

采用随机移动模型的无线自组织仿真网络连通性分析

刘宴涛¹ 汪博¹ 安建平² 刘珩²

(渤海大学工学院 锦州 121000)¹ (北京理工大学电子工程系 北京 100081)²

摘要 以无线自组织网络的连通性作为研究对象,根据几何随机图中最小度原理,结合均匀分布、泊松分布、随机点模型网络、随机方向模型网络等几种网络的节点概率分布,计算网络中节点的最小度,得到网络1-连通度与节点数和通信半径的定量关系,证明网络连通性按照均匀网络、随机方向模型网络和随机点模型网络的次序减弱。

关键词 无线自组织网络,移动模型,几何随机图,连通性

中图分类号 TN915 文献标识码 A

Analysis to Connectivity of Wireless Ad hoc Simulating Networks with Random Mobility Models

LIU Yan-tao¹ WANG Bo¹ AN Jian-ping² LIU Heng²

(College of Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)¹

(Department of Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)²

Abstract The connectivity of wireless ad hoc networks were studied, including uniform networks, Poisson networks, networks using random waypoint model, and networks using random direction model. The analysis was based on the minimum degree theorem in geometric random graphs. The node degree was calculated by using the probability density function of node distribution. The quantitative relationship among 1-connectivity, node number and communication range was illustrated. It was shown that the connectivity decreased by the sequence of uniform networks, networks using random direction model, and networks using random waypoint model.

Keywords Wireless Ad hoc networks, Mobility models, Geometric random graphs, Connectivity

1 引言

连通性是无线自组织网络的一项重要性能指标。网络绝大部分功能的实现(如路由协议、QoS、网络容量规划等等)都要以保证网络的连通性为前提,所以连通性分析一直是无线自组网领域的一个热点研究课题。早在20世纪80年代,一些研究者^[1-5]针对分组无线网就提出过“魔术数”问题,探讨了保证网络连通所需要的节点的最小邻居数。本世纪对此问题的研究依然方兴未艾,代表性成果包括 Cheng 和 Robertazzi^[6]采用广播渗流理论分析了多跳无线网络的关键连通现象,得到了站密度、节点传输半径和连通性的相互关系。Li 和 Yu^[7]从纯几何角度出发,运用几何与概率相结合的方法得出 Ad hoc 网络中邻居节点距离的平均值和平均邻居数。Bettstetter^[8]把自组织网络建模为几何随机图,当节点服从泊松分布时得到一维和二维区域节点的度分布特征,以及连通概率和节点通信半径之间的相互关系。Santi 和 Blough^[9]用概率的方法研究自组织网络节点传输半径和连通性的相互关系,得到了连通概率的上限和下限。L. E. Miller^[10]探讨了随机移动网络的两跳连通概率问题,得到了连通概率和节点数以及区域面积之间相互关系的近似表达式。Panchapakesan

和 Manjunath^[11]运用几何随机图的方法研究了密集无线自组网中节点传输半径与网络连通性的关系。Penrose^[12]从数学角度分析了几何随机图最小节点度和连通度的相互关系,他证明随着节点通信半径的增加,当节点数比较大时,最小节点度等于 k 和 k -连通度这两个属性是同时出现的, Penrose 的这项研究成果对网络的渐进连通性研究是具有指导性意义的。Xue 和 Kumar^[13]延续魔术数问题的研究,证明当每个节点连接少于 $0.074 \log n$ 个邻居节点时,网络随着 n 的增加是以概率 1 渐进不连通的;而当邻居数大于 $5.1774 \log n$ 时,网络则随着 n 的增加渐进连通。

无线自组织网络的数学模型是几何随机图,这是一个在随机图和几何图基础上发展而来的概念。随机图理论是 Erdős 和 Rényi 在 20 世纪 60 年代建立的,他们开创性地把概率分析方法引入到对图的研究中,并提出了两种随机图模型^[14]:

(1) $G(n, p)$: 由 n 个顶点组成,并以概率 p 来决定在每对顶点间是否存在边。

(2) $G(n, M)$: 顶点集由 n 个顶点构成,边集一共有 M 条边。

随机图没有考虑网络中节点的空间位置属性,且随机图

本文受国家自然科学基金项目(61101129, 61227001),教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20091101110019)资助。

刘宴涛(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线自组网、网络仿真、网络编码等, E-mail: liuyantaocn@163.com;汪博(1990-),女,主要研究方向为网络仿真;安建平(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为无线通信、无线网络等;刘珩(1982-),女,博士,讲师,主要研究方向为无线自组网等。

所生成的边具有独立性或近似独立性,所以不是无线自组网的理想模型。几何图 $G(V,r)$ 引入了节点的距离属性,在几何图中,顶点集是 V ,当且仅当两个顶点距离小于等于 r 时,在这对顶点之间才存在边。把几何图和随机图相结合,就产生了几何随机图的概念。在几何随机图 $G(n,r)$ 中,在某区域独立随机地布置 n 个节点,两个节点 (X,Y) 有边当且仅当它们之间的距离 $d(X,Y) \leq r$ 。几何随机图不具有边的独立性,如果点 X_i 和 X_j 比较接近, X_j 和 X_k 比较接近,那么 X_i 和 X_k 也会比较接近。这些属性使得几何随机图较好地模拟了无线自组网的拓扑特征。

Erdős 和 Rényi 在对随机图的研究中发现,图的很多重要属性是突然出现的。以 $G(n,p)$ 的连通性为例,随着 p 从 0 向 1 逐渐变化,在某一时刻图由不连通突然变得连通,这被称为相变现象,几何随机图也存在类似的相变现象^[15]。此外,Penrose 在对几何随机图的研究^[15]中证明:对于 n 足够大的几何随机图 $G(n,r)$,随着 r 的增加, k -连通和最小度等于 k 这两个属性是同时出现的,这就是说使随机图 $G(n,r)$ 表现为 k -连通和最小度等于 k 所需要的通信半径是相同的;或者说在相同通信半径的情况下,网络为 k -连通和最小度等于 k 的概率是相同的。考虑到实际网络通常只要求 1-连通度,取 $k=1$,则上述结论可以概括为:

$$P(\text{网络连通}) = P(\text{最小度} \geq 1)$$

这被称为最小度原理。该原理对无线自组网连通性的分析具有重要意义,因为对于一个给定的自组网拓扑图来说,其连通度往往是很难计算的,但其节点的最小度却很容易得到。

网络仿真是对无线自组网进行研究的必要手段,为了模拟网络的动态行为,往往采用随机移动模型来规划节点的移动轨迹,但研究^[16,17]发现现有的几种移动模型存在着非均匀节点分布问题,也就是随着仿真时间的推进,网络中节点有向某区域汇聚的趋势。针对随机移动模型的非均匀节点分布对网络连通性的影响,本文首先讨论了静态均匀网络和泊松网络的连通性问题,然后基于文献^[16,17]得到各种随机移动模型的节点分布特征,以圆形区域为典型仿真区域,根据最小度原理,通过计算节点的最小度来得到仿真移动网络的连通性特征。分析结果表明在相同的参数配置(通信半径、节点数)下,网络连通性按照均匀网络、随机方向模型(RD)网络和随机点模型(RWP)网络的次序逐渐降低。

2 静态网络连通性分析

2.1 均匀网络连通性分析

假设网络的覆盖范围是单位圆,并假设 n 个节点均匀分布在圆内,所有节点的通信半径都是 r 米。计算某节点 V 的度为 0,1,2 的概率。基于圆的各向同性,取 V 的位置为 $(R_1, 0)$,即位于 x 轴正半轴。以 Pr 表示任一节点 W 位于节点 V 通信范围内的概率(见图 1),即

$$Pr = \frac{\text{小圆与单位圆相交部分的面积}}{\text{单位圆面积}} \quad (1)$$

当节点远离边界时,概率 Pr 恒等于 r^2 。当节点靠近边界使其有效覆盖面积减小时,由于边界效应的影响, Pr 随之减小,如图 1 所示。利用节点间的独立性可以计算节点 V 的度为 0,1,2 的概率,分别为

$$Pr_0 = P(\text{节点 } V \text{ 的度} = 0) = (1 - Pr)^{n-1} \quad (2)$$

$$Pr_1 = P(\text{节点 } V \text{ 的度} = 1) = C_{n-1}^1 \cdot Pr \cdot (1 - Pr)^{n-2} \quad (3)$$

$$Pr_2 = P(\text{节点 } V \text{ 的度} = 2) = C_{n-1}^2 \cdot Pr^2 \cdot (1 - Pr)^{n-3} \quad (4)$$

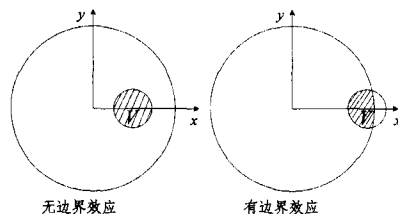


图 1 单位圆内均匀分布网络节点度的计算

参数 $r=0.2, n=200$ 时,相应的计算结果如图 2 所示。

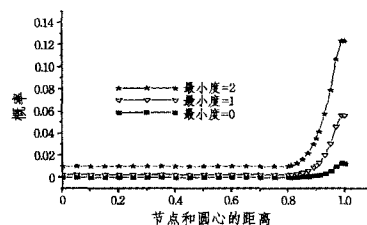


图 2 均匀网络节点 V 的度为 0,1,2 的概率

从图 2 可以看出,由于边界效应的存在,当任一节点位于边界上的时候,节点会以最大概率取得最小度,所以 $P(\text{最小度} \geq 1) = P(\text{圆周上节点度} \geq 1) = 1 - P(\text{圆周上节点度} = 0)$ 成立。对通信半径 r 和网络中节点数目 n 各取一组值加以计算,结果如图 3 所示。

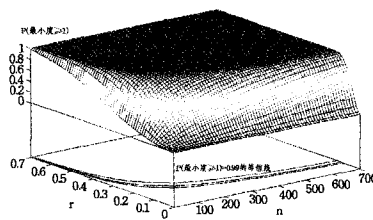


图 3 均匀网络的连通性

2.2 泊松网络连通性分析

作为静态网络的另一个例子,考察网络中节点服从泊松分布的情况。网络配置为: n 个节点随机分布在某面积为 A 的区域中,所有节点的通信半径都是 r 米。当 $A \gg \pi r^2$ 时,可以近似地认为节点服从泊松分布(分布密度 $\rho = n/A$)。Upton^[18]证明对于二维平面上的泊松点过程(密度 ρ),定义任意点到其最近邻点之间的距离为最近邻距离 ξ ,则 ξ 的概率密度函数为

$$f(\xi) = 2\pi\rho\xi \cdot e^{-\rho\pi\xi^2}, \xi > 0$$

应用这一结论来分析当 r 和 A 满足什么关系时,能够以概率 p 保证网络中节点的最小度大于 0,即网络实现连通。在泊松分布网络中,任意一个节点度为 0 的概率为

$$P(\text{某节点的度} = 0) = P(\xi > r) = 1 - P(\xi \leq r) = e^{-\rho\pi r^2}$$

所以任意一个节点度大于 0 的概率为

$$P(\text{某节点的度} > 0) = 1 - e^{-\rho\pi r^2}$$

另外基于网络中节点分布的统计独立性,可得网络中所有节点的度都大于 0 的概率为 $(1 - e^{-\rho\pi r^2})^n$,代入 $\rho = n/A$ 可得

$$P(\text{最小度} > 0) = (1 - e^{-\frac{nr^2}{A}})^n$$

对通信半径 r 和网络中节点数目 n 各取一组值加以计算, 结果如图 4 所示。

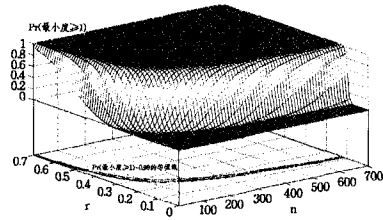


图 4 泊松网络的连通性

3 移动仿真网络连通性分析

3.1 随机点模型网络连通性分析

Boudec^[16] 采用 Palm 微积分的方法推导出圆形区域随机点模型的平稳节点分布的概率密度函数为

$$pdf(R) = \frac{45}{16\pi} (1 - R^2) E(R)$$

其形状如图 5 所示, $E(R)$ 表示完全椭圆积分, 其表达式见文献[17]。

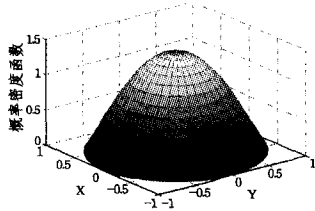


图 5 随机点模型节点分布的概率密度函数

由于节点分布在圆形区域中, 利用 R 与 θ 的独立性, 可得

$$pdf(R, \theta) = \frac{45}{16\pi} (1 - R^2) E(R) \frac{1}{2\pi}$$

$$A = \begin{cases} 2\pi, & 0 \leq R_1 < r \\ 2\arcsin(\sqrt{(R+R_1+r)(R+R_1-r)(R-R_1+r)(R_1+r-R)}/2RR_1), & r - R_1 \leq R \leq r + R_1 \end{cases}$$

3. Case3 $1 - r \leq R_1 \leq 1$

$$Pr(\text{Case3}) = \int_{R_1-r}^1 R \cdot \frac{45}{16\pi} \cdot (1 - R^2) E(R) \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot AdR$$

$$A = 2\arcsin(\sqrt{(R+R_1+r)(R+R_1-r)(R-R_1+r)(R_1+r-R)}/2RR_1)$$

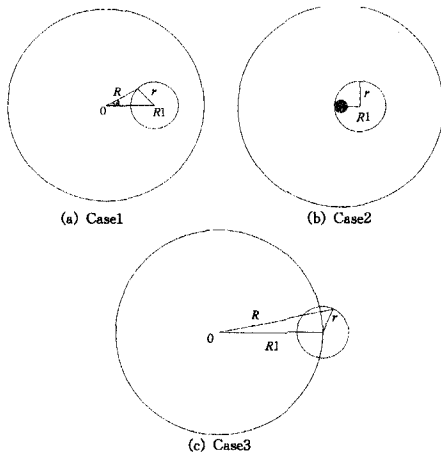


图 6 节点 W 和 V 的距离 $d(W, V)$ 小于等于 r 的概率的计算

计算位于圆形区域中某处的节点 V 度为 0 的概率。不失一般性, 取 V 的位置为 $(R_1, 0)$, 即位于 x 轴正半轴。设网络中所有节点的通信半径为 r , 数目为 n , 网络区域为单位圆。与对均匀网络的分析类似, 以 Pr 表示任一节点 W 位于节点 V 通信范围内的概率, 则 Pr 等于节点 W 和 V 的距离 $d(W, V)$ 小于等于 r 的概率, 即

$$\begin{aligned} Pr &= P(d(W, V) \leq r) = P(W \text{ 落在 } r \text{ 为半径的圆内}) \\ &= \iint R \cdot pdf(R, \theta) d\theta dR \\ &= \iint R \cdot pdf(R, \theta) d\theta dR \\ &= \int R \cdot \frac{45}{16\pi} \cdot (1 - R^2) E(R) \cdot \frac{1}{2\pi} dR \int d\theta \end{aligned}$$

根据 R_1 取值的不同, 积分应该分为 3 种情况(见图 6), 分别表示为 Case1, Case2, Case3。

1. Case1 $r \leq R_1 < 1 - r$

$$Pr(\text{Case1}) = \int_{R_1-r}^{R_1+r} R \cdot \frac{45}{16\pi} \cdot (1 - R^2) E(R) \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot AdR$$

式中, A 表示对 θ 取积分的结果, 根据三角形的边角关系, 有

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{(R+R_1+r)(R+R_1-r)(R-R_1+r)(R_1+r-R)}}{2RR_1}$$

所以

$$A = 2\arcsin$$

$$(\sqrt{(R+R_1+r)(R+R_1-r)(R-R_1+r)(R_1+r-R)}/2RR_1)$$

2. Case2 $0 \leq R_1 < r$

$$Pr(\text{Case2}) = \int_0^{r+R_1} R \cdot \frac{45}{16\pi} \cdot (1 - R^2) E(R) \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot AdR$$

在这种情况下, 由于半径为 r 的小圆包括了单位圆的圆心, 所以 A 是分段函数, 即

$$A = \begin{cases} 2\pi, & 0 \leq R \leq r - R_1 \\ 2\arcsin(\sqrt{(R+R_1+r)(R+R_1-r)(R-R_1+r)(R_1+r-R)}/2RR_1), & r - R_1 \leq R \leq r + R_1 \end{cases}$$

取 $r = 0.2, n = 200$, 应用式(2)~式(4)和数值积分计算可得 V 的度为 0, 1, 2 的概率与 V 的位置关系, 如图 7 所示。

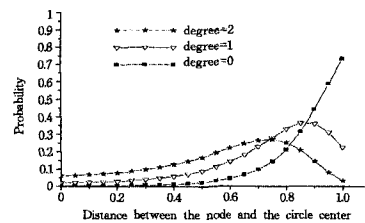


图 7 随机点模型网络节点 V 的度为 0, 1, 2 的概率

在图 7 中, 随着节点 V 与圆心距离的加大, 其度为 0 的概率呈现单调递增的趋势, 这与 RWP 模型节点向中心汇聚的分布特征是相吻合的。但是度为 1 和 2 的两条曲线却在边界附近出现峰值, 这是因为存在边界效应。根据 RWP 模型中节点的平稳概率分布可知, 当节点 V 位于单位圆圆周上时, 该节点最大的概率度为 0, 所以在 Case3 的计算中取 $R_1 = 1$ 并求解式(2)中的 Pr_{-0} , 可求得节点 V 位于圆周上时度为 0 的概率。进一步, 可以求得网络中节点的最小度大于 0 的概率为 $P(\text{最小度} > 0) = P(\text{圆周上节点度} > 0) = 1 - Pr_{-0}$, 此概率与通信半径 r 和网络中节点数目 n 的关系如图 8 所示。

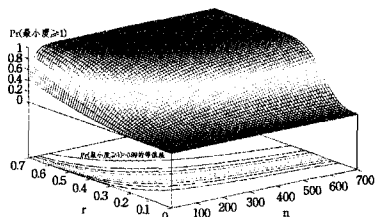


图8 随机点模型网络的连通性

3.2 随机方向模型网络连通性分析

求得随机方向模型节点分布的概率密度函数表达式为^[17]

$$pdf(R) = 2RK(R) + (R^2 - 1)K(R') + E(R')$$

其形状如图9所示,其中 $K()$ 和 $E(R)$ 表示完全椭圆积分。

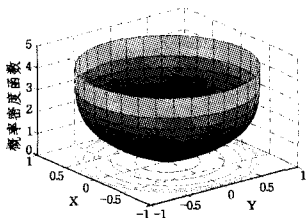


图9 随机方向模型节点分布的概率密度函数

对RD模型进行与RWP模型类似的分析,可以得到位于圆形区域中某处的节点V的度为0,1,2的概率,结果如图10所示。

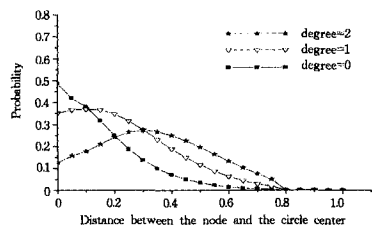


图10 随机方向模型网络节点V的度为0,1,2的概率

在图10中,随着节点V与圆心距离的加大,其度为0的概率呈现单调递减的趋势,这与RD模型节点向边界发散分布特征是相吻合的。基于图10可知,当节点V位于单位圆圆心时,该节点最大的概率度为0,因此在Case2的计算中取 $R_1=0$ 并求解式(2)中的 Pr_0 ,可求得节点V位于圆心时度为0的概率。进一步,可以求得网络中节点最小度大于0的概率为 $P(\text{最小度}>0) = P(\text{圆心处节点度}>0) = 1 - Pr_0$,此概率与通信半径r和网络中节点数目n的关系如图11所示。

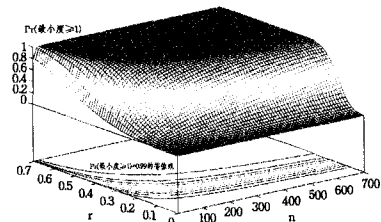


图11 随机方向模型网络的连通性

3.3 随机游走模型网络连通性分析

证明在有边界限制的区域,随机游走模型网络的平稳节点分布为均匀分布,所以应用该模型的网络与均匀网络具有相同的连通性特征^[19]。

最后,为了比较均匀分布、随机方向模型和随机点模型3种网络的连通性,提取图3、图8和图11中取值为0.9,0.95,0.99的3条等值线,如图12所示。

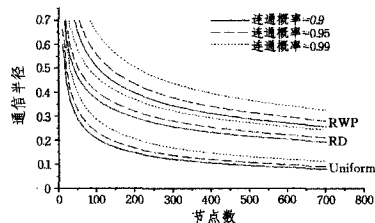


图12 随机点模型、随机方向模型和均匀网络的连通性比较

结束语 从图12的比较结果可以看出,移动模型RD和RWP的引入,不同程度上降低了静态均匀网络的连通概率。其中,RWP模型网络的连通性是最差的,可见尽管RWP模型的节点有向中心汇聚的趋势,但由于个别节点游离在边界附近,造成了全网不连通,其连通子图出现在圆心附近,如图13所示。RD模型尽管节点向边界发散,但其连通性略优于RWP模型,其最大连通子图出现在边界附近成圆环状,如图14所示。

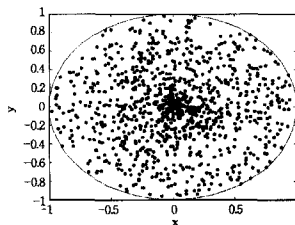


图13 随机点模型网络节点向中心汇聚

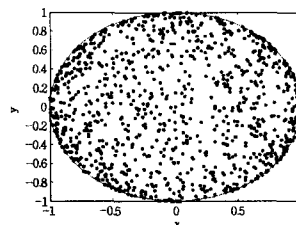


图14 随机方向模型网络节点向边界发散

综上所述,随机点模型和随机方向模型由于具有非均匀分布的特征,在不同程度上破坏了原始均匀网络的连通性,因此给网络仿真带来了不利影响,这进一步印证了文献[17]的结论:在3种无线自组网仿真移动模型中,随机游走模型要优于随机点模型和随机方向模型。因此,在设计采用随机移动模型的无线自组网仿真时,应该把随机游走模型作为首选的最优的移动模型。

参考文献

- [1] Takagi H, Kleinrock L. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals [J]. IEEE trans. on communications, 1984; 246-257
- [2] Ni J, Chandler S. Connectivity properties of a random radio network[C]//Proc. of IEE Communications. Aug 1994; 289-296
- [3] Kleinrock L, Silvester J A. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number[C]//Proc. of IEEE Telecommunication Conference. Dec 1978
- [4] Mathar R, Mattfeldt J. Analyzing routing strategy NFP in multihop packet radio network on a line[C]//IEEE Trans on Communications. 1995; 977-988
- [5] Hou T, Li V. Transmission range control in multihop packet radio networks[C]//IEEE Trans on Communications. Jan. 1986; 38-44
- [6] Cheng Y, Robertazzi T G. Critical connectivity phenomena in multihop radio models [J]. IEEE trans on communications, 1989, 37(7); 770-777

高效的安全数据融合方案 CNPD。该方案利用复数的附加属性,将发送到查询服务器之前的感测数据转换成复数形式。即使数据被窃听和解密,攻击者也难以恢复出敏感信息。通过分析可以表明,CNPD 方案在通信开销以及安全方面比现有的方案更加高效。

由于 CNPD 方案保护数据隐私是建立在现有高效的密钥管理方案基础上的,因此只有两者共同携作为用户提供基本的安全属性,如访问控制、消息完整性和消息保密性等,才能更好地保护用户的数据隐私。在今后的工作中,我们会使用 TOSSIM 仿真对方案进行更加广泛的性能评估。

参 考 文 献

- [1] 孙利民,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005
- [2] Culler D, Estrin D, Srivastava M. Overview of Sensor Networks [J]. IEEE Computer Society Press, 2004, 37(8): 41-49
- [3] 康健,左宪章,唐力伟,等. 无线传感器网络数据融合技术[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 31-35
- [4] 张鹏,喻建平,刘宏伟. 传感器网络安全数据融合[J]. 计算机科学, 2011, 34(8): 106-108
- [5] Dong Xiao-mei, Li Shan-shan. A Secure Data Aggregation Approach Based on Monitoring in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Computer Society, 2011, 10(9): 122-129
- [6] Chen Chien-ming, Lin Yue-Hsun, Lin Ya-Ching, et al. RCDA: Recoverable Concealed Data Aggregation for Data Integrity in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Computer Society, 2012, 23(4): 727-734
- [7] 黎为. 无线传感器网络数据融合安全方案的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2009
- [8] Girao J, Westhoff D, Schneider M. CDA: Concealed Data Aggregation for Reverse Multicast Traffic in Wireless Sensor Networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Commu-
nications. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005: 3044-3049
- [9] Ferrer J D. A Provably Secure Additive and Multiplicative Privacy Homomorphism[C]// Proc of the 5th International Conference on Information Security. London: Springer-Verlag Press, 2002: 471-483
- [10] Castelluccia C, Mykletun E, Tsudik G. Efficient Aggregation of Encrypted Data in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. 2005: 109-117
- [11] Mykletun E, Girao J, Westhoff D. Public Key Based Cryptoschemes for Data Concealment in Wireless Sensor Networks[C]// Proc of IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE Communications Society Press, 2006: 2288-2295
- [12] He W B, Liu X, Nguyen H. Pda: Privacy-preserving Data Aggregation in Wireless Sensor Networks[C]//Proc of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007: 2045-2053
- [13] Li H, Lin K, Li K. Energy-efficient and High-Accuracy Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Communication, 2011, 34: 591-597
- [14] 杨庚,王安琪,等. 一种低能耗的数据融合隐私保护算法[J]. 计算机学报, 2011, 34(5): 792-800
- [15] Madden, Samuel R, Franklin, et al. TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensor Networks[J]. OSDI, 2002, 36(SI)
- [16] Madden, Franklin, Hellerstein, et al. TinyDB: an Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2004, 30(1): 122-173
- [17] Zitterbart M. An Efficient Key Establishment Scheme for Secure Aggregating Sensor Networks[C]// Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security. March 2006: 303-310
- [18] Penrose M D. On k-connectivity for a geometric random graph [J]. Wiley Random Structures and Algorithms, 1999, 15(2): 145-164
- [19] Xue F, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks[C]// Wireless Networks. 2004: 169-181
- [20] Bollobas B. Random graphs[M]. Cambridge University Press, 2001
- [21] Penrose M. Random geometric graphs[M]. Oxford university press, 2003
- [22] Boudec J L. Understanding the simulation of mobility models with palm calculus[EB/OL]. technical report, <http://lcawww.epfl.ch/publications/leboudec>, 2005
- [23] 刘宴涛, 安建平, 卢继华, 等. 无线自组织网络个体移动模型分析[J]. 通信学报, 2010, 31(2): 36-43
- [24] Upton G J G, Fingleton B. Spatial data analysis by example[M]. Jone Wiley & Sons, 1985
- [25] Boudec J L, Vojnovic M. The random trip model: stability, stationary regime, and perfect simulation[J]. IEEE/ACM trans. on networking, 2006, 14(6): 1153-1166

(上接第 290 页)

- [7] Li H, Yu D. A statistical study of neighbor node properties in Ad hoc network[C]//Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops(ICPPW'02). 2002
- [8] Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network[C]// Proceeding of ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc). June 2002
- [9] Santi P, Blough D M, Vainstein F. A probabilistic analysis for the range assignment problem in ad hoc networks[C]// Proceeding of ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc). Oct 2001
- [10] Miller L E. Probability of a two-hop connection in a random mobile network[C]//2001 Conference on Information Sciences and Systems. March 2001: 21-23
- [11] Panchapakesan P, Manjunath D. On the transmission range in dense ad-hoc radio networks[C]//Proc. SPCOMM 2001. Bangalore, India, July 2001: 1-38
- [12] Penrose M D. On k-connectivity for a geometric random graph