** opportunistic sensor networks; connectivity parameters; connectivity metrics; wavelet neural network; factor analysis; Internet of Things

收稿日期:2015-04-10;在线出版日期:2015-12-17.本课题得到国家自然科学基金项目(61363015,61262020)、江西省高等学校科技落地 计划项目(KJLD1405)资助. **舒** 坚,男,1964 年生,教授,硕士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为机会传感网络、 软件工程. E-mail: shujian@nchu.edu.cn. **郭** 凯,男,1990 年生,硕士研究生,主要研究方向为机会传感网络. **刘** 群,男,1988 年生,硕 士研究生,主要研究方向为机会传感网络. **刘琳岚**(通信作者),女,1968 年生,教授,硕士生导师,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究 领域为无线传感网络、嵌入式系统. E-mail: liulinlan@nchu.edu.cn.

# 1 引 言

机会传感网络(Opportunistic Sensor Networks, OSNs)具有移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Networks,MANETs)和延迟容忍网络(Delay Tolerant Networks,DTNs)的特点<sup>[1]</sup>,是一种利用节点移动 带来的相遇机会实现数据传输的自组织网络<sup>[2]</sup>,节 点间通过存储-携带-转发的路由模式实现通信<sup>[3]</sup>, 消息在转发过程中延迟明显,传输过程中错误率较 高<sup>[4]</sup>.在环境监测、战场监测、救灾系统和社会网 络<sup>[5-7]</sup>等实际应用场景中,由于物理上的约束、成本 的考虑、节点损坏等原因,无线传感网络可能被分割 成多个不连通的区域,移动节点机会性地收集这些 区域的消息实现网络的连通<sup>[8]</sup>,机会性的连通能够 支持大规模部署和应用的多样性<sup>[9-13]</sup>.

OSNs的连通性可以通过消息平均/最坏投 递时延、消息投递成功率等<sup>[14]</sup>网络指标反映.由于 分区域 OSNs 的间歇连通、频繁割裂特性,使得 MANETs 网络中的节点度和网络度不再适用于 OSNs 连通性的描述;移动节点的缺失和底层区域 节点的失效都可能导致网络的连通性下降,甚至 出现网络瘫痪的情况.本文针对 OSNs 的特点,主 要研究影响 OSNs 连通性的参数,为 OSNs 连通性 模型的研究提供基础,从而为 OSNs 的拓扑控制提 供支撑.

本文第2节对相关的研究工作的现状进行了分 析;第3节定义连通性指标并验证其合理性;第4节 分析连通性参数间的相关性并提取出连通性参数; 第5节建立用于验证所提取参数合理性的连通性模 型;第6节通过仿真实验和实验床实验验证所提取 连通性参数的合理性;第7节总结全文.

## 2 相关研究

与本文相关的研究工作主要包括网络结构、连 通性指标及连通性3个方面.

文献[15]针对 DTNs 随移动设备增加导致网络出现分割和间歇连通的现象,利用移动消息 Bundles 实现分割区域与互联网间的通信,仿真实验 表明网络的连通性得到了改善. 文献[16-18]将无线 传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)分为 3 层,通过中间层"数据驴"(Data Mobile Ubiquitous LAN Extensions, Data MULEs)收集底层感知数据, 并投递至接入点(Access Points, AP),移动节点连接 感知节点和 sink 节点,在两者之间起到枢纽的作用. 水下传感网络<sup>[19]</sup>(Under Water Sensor Networks, UWSNs)是由具有声学通信与计算能力的传感器 节点构成的水下监测网络系统,文献[20]提出 UWSNs 架构由水面基站、水下静止节点和移动节 点组成,水下节点间通过超声波通信,水下移动节点 负责收集水下数据并与水面基站通信,实现网络的 连通,仿真实验表明该架构运用至水下监测是可行 的. 文献[21]设计了水下信息收集系统, WSNs 收集 水下珊瑚礁的图像信息,静止节点对珊瑚礁进行固 定监测,利用移动节点实现对珊瑚礁的盲点监测,通 过过往船只完成监测数据的收集. 文献[22]设计了 环境光强监测系统(Light Under Shrub Thicket for Environmental Research, LUSTER), 对无线传感网 络分层,感知层节点实现对环境光强的感知,分布式 存储层的移动节点完成感知数据的收集,最终通过 延迟容忍网络层实现感知数据的汇聚. 文献 [23]提 出野生动物监测网络 EcoNet(Ecological Network), 它是一种典型的 OSNs,利用不同物种间的移动性, 实现数据交换与收集. 文献[24]设计了 DTNs 网络 YushanNet(Yushan Network)实现对徒步登山者的 位置追踪,能够快速搜救登山失踪的游客. 文献[8]利 用"移动驴"(如徒步者、出租车、公交车等移动节点) 机会性地收集各区域的数据并交付给基站.综上所 述,OSNs包括移动节点、感知节点和 sink 节点,利 用移动节点的移动特性收集感知数据,使得原本不 连通的网络实现间歇连通,以改善网络的连通性,本 文将 OSNs 分为 3 层.

OSNs的连通性可以通过一些网络指标来描述,如消息投递成功率、消息投递时延、消息平均投递时延等<sup>[14]</sup>.文献[15]采用消息投递成功率和消息 平均投递时延评价 DTNs 网络中 3 种不同区域调度 策略(周期性、基于存储、按需求)对网络连通性能的 影响.文献[18]对分层结构的 DTNs 网络建立 Markov链,计算网络的消息投递成功率、网络消息 投递时延以及消息平均投递时延的期望,通过这 些指标反映网络的性能.文献[25]采用消息投递成 功率、网络消息投递时延和网络负载等指标预测 DTNs中移动节点的连接情况.本文采用消息投递 成功率和消息平均投递时延反映 OSNs的连通性.

文献[26]研究如何选取节点通信半径和节点密 度等连通性参数的临界值来保证网络始终为 K 连 通.文献[27]采用节点数量、节点速度、节点通信半 径等连通性参数定义的网络可达率满足 Logistic 模型,可用来描述稀疏 WSNs 的连通性. 文献[28]通过主动控制移动节点的移动实现 DTNs 的连通,仿 真实验表明增加移动节点的数量能够改善网络的性能、减少网络消息投递时延. 文献[29]对移动 WSNs 分簇,将节点通信半径、链路质量、节点能量 3 个连 通性参数的线性组合与网络可达率结合,综合描述 网络的连通性.本文通过分析 OSNs 连通性参数之间 的相关性,提取出连通性参数,并利用基于粒子群优 化(Particle Swarm Optimization, PSO)的小波神经 网络(Wavelet Neural Network, WNN) 建立 OSNs 的连通性模型,以验证所提取连通性参数的合理性.

# 3 连通性指标

本节将 OSNs 分为 3 层,定义分层模型下的连 通性指标,采用芬兰赫尔辛基科技大学开发的 ONE (Opportunistic Networking Environment)进行仿 真实验,验证连通性指标的合理性,参数设置如第 6.1.1节所示.

#### 3.1 网络模型

本文研究场景如图1(a)所示,感知节点发送消



图 1 OSNs 的场景与分层模型

息至移动节点,移动节点通过一次或多次转发将消息发送至 sink 节点.根据 OSNs 中消息传输的这一特点,本文将整个 OSNs 划分为 3 个层次,如图 1 (b)所示.sink 节点相对静止,处于顶层,移动节点 Fa,Fb,Fc 处于中间层,感知节点处于第 3 层.感知 消息通过中间层的移动节点转发至 sink 节点.

### 3.2 连通性指标的定义

本文定义了区域消息投递成功率、移动节点消息投递成功率、区域消息平均投递时延、移动节点消息平均投递时延,在此基础上定义子网消息投递成功率和子网消息平均投递时延,以反映 OSNs 的连通性.

**定义1.** 区域消息投递成功率是指时间*T*内, 区域*S<sub>j</sub>*(*j*=1,2,…,*n*,*n*为最大区域个数)内感知 节点消息投递至移动节点的数量与区域内产生消息 总数的比值,如式(1)所示.

$$\alpha_j = \frac{\int_0^{\mathrm{T}} R_{ij} \,\mathrm{d}i}{\int_0^{\mathrm{T}} I_{ij} \,\mathrm{d}i} \tag{1}$$

其中, $R_{ij}$ 为区域j(j=1,2,...,n)内时刻i上消息投 递至移动节点的数量, $I_{ij}$ 为区域 $S_j(j=1,2,...,n)$ 内所有节点在时刻i产生的消息总数.随着 $R_{ij}$ 的增 大,区域消息投递成功率 $\alpha_j$ 增大,表明有更多的区域 内消息被投递至移动节点.

**定义 2.** 移动节点消息投递成功率是指时间 *T*内,区域 *j*(*j*=1,2,...,*n*)内消息投递至移动节点 后,由移动节点转发至 sink 节点的数量与移动节点 从该区域接收到的消息总数的比值,如式(2)所示.

$$\beta_j = \frac{\int_0^T J_{ij} \,\mathrm{d}i}{\int_0^T Q_{ij} \,\mathrm{d}i} \tag{2}$$

其中, $J_{ij}$ 为区域j(j=1,2,...,n)内时刻i消息投递 至 sink 节点的数量, $Q_{ij}$ 为移动节点在时刻i从区域 j(j=1,2,...,n)接收到的消息总数.随着 $J_{ij}$ 的增 大,移动节点消息投递成功率 $\beta_i$ 增大,表明有更多的 移动节点消息投递至 sink 节点.

定义 3. 子网消息投递成功率是指区域 j(j = 1,2,...,n)内消息最终投递至 sink 节点的数量与区域 j 产生消息总数的比值.如图 1(b)所示,模型中 每个区域为一个子网,子网消息投递成功率为  $\alpha_j$ 与  $\beta_j$ 的乘积,如式(3)所示.

$$\theta_j = \alpha_j \beta_j \tag{3}$$

随着子网消息投递成功率 $\theta_i$ 增大,表明有更多的区域内消息被投递至 sink 节点.

定义 4. 区域消息平均投递时延是指时间 T 内,区域 j(j=1,2,...,n)内  $S_j$ 条消息投递至移动节 点的时延平均值,如式(4)所示.

$$\mu_j = \frac{\sum\limits_{m=1}^{S_j} \tau_j(m)}{S_j} \tag{4}$$

其中, $\tau_j(m)$ 表示区域  $j(j=1,2,\dots,n)$ 内第 m 条消 息投递至移动节点的时延.

**定义 5.** 移动节点消息平均投递时延是指时间 *T*内,区域 *j*(*j*=1,2,...,*n*)内消息投递至移动节点后,由移动节点投递至 sink 节点的 *S'*条消息的投递时延平均值,如式(5)所示.

$$\varphi_j = \frac{\sum\limits_{m=1}^{S_j} \tau'_j(m)}{S'_j} \tag{5}$$

其中, $\tau'_{j}(m)$ 为区域  $j(j=1,2,\dots,n)$ 内消息投递至移动节点后,由移动节点转发至 sink 节点的第 *m* 条 消息的时延.

**定义 6.** 子网消息平均投递时延是指时间 *T* 内,区域 j(j=1,2,...,n)内消息最终投递至 sink 节 点的平均投递时延.子网消息平均投递时延  $\Phi_j$ 为  $\mu_j$  与  $\varphi_j$ 的和,如式(6)所示.

$$\Phi_j = \mu_j + \varphi_j \tag{6}$$

#### 3.3 连通性指标的合理性验证

实验历时 2 个多月,在 ONE 中设置每 20 min 统 计一次每个区域的 6 个连通性指标,共统计 20 000 次,为方便图示,每 1000 次取平均值,得到 20 组消 息投递成功率、消息平均投递时延,以验证连通性指 标的合理性.

3.3.1 消息投递成功率

区域 *Ra*、*Rb*、*Rc*、*Rd*、*Re*的区域消息投递成功率、移动节点消息投递成功率、子网消息投递成功率 分别如图 2 的(a)、(b)、(c)所示.

图 2(a)中,5 个区域的区域消息投递成功率均 较高.与区域 Ra、Rb、Rc 相遇的移动节点数相同,均 为1,因此 Ra、Rb、Rc 的区域消息投递成功率接近; 与区域 Rd、Re 相遇的移动节点数相同,均为2,因 此 Rd、Re 的区域消息投递成功率接近,且均高于 Ra、Rb、Rc 的区域消息投递成功率.

图 2(b)中,与区域 Re 相遇的移动节点数为 2, 其中 Fa 与 sink 节点相遇,所以 Re 的移动节点消息 投递成功率最高;区域 Ra 只与 Fa 相遇,所以其移 动节点消息投递成功率次之;区域 Rc 离 sink 节点 最远,其消息需经过多次移动节点的转发才可能



图 2 各区域的消息投递成功率

到达 sink 节点,有些消息因为 TTL(Time to Live)到 期而被丢弃,因此 Rc 的移动节点消息投递成功率 最低.

由图 2(a)、图 2(b)的分析可知,消息越容易投 递至 sink 节点的区域,其子网投递成功率越高,如 区域 *Re*;需经过多次移动节点转发才能将消息投递 至 sink 节点的区域,其子网投递成功率较低,如区 域 *Rc*. 这与图 2(c)所示结果一致.

可见,区域消息投递成功率、移动节点消息投递 成功率、子网消息投递成功率均能反映 OSNs 的连 通情况.

3.3.2 消息平均投递时延

区域 Ra、Rb、Rc、Rd、Re 的区域消息平均投递

时延、移动节点消息平均投递时延、子网消息平均投 递时延分别如图 3 的(a)、(b)、(c)所示.

图 3(a)中,区域 Rd、Re 与 2 个移动节点相遇, 其区域消息平均投递时延最低;Ra、Rb、Rc 与 1 个 移动节点相遇,其区域消息平均投递时延较高.

图 3(b)中,区域 Re 与 2 个移动节点相遇,其中 一个移动节点为 Fa,Fa 与 sink 节点相遇,因此,其 移动节点消息平均投递时延最低;Rc 离 sink 节点 最远,其消息需经过多次移动节点的转发才可能到 达 sink 节点,其移动节点消息平均投递时延最高.



图 3(c)中,与区域 Re 相遇的移动节点较多,且 其中一个移动节点为 Fa,因此,其子网消息平均投 递时延最低;*Rc*只与1个移动节点相遇,且离 sink 节点最远,因此,其子网消息平均投递时延最高.

可见,区域消息平均投递时延、移动节点消息平均投递时延、子网消息平均投递时延均能反映 OSNs的连通情况.

综上所述,本文定义子网消息投递成功率、子网 消息平均投递时延为 OSNs 的连通性指标是合理的.

# 4 连通性参数

本节分析区域内连通性参数和移动节点连通性 参数与连通性指标的关系,采用因子分析法对连通 性参数间的相关性进行分析,提取出连通性参数.

### 4.1 连通性参数分析

4.1.1 区域内连通性参数

区域内连通性参数包括:区域内节点平均速度 rv、区域内节点密度 rρ、区域内节点平均缓存 rb.本 文通过大量实验获得区域内连通性参数与区域消息 投递成功率 α<sub>j</sub>以及区域消息平均投递时延 μ<sub>j</sub>的关 系,如图 4、图 5 所示.

(1)区域内连通性参数与 a<sub>i</sub>的关系

由图 4 可知,随着区域内节点平均速度 rv 递 增, $a_j$ 呈递增趋势;随着区域内节点密度  $r\rho$  递增, $a_j$ 也呈递增趋势;当区域内节点平均缓存 rb 较低时影 响比较显著,rb 增大到足够存储产生的消息时,rb对 $a_j$ 的影响明显减弱.可见,rv、 $r\rho$  与 $a_j$ 的相关性显 著,rb 与 $a_j$ 的相关性较小,采用 IBM 公司的统计软 件分析(Statistical Product and Service Solutions, SPSS)区域内连通性参数的相关性,结果如表 1 所 示,也说明区域内节点平均缓存 rb 与 $a_j$ 的非参数相 关系数最小.

#### 表 1 区域内连通性参数与连通性指标的非参数相关系数

correlation	rv	rρ	rb
$\alpha_j$	0.498	0.696	0.297
$\mu_j$	-0.727	-0.685	-0.113

### (2)区域内连通性参数与µj的关系

实验中,区域内节点采用随机移动模型运行,由 图 5 可知,当区域内节点平均速度 rv 很小时,μ;随 rv 的增加而快速降低,随着速度的增加,区域内节 点越来越活跃,μ;逐渐减少,当 rv 增加到一定值后, μ;趋于稳定;μ;随区域内节点密度 rρ 的增加而降 低,当 rρ 增加到一定值后,μ;趋于稳定;区域内节点 平均缓存 rb 对μ;的影响有限,只有当 rb 极低且 rρ 极低的时候,移动节点经过区域需要更长时间收集



图 4 区域内连通性参数与 a<sub>j</sub> 的关系

消息,当 rb 增加到不至于影响消息的存储时,μ;趋 于稳定.如表1所示,区域内节点平均速度 rv 与区 域消息平均投递时延μ;的负相关系数最小.

4.1.2 移动节点连通性参数

移动节点连通性参数包括:移动节点平均速度 mv、移动节点密度 mp、移动节点平均缓存 mb 等.通 过大量实验获得移动节点连通性参数与移动节点消 息投递成功率 β,以及移动节点消息平均投递时延 φ,的关系如图 6、图 7 所示.

(1)移动节点连通性参数与β,的关系

由图 6 可知,当移动节点平均速度 mv 较低时,



图 5 区域内连通性参数与 µ<sub>j</sub>的关系

β;随 mv 的增加而快速增加,当 mv 增加到一定值 后,β;趋于稳定;随着移动节点密度 mρ 的增加,β;没 有发生明显变化;当移动节点平均缓存 mb 较低时, β;随 mb 的增加而快速增加,当 mb 增加到一定值 后,β;趋于稳定.可见,mv、mb 与β;有一定相关性, mρ 与β;的相关性较小,采用 SPSS 软件分析移动节 点连通性参数的相关性,结果如表 2 所示.也说明了 移动节点密度 mρ 与β;的非参数相关系数最小.

(2)移动节点连通性参数与 q<sub>j</sub>的关系

由图 7 可知,随着移动节点平均速度 mv、移动 节点密度  $m\rho$ 、移动节点平均缓存 mb 的递增, $\varphi_j$ 均呈 现下降的趋势. 当 mb 较低时, $\varphi_j$ 随 mb 的增加而快 速下降,当 mb 增加到一定值后, $\varphi_j$ 趋于稳定. 如表 2



图 6 移动节点连通性参数与β的关系

所示,移动节点平均速度 mv 与移动节点消息平均 投递时延 q<sub>i</sub>的负相关系数最小.

表 2 移动节点连通性参数与连通性指标的非参数相关系数

correlation	mv	$m\rho$	mb
$\beta_j$	0.221	0.027	0.119
$\varphi_j$	-0.993	-0.868	-0.338

#### 4.2 连通性参数的相关性

统计学中的因子分析法是一种通过研究众多变量之间的内部依赖关系,探求观测数据中的基本结构,并用少数几个变量来表示其基本结构的方法.本 文首先对连通性参数指标进行巴特利特球体检验和 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)测度计算,然后利用因



图 7 移动节点连通性参数与 qi的关系

子分析法在数据相关性分析方面的有效性对连通性 参数之间的关系进行分析<sup>[30]</sup>,提取出相关性较低的 连通性参数,同时保证因子分析后的变量有足够的 解析能力,为神经网络参数的输入做预处理.

通过对上述区域内连通性参数、移动节点连通 性参数的分析,计算各连通性参数的相关性系数,如 式(7)所示.

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X}) (Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - \overline{Y})^2}}$$
(7)

其中:Xi、Yi为连通性参数样本值;X、Y为连通性参

数样本均值;N为样本个数.

连通性参数间的相关性系数矩阵如表 3 所示, 区域内节点平均速度 rv 与区域内节点密度 rρ、移动 节点密度 mρ 与区域内节点平均缓存 rb 这两对参数 间的相关性比较强,因此可以利用因子分析法对这 两对参数进行分析,以降低其相关性.

表 3 连通性参数的相关性系数

	rv	rρ	rb	mv	$m\rho$	mb
rv	1.000	0.683	0.032	-0.088	0.060	-0.201
$r\rho$	0.683	1.000	0.027	-0.104	0.065	-0.228
rb	0.032	0.027	1.000	0.015	0.882	0.017
mv	-0.088	-0.104	0.015	1.000	0.041	-0.148
$m\rho$	0.060	0.065	0.882	0.041	1.000	0.049
mb	-0.201	-0.228	0.017	-0.148	0.049	1.000

本文采用主成分分析法提取 6 个连通性参数的 公因子,计算载荷因子系数矩阵的特征值及其对应 的特征向量,得到各连通性参数的特征值及参数的 贡献情况,如表 4 所示.

表 4 连通性参数特征值与贡献

成份 —	初始特征值				
	合计	方差	累积贡献/%		
1	1.899	31.647	31.647		
2	1.546	25.764	57.411		
3	1.125	18.747	76.158		
4	1.030	11.717	91.875		
5	0.613	10.211	98.086		
6	0.115	1.914	100.000		

根据参数贡献和特征值情况,以及参数间的相 关系数,当因子的累积贡献超过 90%时,可以认为 公因子已经具有足够的解析能力,因此从表 4 中提 取前 4 个公因子.

为使提取的公因子具有更好的解释性,旋转提 取的因子载荷矩阵,采用 Kaiser 标准化正交旋转 法,旋转后 4 个成份与连通性参数之间的关系如 表 5 所示,成份 1 与区域内节点平均缓存 rb、移动节 点密度 mp 相关,成份 2 与区域内节点平均速度 rv、 区域内节点密度 rp 相关,成份 3 与移动节点平均速 度 mv 相关,成份 4 与移动节点平均缓存 mb 相关.

表 5 旋转成份矩阵

		成份					
	1	2	3	4			
rv	0.017	0.869	0.023	-0.002			
rρ	0.034	0.775	-0.120	-0.198			
rb	0.971	0.002	-0.006	-0.009			
mv	0.020	-0.075	0.989	-0.085			
m ho	0.968	0.055	0.032	0.039			
mb	0.026	-0.155	-0.090	0.975			

根据以上分析,定义成份1为区域与移动节点 信息交互度,成份2为区域节点活跃密度,成份3为 移动节点平均速度,成份4为移动节点平均缓存.连 通性参数间关系如图8所示.



图 8 OSNs 连通性参数关系图

如图 8 所示,提取区域与移动节点信息交互度、 区域节点活跃密度、移动节点平均速度、移动节点平 均缓存为连通性参数,并作为小波神经网络的输入 参数,其中,区域与移动节点信息交互度、区域节点 活跃密度可采用 SPSS 计算得到.

### 5 连通性模型

本节基于粒子群优化的小波神经网络构建 OSNs 的连通性模型,以验证 4.2 节所提取连通性参数的 合理性.基于粒子群优化的小波神经网络可减少训 练误差和避免陷入局部最优,同时也避免了共轭梯 度下降法要求激励函数可微的问题.

#### 5.1 小波神经网络

(1) 网络结构

小波神经网络结合了小波多分辨多尺度和神经 网络学习能力强的特性,能够逼近任意函数而不陷 入局部最优.Kolmogorov定理保证了任意连续函数 或映射都可由一个3层神经网络来实现函数逼 近<sup>[31]</sup>,多输入单输出小波神经网络如式(8)所示.

$$y(t) = \sum_{j=1}^{H} W_{jk} \psi \left[ \frac{\sum_{i=1}^{k} W_{ij} X_{i}(t) - b_{j}}{a_{j}} \right] + \bar{g} \quad (8)$$

其中: $\phi$ 为隐函数; $W_{ij}$ 为输入层到隐含层的权值;  $W_{jk}$ 为输出层到隐含层的权值; $a_j$ 为伸缩因子; $b_j$ 为 平移因子; $X_i(t)$ 为输入值; $\bar{g}$ 为平移常数;k为输入 层神经元个数;H为隐含层神经元个数.

(2) 基函数的选取

小波函数具有多分辨多尺度、良好的局部逼近 等特性,因此将小波函数作为神经网络的基函数,它 使得神经网络逼近函数的精度更高.各小波函数拟 合误差如图 9 所示.



图 9 各小波函数拟合误差

由图 9 可知, Marr 小波的误差下降最快, Morlet 小波其次, DOG 小波的效果最差. Marr 小波以较少 的迭代次数完成小波神经网络的拟合,因此本文选 择 Marr 小波函数作为小波神经网络的隐含层母函 数,其时域表达式如式(9)所示.

$$\psi(t) = (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -\infty < t < \infty$$
 (9)

#### 5.2 小波神经网络的优化

为提高小波神经网络的函数拟合效果,利用智能优化算法提高神经网络学习速度和精度. PSO 是一种全局优化的学习算法,被广泛应用在神经网络、函数优化等领域,可解决大量非线性、不可微和多峰值的复杂问题优化.本文选取网络训练误差平方和的均值作为适应度函数,如式(10)所示.

$$error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[ f(x_i) - \overline{f(x_i)} \right]^2$$
(10)

其中: $f(x_i)$ 为实际值; $\overline{f(x_i)}$ 为计算值;N为样本 个数.

基于粒子群的小波神经网络参数优化(PSO-WNN)算法描述如算法 1.

**算法1.** PSO-WNN 算法.

输入: 连通性参数数据集

输出:权值 W<sub>ij</sub>、W<sub>jk</sub>,伸缩因子 a<sub>j</sub>,平移因子 b<sub>j</sub>

 确定粒子的位置向量 x 和速度向量 v 的维数 D. 设 WNN 的隐含层神经元个数为 H,输入层神经元个数为 k, 输出层神经元个数为 O,则 D=2×H+k×H+O×H.

2. 随机生成粒子群矩阵如式(11)所示,其中 Z 为种群 数量.

$  x_{11} $	$x_{12}$	•••	$x_{1D}$	$v_{11}$	$v_{12}$	•••	$v_{1D}$	
$x_{21}$	$x_{22}$	•••	$x_{2D}$	$v_{21}$	$v_{22}$	•••	$v_{2D}$	(11)
	•••		•••		•••	•••		(11)
$L_{Z_1}$	$x_{Z2}$		$x_{ZD}$	$v_{Z1}$	$v_{Z2}$	•••	$v_{ZD}$	

3. 初始化加速度因子  $c_1$  和  $c_2$ 、最大迭代次数 maxgeneration、个体位置最大值  $x_{max}$ 、个体速度最大值  $v_{max}$ 、惯性系数  $\omega$  的最大值  $\omega_{max}$ 和最小值  $\omega_{min}$ 等.

 4.更新种群中每个粒子的位置向量 x 和速度向量 v, 利用式(10)判断适应度值,记录每个粒子搜索到的局部最优 位置 pb、全局最优位置 gb.

5. 判定迭代是否满足终止条件. 若不满足条件,则返 回步4;否则,跳转至步6.

得到全局最优位置 gb,将 gb 分解得到伸缩因子 a<sub>j</sub>、
 平移因子 b<sub>j</sub>、权值 W<sub>ij</sub>和 W<sub>jk</sub>,并输出.

本文在 MATLAB 7.0 中运行 PSO-WNN 算 法,通过仿真实验对比发现最佳的隐含层神经元个 数 H 为 9;本文输入层神经元为 4.2 节提取的 4 个 连通性参数, k 值为 4,输出层神经元个数 O 为 1;设 初始化加速度因子  $c_1$ 、 $c_2$ 为 1.49445,惯性系数  $\omega_{max}$ 为 0.9, $\omega_{min}$ 为 0.4<sup>[32]</sup>,最大迭代次数 maxgeneration 为 100,种群数量 Z 为 30,个体位置最大值  $x_{max}$ 为 1, 个体速度最大值  $v_{max}$ 为 5.

子网消息投递成功率  $\theta_j$ 和子网消息平均投递时 延 $\Phi_j$ 是本文定义的两个连通性指标,据此分别构建 两个小波神经网络.针对  $\theta_j$ ,采用 PSO-WNN 算法 优化后的小波神经网络参数如表 6 所示;针对  $\Phi_j$ , 采用 PSO-WNN 算法优化后的小波神经网络参数 如表 7 所示.

$a_j$	$b_j$	$W_{jk}$	${oldsymbol{W}}_{ij}$
0.7012	-0.8560	1.3926	2.3599 0.6971 0.3141 - 2.9779
-1.9768	3.2958	-2.7154	-1.0887 0.4374 0.8908 2.2616
0.1381	1.4175	-0.1461	3. 2402 - 1. 3129 3. 4663 1. 4769
-2.7772	1.0167	0.7638	-1.2278 1.2985 -0.3119 1.1586
-0.7807	1.9814	-0.7839	-0.8758-1.7595 0.3479-0.0299
1.4851	1.9621	-4.4045	-0.5814 -2.0659 0.2004 -0.7001
4.1281	0.0211	2.1492	0.2889 -1.052 -2.7500 3.2804
1.5299	-2.8110	0.6075	1.4602 3.5051 1.4051 1.3110
2.3956	0.5270	0.9801	-2.2019 -0.3045 -1.6334 -2.0454

表 6 优化后的  $\theta_i$  小波神经网络参数

表 7 优化后的 Φ<sub>i</sub>小波神经网络参数

$a_i$	$b_i$	$W_{ik}$	$W_{ij}$	-
0.5747	1.8250	0.2753	1.1497 - 0.8672 - 1.3662 - 0.284	2
0.8185	0.7985	-0.7108	− 0. 1186 − 0. 0101     0. 1170     0. 988	2
2.0811	-0.4935	1.1247	7 0.0707 0.2937 1.3359 $-1.427$	2
0.7554	0.4327	0.3127	7 - 1.9419 - 0.3243 2.4072 0.477	4
-0.0730	-0.1964	-0.2955	5-2.0413 0.5865 1.6084 $-1.542$	5
0.3705	2.8153	-0.3835	5 - 0.3776 1.6451 1.1378 $- 1.578$	6
1.3228	-0.8279	-0.0969	9 - 1.0961 - 1.9661 - 0.9993 - 0.295	0
0.4948	1.7611	1.5416	6 - 0.0581 - 0.2879  0.9422 - 0.010	8
0.0363	-0.6549	0.4281	1  0.6696  -0.4651  1.1392  2.177	8

### 5.3 连通性模型的建立

表 6、表 7 分别作为式(8)小波神经网络的参

数,得到子网消息投递成功率 $\theta_i$ 的小波神经网络和 子网消息平均投递时延 $\Phi_i$ 的小波神经网络,是验证 所提取连通性参数合理性的两个初始连通性模型.

由于连通性参数的量纲不同,本文采用最大最 小法对连通性参数样本集进行归一化预处理,将训 练样本归一化在[0,1]区间内;将归一化后的连通性 参数样本集分为训练集和测试集,分别训练和测试 初始连通性模型,得到最终的连通性模型.

## 6 实验与分析

本节通过不同移动模型下的仿真实验验证所定 义连通性指标的合理性;通过仿真实验和智能小车 构成的实验床实验,验证所提取连通性参数的适应 性和有效性.

#### 6.1 仿真实验

#### 6.1.1 参数设置

在 ONE 中,对应图 1(a)的场景,设计 OSNs 场 景如图 10 所示,5 个区域面积保持不变,通过改变 节点数量改变区域内节点密度.

GAR - default_reconness	E)
Paghiel graphics	
1257 21.00 Th 🕨 🕨 🕨 🕨 🖉 GETUPERS 1 💌 🔍 E.S.C.C. Access start	Sodes
- Di Chi	* no
	rat.
(R)	112
	- m3
	rat.
	re5
	ret
( Julia ( Astronomic A	- nat
	- day
	10
	(ten
	ratt
an Carton	ret2
	(trail)
	ra54
A Sector Contraction of Contractiono	retS
	7215
	rat7
	reth
	(th)
	100
	tim .
went log controls twent log	* 1422
then passe 1221 1: Resays value started will (* 1/420 027)	25an
connections 132.2. Reiniga citiga methol (rd.21/27)(03)002	101
ter an	1625
messages	100
owned R 1 1972 > Burner solar menual of Control (1972)	+ 117

图 10 OSNs 仿真网络模型

如图 10,移动节点收集所经过区域的感知节点 消息,当遇见 sink 节点或其他移动节点时转发消 息,直至将消息投递至 sink 节点,若消息超过 TTL 则该消息被丢弃.

仿真实验参数如表 8 所示,仿真过程中通过 ONE 的配置文件对部分参数值进行更改,主要包括节

表 8 仿真实验参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
运动模型	RWP,MBM, RW,SPMBM	区域节点数/个	1~30
传输范围/m	$20 \sim 50$	数据产生的 时间间隔/s	10
传输速率/(KB/s)	250	统计时间间隔/min	20
数据产生时间/s	$1000 \sim 1000000$	节点速度/(m/s)	$1\!\sim\!4$
数据大小/KB	$10 \sim 20$	接口类型	蓝牙
缓存大小/MB	0.01~10	TTL/min	20

点数量、节点速度、节点缓存等.每个参数值重复实验 20次,每次仿真实验的时间为 20min.

6.1.2 连通性指标的适应性验证

区域内感知节点的移动模型为随机路径点 (Random Way Points, RWP)和随机路径(Random Way, RW)模型,移动节点的移动模型为地图随机 移动(Map Based Movement, MBM)和最短路径地 图(Shortest Path Map Based Movement, SPMBM) 移动模型.

通过仿真实验验证4种移动模型(RW-MBM、 RWP-MBM、RW-SPMBM、RWP-SPMBM)下连通 性指标的合理性,子网消息投递成功率和子网消息 平均投递时延分布如图11所示.



图 11 4 种移动模型下连通性指标分布

由图 11 可知,4 种移动模型下子网消息投递成 功率 θ<sub>i</sub>的分布和子网消息平均投递时延 Φ<sub>i</sub>的分布 表现出一致性,说明本文定义 θ<sub>i</sub>和 Φ<sub>i</sub>为 OSNs 的连 通性指标在不同移动模型下都具有较好的合理性与 适应性.

6.1.3 连通性参数的合理性验证

为验证所提取连通性参数的合理性,本文利用 所建立的连通性模型计算子网消息投递成功率θ<sub>j</sub>和 子网消息平均投递时延Φ<sub>j</sub>,并与实测值比较,区域 内感知节点的移动模型为 RWP,移动节点的移动模型为 RWP,移动节点的移动模型为 MBM,结果如图 12 所示,子网消息投递成功 率 θ<sub>i</sub>和子网消息平均投递时延 Φ<sub>i</sub>的计算值与实测 值吻合度良好,说明提取区域与移动节点信息交互 度、区域节点活跃密度、移动节点平均速度、移动节 点平均缓存作为 OSNs 的连通性参数是合理的.



#### 6.2 实验床实验

为进一步验证所提取连通性参数的合理性,设计 OSNs 实验场景如图 13 所示,区域内感知节点随机部署(静止或运动),移动节点匀速或变速运动,选用美国 Crossbow 公司的 TelosB 节点,该系列节点遵循 IEEE802.15.4 协议,通信范围大约 100 m,在实验中,将节点功率调至最低,并去掉天线,使节点的通信范围为 10~20 cm,以满足图 1(a)场景.

智能小车携带节点模拟 OSNs 中的移动节点寻 迹移动,利用黑线规划 3 条小车的移动轨迹,区域内 节点和 sink 节点设置在不同的轨迹附近,区域内节 点静止或随机运动,移动节点收集这些区域的消息 并将消息投递至 sink 节点.

通过改变小车的速度和数量来改变移动节点的 速度和密度.在进行 TelosB 节点编程时,通过改变 节点消息队列的大小模拟节点缓存大小的改变.小



图 13 OSNs 实验场景

车每隔 5s 对 sink 节点进行探测,区域内节点每隔 5s 产生一条感知数据,上位机每隔 10 min 采集一次 sink 节点的数据.根据 sink 节点收到的消息时延和 消息数量获得网络的运行情况,利用实测数据对 OSNs 连通性参数进行验证,计算值与实测值之间 的关系如图 14 所示.

由图 14 可知,子网消息投递成功率 θ<sub>j</sub>和子网 消息平均投递时延 Φ<sub>j</sub>的计算值与实测值基本吻合, 进一步说明本文提取的连通性参数是合理的.

图 14 中,当子网消息投递成功率 θ<sub>i</sub>和子网消息 平均投递时延Φ<sub>i</sub>发生突变时,计算值与实测值相差



图 14 实验床实验计算值与实测值比较

较大,这是因为实验过程中,智能小车的速度受电池 和马达的影响产生波动,而上位机每隔 10 min 采集 一次 sink 节点的数据,导致部分小车数据丢失.

# 7 总 结

本文定义子网消息投递成功率 $\theta_j$ 、子网消息平 均投递时延 $\phi_j$ 为 OSNs 的连通性指标,采用因子分 析法分析连通性参数之间的关系,根据其相关性,提 取出 4 个连通性参数.仿真实验说明所定义的连通 性指标具有合理性和适用性,仿真实验和试验床实 验均说明所提取的连通性参数是合理性.

本文的主要贡献在于:

(1) 根据 OSNs 中消息传输的特点,本文将整个 网络划分为 3 个层次.

(2)本文首次定义了区域消息投递成功率、移动节点消息投递成功率、区域消息平均投递时延、移动节点消息平均投递时延,在此基础上定义子网消息投递成功率和子网消息平均投递时延为 OSNs 的连通性指标.

(3)本文提出了一种 OSNs 连通性参数的提取 方法.采用因子分析法分析其相关性,采用主成分分 析法提取连通性参数的公因子,采用 Kaiser 标准化 正交旋转法对提取的因子载荷矩阵进行旋转,从而 在区域内连通性参数和移动节点连通性参数基础 上,提取区域与移动节点信息交互度、区域节点活 跃密度、移动节点平均速度、移动节点平均缓存为 OSNs 的连通性参数.

连通性参数的研究是连通性建模的基础,本文 建立的连通性模型用于所提取连通性参数的合理性 验证,下一步将对连通性模型展开深入研究,探讨利 用本文所提取的4个连通性参数如何建立更为合 理、准确的连通性模型,拟采用深度信念网(Deep Belief Networks,DBN)进行建模,研究 DBN 的层 数、隐含层神经元个数、学习率等,以获得能更准确 刻画 OSNs 连通性的模型.

#### 参考文献

 Xiong Yong-Ping, Sun Li-Min, Niu Jian-Wei, et al. Opportunistic networks. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137(in Chinese)

(熊永平,孙利民,牛建伟等.机会传感网络.软件学报, 2009,20(1):124-137) [2] Ma Hua-Dong, Yuan Pei-Yan, Zhao Dong. Research progress on routing problem in mobile opportunistic networks. Journal of Software, 2013, 24(3): 600-616(in Chinese) (马华东,袁培燕,赵东, 移动机会网络路由问题研究进展.

(与平示, 表 石無, 起示. 移动机云 M 沿街田 问题 前 元 近 液 软件学报, 2013, 24(3): 600-616)

- [3] Mieso K, Denko. Mobile Opportunistic Networks: Architectures, Protocols and Applications. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2011
- [4] Cai Qing-Song, Niu Jian-Wei, Liu Yan. Message delivery properties in opportunistic networks. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(5): 793-801(in Chinese) (蔡青松,牛建伟,刘燕, 机会网络中的消息传输路径特性研

究. 计算机研究与发展, 2011, 48(5): 793-801)

- [5] Lin C, Peng W, Tseng Y. Efficient in-network moving object tracking in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(8): 1044-1056
- [6] Terzis A, Anandarajah A, Moore K, et al. Slip surface localization in wireless sensor networks for landslide prediction//Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Nashville, USA, 2006; 109-116
- [7] Wu F J, Huang C S, Tseng Y C. My Tai-Chi book: A virtualphysical social network platform//Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden, 2010: 428-429
- [8] Tseng Y C, Wu F J, Lai W T. Opportunistic data collection for disconnected wireless sensor networks by mobile mules. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1150-1164
- [9] Lane N D, Eisenman S B, Musolesi M, et al. Urban sensing systems: Opportunistic or participatory//Proceedings of the 9th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. Napa Valley, USA, 2008: 11-16
- [10] Ganti R K, Ye F, Lei H. Mobile crowdsensing: Current state and future challenges. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 32-39
- Ma H, Zhao D, Yuan P. Opportunities in mobile crowd sensing. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(8): 29-35
- [12] Lane N D, Miluzzo E, Lu H, et al. A survey of mobile phone sensing. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(9): 140-150
- [13] Zhao D, Ma H, Liu L, et al. On opportunistic coverage for urban sensing//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Hangzhou, China, 2013: 231-239
- [14] Boldrini C, Conti M, Jacopini J, et al. Hibop: A history based routing protocol for opportunistic networks//Proceedings of the 2007 International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Helsinki, Finland, 2007: 1-12

- [15] Harras K A, Almeroth K C. Inter-regional messenger scheduling in delay tolerant mobile networks//Proceedings of the 2006 International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. New York, USA, 2006: 93-102
- [16] Jain S, Shah R C, Brunette W, et al. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(3): 327-339
- [17] Zhao D, Ma H, Yuan P, et al. Differentiated probabilistic forwarding for extending the lifetime of opportunistic networks// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking Conference. Paris, France, 2012: 3002-3007
- Shah R C, Roy S, Jain S, et al. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. Ad Hoc Networks, 2003, 1(2): 215-233
- [19] Xia Na, Wang Shi-Liang, Zheng Rong, et al. Study on localizability judgment in underwater sensor networks based on skeleton extraction and rigidity theory. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(3): 589-601(in Chinese)
  (夏娜,王诗良,郑榕等.基于骨架提取的水下传感网络刚性 定位判别研究. 计算机学报, 2015, 38(3): 589-601)
- [20] Vasilescu I, Kotay K, Rus D, et al. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network// Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA, 2005: 154-165
- [21] Kawabata K, Takemura F, Suzuki T, et al. Underwater image gathering by utilizing stationary and movable sensor nodes: Towards observation of symbiosis system in the coral reef of okinawa. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 58(1): 561-563
- [22] Selavo L, Wood A, Cao Q, et al. Luster: Wireless sensor network for environmental research//Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Sydney, Australia, 2007: 103-116
- [23] Huang J H, Chen Y Y, Huang Y T, et al. Rapid prototyping for wildlife and ecological monitoring. IEEE Systems Journal, 2010, 4(2): 198-209
- [24] Huang Y T, Chen Y C, Huang J H, et al. Yushannet: A delay-tolerant wireless sensor network for hiker tracking in Yushan national park//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. Washington, USA, 2009: 379-380
- [25] Medjiah S, Taleb T, Ahmed T. Sailing over data mules in delay-tolerant networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 5-13
- [26] Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network//Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking &. Computing. Lausanne, Switzerland, 2002: 80-91

- [27] Perur S, Iyer S. Characterization of a connectivity measure for sparse wireless multi-hop networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Lisboa, Portugal, 2006: 80
- [28] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network// Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, USA, 2005, 2: 1407-1418
- [29] Sajadian S, Ibrahim A, de Freitas E P, et al. Improving connectivity of nodes in mobile WSNs//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Biopolis, Singapore, 2011: 364-371



**SHU Jian**, born in 1964, professor. His research interests include opportunistic networks, software engineering.

Background

This paper mainly studies the opportunistic sensor networks (OSNs) connectivity parameters. There are few detailed researches about the OSNs connectivity parameters at home and abroad. According to the features of the OSNs, the OSNs layered model is constructed. First, the network connectivity metrics, such as sub-network message delivery rate and sub-network average delivery delay, are defined, based on the layered model. Second, the parameters that affecting the network connectivity are discussed based on the layered model. And the correlation of the connectivity parameters is analyzed. At last, the wavelet neural network is utilized to verify the connectivity parameters, and achieve a OSNs connectivity model. The simulation results show that the defined connectivity metrics can reflect the change of network connectivity in the scenarios of RW-MBM,

- [30] Yang Jing, Xin Yu, Xie Zhi-Qiang. A bi-feedback system of wireless sensor network event detection in the Internet of things. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 506-520(in Chinese)
  (杨静,辛宇,谢志强. 面向物联网传感器事件监测的双向反 馈系统. 计算机学报, 2013, 36(3): 506-520)
- [31] Zhang Q, Benveniste A. Wavelet networks. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(6): 889-898
- [32] Chi Yu-Hong, Sun Fu-Chun, Wang Wei-Jun, et al. An improved particle swarm optimization algorithm with search space zoomed factor and attractor. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(1):115-130(in Chinese)
  (迟玉红,孙富春,王维军等.基于空间缩放和吸引子的粒子 群优化算法. 计算机学报, 2011, 34(1): 115-130)

GUO Kai, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include opportunistic sensor networks.

LIU Qun, born in 1988, M. S. candidate. His research interests include opportunistic sensor networks.

LIU Lin-Lan, born in 1968, professor. Her research interests include wireless sensor networks, embedded system.

RW-SPMBM, RWP-MBM, RWP-SPMBM mobile model. Furthermore, the TelosB nodes and intelligent cars are used to set the scenarios of OSNs. The experiment results show that the extracted parameters can effectively reflect the OSNs connectivity as well. This paper is supported by the National Natural Science Foundation of China (61262020, 61363015), the Production and Research Program of Jiangxi (KJLD1405). These projects focused on connectivity monitoring and link quality of sensor networks. Theses researches are the foundation of upper protocols, such as routing protocol. The authors have been studied the sensor networks over 10 years and published more than 60 papers, 5 patents, 9 software copyrights. The paper focuses on finding out the key parameters infecting OSNs connectivity, so as to support the construction of OSNs connectivity monitoring model.