

# 衰落信道下无线多跳网络的连通性研究

李燕君 朱艺华

(浙江工业大学计算机学院 杭州 310023)

**摘要** 基于齐次泊松点过程的节点分布模型,在不同的衰落信道模型下推导了网络无孤立点概率的闭型表达式,用作网络连通概率的上界。特别分析了对数正态阴影衰落和瑞利衰落信道的相关物理参数对连通性的影响。此外,还讨论了协作通信对于网络连通性能的提高作用。最后,在仿真构造的无线网络中测试得到的连通性能的仿真值与理论分析结果吻合。

**关键词** 无线多跳网络,连通性,对数阴影衰落,瑞利衰落

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Connectivity of Wireless Multi-hop Networks under Fading Channel

LI Yan-jun ZHU Yi-hua

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** By assuming the deployment of nodes a homogeneous Poisson point process, closed-formed expressions of network non-isolation probability were derived under different fading channel models, as the upper bound of 1-connectivity probability, with particular emphasis on the effects of lognormal shadowing and Rayleigh fading. The impact of cooperative communication was also addressed, showing how it can be used to enhance the network connectivity. Finally, numerical simulations in synthetic wireless network scenarios show a satisfying consistence between the theoretical findings and simulation results.

**Keywords** Wireless multi-hop networks, Connectivity, Log-normal shadowing fading, Rayleigh fading

## 1 引言

连通性问题是无线多跳网络(如无线 ad hoc 及传感器网络)研究的基本问题之一。首先,连通性是实现网络功能的必要条件,关系到节点间能否正常通信和进行数据传输及上层协议的正常工作;其次,对无线传感器网络的某些应用而言,网络连通性比网络容量更为重要,例如周期性环境监测的应用不需要为数据流提供很大的带宽,但需要网络维持较好的连通性以保障周期性数据的持续传输。

一些文献<sup>[1-3]</sup>在研究无线网络连通问题时将节点的通信模型视为布尔圆,即位于圆心的节点只能与圆内的节点通信,与圆外的节点无法通信。布尔圆通信模型将环境条件理想化,无法反映无线通信的或然性,所得的研究结果在实际应用中受到了很大的限制。在实际系统中,终端间的通信因受到衰落信道和多径效应等影响而变得不稳定不可靠<sup>[4]</sup>。近年来的研究逐渐摒弃了布尔圆通信模型,而将信道衰落融入到连通问题的研究中<sup>[5-7]</sup>。文献<sup>[5]</sup>给出了对数正态阴影衰落信道下网络渐近连通所需节点密度的紧下界,并通过仿真验证了理论结果的紧度。文献<sup>[6]</sup>进一步明确了阴影方差对网络连

通性的影响,发现阴影效应使网络拓扑更具随机图的特性,即两点间能否通信与距离的关系削弱,使得短链路消失,出现更多长链路。文献<sup>[7]</sup>分析了随机信道及随机分配传输功率对网络连通性的影响,并提出采用多天线分集技术能有效提高网络连通性能。然而,上述文献均只考虑单一的信道衰落模型,即对数正态阴影衰落,而在实际信道中存在多种衰落及衰落效应的叠加,研究不同的衰落信道及叠加效应对连通的影响更具实际意义。

由于网络连通概率无法直接求得,需借助网络渐近连通概率的上界,即用网络无孤立点概率来逼近连通概率,而无孤立点概率又可由节点孤立的概率推导。本文采用多种衰落信道模型,包括自由空间信道、对数正态阴影衰落信道、瑞利衰落信道及阴影-瑞利衰落叠加信道,推导了网络中任一节点孤立概率的闭型表达式,由此得到网络无孤立点概率来反映网络连通性能。通过 Monte Carlo 仿真进一步验证了理论分析的有效性;理论分析和仿真实验清楚地显示了在不同的环境参数下网络连通性能随节点密度增大的变化规律。此外,本文还研究了协作通信对网络连通性能的影响。协作通信无需增加硬件成本,利用合适的编码技术可以实现对连通性能的提高。

到稿日期:2010-04-19 返修日期:2010-07-22 本文受国家自然科学基金(60873228,61003264),浙江省科技厅国际合作项目(2009 C34002),浙江省教育厅科研项目(Y200907722)资助。

李燕君(1982-),女,博士,讲师,主要研究方向为无线自组织网络、传感器网络, E-mail: yjli@zjut.edu.cn; 朱艺华(1961-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线网络、移动计算。

## 2 相关模型

### 2.1 节点分布模型

节点的空间分布模型采用强度为  $\lambda$  的泊松点过程,该过程定义如下:

**定义 1**(泊松点过程)  $\mathbb{R}^2$  空间上强度为  $\lambda$  的泊松点过程是一组随机变量  $N(A)$ , 定义为子域  $A$  的节点数,  $A \subset \mathbb{R}^2$ , 它服从强度为  $\lambda(A)$  的泊松分布:

$$P(N(A)=k) = \frac{\lambda(A)^k}{k!} e^{-\lambda(A)}, k=0,1,2,\dots \quad (1)$$

如果  $A_1, A_2, \dots$  是不相交的子集, 那么  $N(A_1), N(A_2), \dots$  是独立的随机变量。

该泊松分布的数学期望值  $E(N) = \lambda(A) = \rho(A) |A|$ , 其中,  $\rho(A)$  和  $|A|$  分别是子域  $A$  的节点密度和面积。若节点密度在整个子域内恒定, 该过程为齐次泊松点过程, 节点数只取决于区域的面积而与该区域的形状和位置无关。为简化表述, 以下将以  $N, \rho, \lambda$  替代  $N(A), \rho(A)$  和  $\lambda(A)$ 。

泊松点过程是广泛存在的, 例如建模确定空间的星星数量或者描述皮氏培养皿中的培养细菌数。引入泊松点过程是因为它符合多数人对于“随机分布”的直觉概念。

### 2.2 网络模型

无线网络可以用随机图  $G=(V, E)$  表示<sup>[8]</sup>, 其中  $V$  是节点集,  $E$  是可以直接通信的链路组成的边集。对于图  $G$ , 连通有如下定义:

**定义 2** 当且仅当图  $G$  中任意两点  $u, v$  间存在一跳或多跳路径时, 图  $G$  是连通图。

本文研究的连通问题定位在物理层, 不考虑信道接入方式和网络负载情况, 也不考虑节点的移动性。由于节点间的相互干扰或负载增大而引起的通信受阻, 可以视为其容量的降低而非连通性能下降<sup>[7]</sup>。物理层的连通性能可以看作数据传输不频繁或无碰撞 MAC 机制下的网络连通性能, 是存在干扰的 MAC 层之上的网络连通性能的上界。对于移动多跳网络的连通性研究可参考文献<sup>[9]</sup>。

### 2.3 信道衰落模型

无线信道主要有两类衰落<sup>[10]</sup>: 大尺度衰落(慢衰落)和小尺度衰落(快衰落)<sup>1</sup>。大尺度衰落描述的是信号幅度在较长时间、较大范围内的变化; 而小尺度衰落描述的是信号幅度的瞬时变化, 与多径传播有关。在空旷的室外环境下, 大尺度衰落通常用自由空间模型表征, 认为信号强度的均值随距离呈幂衰减; 在有障碍物的复杂环境下, 大尺度衰落常用的是阴影衰落模型, 它反映了电磁波由于绕射而发生信号的变化。其中, 应用最为广泛的对数正态阴影衰落(下文简称阴影衰落)模型, 用对数正态分布来表征其衰落的幅度特性。小尺度衰落主要是由电磁波的反射以及散射等引起的, 由于信号的多径传播, 每个接收信号可以由两个正交正态分量叠加, 常用的是瑞利衰落模型。瑞利衰落下接收信号的幅值服从瑞利分布, 能量服从指数分布。实际信道同时存在时空特性, 可用快衰落与慢衰落的叠加描述。

## 3 网络连通性分析

令  $P(C)$  表示网络 1-连通的概率,  $P(I)$  表示网络中任意

一节点孤立的概率,  $P(NI)$  则表示网络无孤立点概率。易得,  $P(NI)$  是  $P(C)$  的上界, 即  $P(C) \leq P(NI)$ 。假设网络  $A$  中有孤立点是独立事件且网络中节点数很多 ( $\lambda \geq 100$ ), 则无节点孤立的条件概率可表示为:

$$P(NI|N=k) = (1-P(I))^k \quad (2)$$

利用全概率公式, 得到其全概率为:

$$\begin{aligned} P(NI) &= \sum_{k=0}^{\infty} P(NI|N=k) \cdot P(N=k) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (1+P(I))^k \cdot \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = e^{-\lambda P(I)} \end{aligned} \quad (3)$$

问题转化为求  $P(I)$ , 即节点孤立的概率。节点孤立等效于节点邻居数为 0。假设节点的邻居数为  $D$  ( $D$  又称为节点的度), 由于齐次泊松点过程产生的节点密度恒定, 因此  $D$  同样服从式(1)的泊松分布, 令其期望值为  $D_0$ , 这样  $P(I)$  可表示为:

$$P(I) = P(D=0) = e^{-D_0} \quad (4)$$

问题转化为计算平均节点度  $D_0$ 。令距离为  $r$  的两节点连通的概率为  $P(r)$ , 由于平面上任意两点都有连通的可能, 因此  $D_0$  可由  $\rho P(r)$  在整个平面上积分得到:

$$D_0 = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} P(r) \cdot r dr \, d\phi = 2\pi\rho \int_0^{\infty} P(r) \cdot r dr \quad (5)$$

不同的信道模型下, 对于  $P(r)$  及式(5)的计算值会有所不同。

### 3.1 自由空间信道

**定理 1** 自由空间信道模型下, 接收信号强度  $P_r = P_t K r^{-\alpha}$ , 那么网络中节点孤立概率  $P(I)$  满足:

$$P(I) = e^{-\pi\rho(KP_t/P_{th})^{2/\alpha}} \quad (6)$$

式中,  $P_t$  是发射功率,  $K$  是常系数,  $r$  是节点间的距离,  $P_{th}$  是接收信号强度阈值,  $\alpha$  是路径衰减指数。

证明: 在自由空间信道模型下, 当且仅当接收信号强度  $P_r \geq P_{th}$  时, 距离为  $r$  的两节点才能相互通信, 即:

$$P(r) = \begin{cases} 1, & P_t K r^{-\alpha} \geq P_{th} \\ 0, & P_t K r^{-\alpha} < P_{th} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得:

$$D_0 = 2\pi\rho \int_0^{(KP_t/P_{th})^{1/\alpha}} r dr = \pi\rho(KP_t/P_{th})^{2/\alpha}$$

代入式(4)得:  $P(I) = e^{-\pi\rho(KP_t/P_{th})^{2/\alpha}}$ 。证毕。

### 3.2 阴影衰落信道

**定理 2** 在阴影衰落模型下, 网络中节点孤立概率  $P(I)$  满足:

$$P(I) = e^{-\pi\rho(KP_t/P_{th})^{2/\alpha} 2\sigma^2/\alpha^2} \quad (8)$$

式中,  $\sigma$  是阴影方差。

证明: 在阴影衰落信道下, 接收信号强度为  $P_r = X P_t K r^{-\alpha}$ , 其中  $P_t K r^{-\alpha}$  是接收信号强度的均值,  $X$  是阴影衰落信道增益, 服从对数正态分布, 其概率密度函数为:  $f_X(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(\ln x)^2/2\sigma^2}$ 。当且仅当  $P_r \geq P_{th}$  时, 距离为  $r$  的两节点能相互通信, 即:  $P(r) = P(X P_t K r^{-\alpha} \geq P_{th})$ , 展开得:

$$P(r) = P\left(X \geq \frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}\right) = \int_{\frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}}^{\infty} \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(\ln x)^2/2\sigma^2} dx \quad (9)$$

令  $t = (\ln x)/\sigma$ , 则  $x = e^{\sigma t}$ , 代入式(9)得:

$$P(r) = \int_{\frac{\ln(P_{th} r^\alpha / K P_t)}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$$

<sup>1</sup> 也有文献将信道衰落分为大尺度、中尺度和小尺度三类, 本文借鉴文献<sup>[9]</sup>的分类方法。

代入式(5)得:

$$D_0 = 2\pi\rho \int_0^{\infty} \int_{\ln(P_{th}r^\alpha/KP_t)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \cdot r dr \quad (10)$$

由于  $D_0$  必然有界,根据 Fubini 定理交换内外积分得:

$$\begin{aligned} D_0 &= 2\pi\rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{(e^\alpha KP_t/P_{th})^{1/\alpha}} r dr \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \\ &= \pi\rho \int_{-\infty}^{\infty} (e^\alpha KP_t/P_{th})^{2/\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \\ &= \pi\rho (KP_t/P_{th})^{2/\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2} + \frac{2\alpha t}{\alpha}} dt \\ &= \pi\rho (KP_t/P_{th})^{2/\alpha} e^{2\alpha^2/\alpha^2} \end{aligned}$$

代入式(4)得:  $P(I) = e^{-\pi\rho(KP_t/P_{th})^{2/\alpha} e^{2\alpha^2/\alpha^2}}$ 。证毕。

由定理 2 可知,阴影方差的增大可降低节点为孤立点的概率,这一点将在第 4 节的仿真中得到验证。

### 3.3 瑞利衰落信道

**定理 3** 在瑞利衰落信道模型下,网络中节点孤立概率  $P(I)$  满足:

$$P(I) = e^{-\pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(KP_t/P_{th})^{2/\alpha}} \quad (11)$$

式中,  $\Gamma(\cdot)$  是 Gamma 函数。

证明:在瑞利衰落信道下,接收信号强度  $P_r = YP_t K r^{-\alpha}$ , 其中  $P_t K r^{-\alpha}$  是接收信号强度的均值,  $Y$  是瑞利衰落信道增益,服从指数分布,其概率密度函数为  $f_Y(y) = e^{-y}$ 。当且仅当  $P_r \geq P_{th}$  时,距离为  $r$  的两节点能相互通信,即:  $P(r) = P(YK P_t r^{-\alpha} \geq P_{th})$ , 展开得:

$$P(r) = P(Y \geq \frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}) = \int_{\frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}}^{\infty} e^{-y} dy = e^{-\frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}} \quad (12)$$

代入式(5)得:

$$D_0 = 2\pi\rho \int_0^{\infty} e^{-\frac{P_{th} r^\alpha}{K P_t}} r dr \quad (13)$$

令  $m = P_{th} r^\alpha / K P_t$ , 代入式(13)得:

$$D_0 = 2\pi\rho \int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha} (K P_t / P_{th})^{2/\alpha} m^{\frac{2}{\alpha}-1} e^{-m} dm \quad (14)$$

由于 Gamma 函数  $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} m^{z-1} e^{-m} dm$ , 式(14)可改写为:

$$D_0 = \pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha}$$

代入式(4)得:

$$P(I) = e^{-\pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha}}$$

证毕。

由定理 3 的式(11)可知,当  $\alpha > 2$  时,瑞利衰落会使孤立点概率增大;当  $\alpha < 2$  时,瑞利衰落反而有助于网络连通。在通常情况下,  $\alpha$  的取值范围在 2~4 之间;而在某些特殊环境如水声通信信道,  $\alpha$  的取值可能小于 2。

### 3.4 阴影-瑞利衰落叠加信道

**定理 4** 在阴影-瑞利衰落叠加信道下,网络中任意一点孤立的概率  $P(I)$  满足:

$$P(I) = e^{-\pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha} e^{2\alpha^2/\alpha^2}} \quad (15)$$

证明:在阴影-瑞利衰落叠加的信道模型下,接收信号强度  $P_r = X Y P_t K r^{-\alpha}$ , 其中  $X$  是阴影衰落信道增益,  $Y$  是瑞利衰落信道增益,它们的概率密度函数分别为:  $f_X(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(\ln x)^2/2\sigma^2}$ ,  $f_Y(y) = e^{-y}$ ,  $X > 0, Y > 0$ 。当且仅当  $P_r \geq P_{th}$  时,距

离为  $r$  的两节点能相互通信,即:  $P(r) = P(X Y K P_t r^{-\alpha} \geq P_{th})$ , 展开得:

$$\begin{aligned} P(r) &= P(X Y \geq P_{th} r^\alpha / K P_t) \\ &= \int_0^{\infty} \int_{P_{th} r^\alpha / K P_t X}^{\infty} e^{-y} dy \cdot \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(\ln x)^2/2\sigma^2} dx \quad (16) \end{aligned}$$

令  $t = (\ln x)/\sigma$ , 则  $x = e^\sigma t$ , 代入式(16)得:

$$P(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \cdot e^{-P_{th} r^\alpha / K P_t e^\alpha} dt$$

代入式(5)得:

$$\begin{aligned} D_0 &= 2\pi\rho \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \cdot e^{-P_{th} r^\alpha / K P_t e^\alpha} dt \cdot r dr \\ &= 2\pi\rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} r e^{-P_{th} r^\alpha / K P_t e^\alpha} dr \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \cdot dt \quad (17) \end{aligned}$$

令  $m = P_{th} r^\alpha / K P_t e^\alpha$ , 代入式(17)得:

$$\begin{aligned} D_0 &= 2\pi\rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha} (K P_t e^\alpha / P_{th})^{2/\alpha} m^{\frac{2}{\alpha}-1} e^{-m} dm \cdot \\ &\quad \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \cdot dt \quad (18) \end{aligned}$$

由于 Gamma 函数  $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} m^{z-1} e^{-m} dm$ , 式(18)可改写为:

$$\begin{aligned} D_0 &= \pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2} + \frac{2\alpha t}{\alpha}} dt \\ &= \pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha} e^{2\alpha^2/\alpha^2} \end{aligned}$$

代入式(4)得:

$$P(I) = e^{-\pi\rho \frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})(K P_t / P_{th})^{2/\alpha} e^{2\alpha^2/\alpha^2}}$$

证毕。

## 4 协作通信对网络连通性的影响

第 3 节研究的是节点间不采用合作机制下的网络连通性问题,然而在信道条件恶劣的情况下,可以通过节点间的协作通信实现分集增益,抵抗多径衰落的影响,提高网络的连通性<sup>[9]</sup>。协作通信的原理如图 1 所示。在无协作情况下已经形成的节点簇可以将簇内资源与簇外节点相连,形成更大的簇<sup>[12]</sup>。协作通信实际是使具有单天线的节点按照一定的方式来共享彼此的天线,产生一个虚拟 MIMO 系统,从而获得分集增益。实现物理层协作的方法有分布式波束成形、协作分集等。由于节点采用协作机制时,网络的连通性与网络层的合作伙伴选择机制及合作方式密切相关,因此很难给出网络连通概率的闭型公式。本文仅通过仿真来测试协作通信对连通性的影响。采用非相干功率合成技术(如分布式频移键控)来实现简单的协作,这种方法复杂性较低,但对网络连通性能的提高程度仍十分可观。

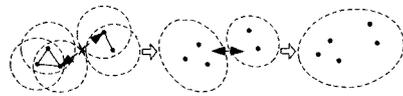


图 1 协作通信示意图

在非相干功率合成的协作通信中,如果簇  $\Omega$  中的节点均以发射功率  $P_t$  与簇外节点  $j$  协作通信,那么节点  $j$  处的接收功率为  $P_t \sum_{i \in \Omega} r_{ij}^{-\alpha}$ , 其中  $r_{ij}$  是节点  $j$  与簇  $\Omega$  内节点  $i$  的距离。当且仅当  $P_t \sum_{i \in \Omega} r_{ij}^{-\alpha} \geq P_{th}$  时,簇  $\Omega$  可以与节点  $j$  通信,形成一个新簇。本文讨论的协作通信仅限于一次协作,即产生的新簇不再进一步协作纳入新的节点。

## 5 仿真评价

为验证第2节和第3节的理论,我们构造无线多跳网络进行连通性测试。仿真中以齐次泊松过程在一方形区域A内部署节点。所有节点具有相同的发射功率,一旦部署不再移动,通信间就不产生干扰。为消除边界效应,仿真中采用折回距离(wrap-around distance)模型而非传统的欧氏距离模型,即区域A边界的点与对边边界的点相邻。最终的仿真值是通过产生1000组不同拓扑结构的网络计算指标平均值得到的。仿真参数在表1中列出。

表1 仿真参数

图	参数 发射功率 $P_t$ (mW)	常数 K	接收阈值 $P_{th}$ (mW)	衰减指数 $\alpha$	阴影方差 $\sigma$	区域面积 $ A $ (m <sup>2</sup> )
图2	1	10	0.1	3.8	0,2,4	10000,40000
图3	1	10	0.1	1.5,2,	0	10000
图4	10	10	0.1	3.8	2,3	10000
图5(a)	1	10	0.1	2,2.5,3,	0	10000
图5(b)	1	10	0.1	2.2.5,3,	2	10000
				3.5,4		

图2显示了不同阴影方差下,节点孤立概率随节点密度增大的变化规律。分别模拟了自由空间信道( $\sigma=0$ )、阴影衰落信道和阴影-瑞利衰落叠加信道下的情况。对应地验证了定理1、定理2和定理3的内容。从图2可以看出,理论曲线与仿真值吻合较好。仿真值和定理2都验证了相同密度下, $\sigma$ 增大能使网络中节点孤立的概率减小。这是由于 $\sigma$ 的增大使得节点间连通与距离的关系削弱,在一定程度上增大了长链路连通的概率。值得一提的是当 $\sigma=4$ 时,仿真区域面积若仍取10000m<sup>2</sup>,则会低估网络连通性能,因而取较大值40000m<sup>2</sup>才能使仿真值与理论值相符。

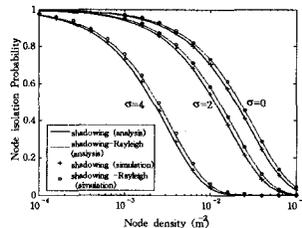


图2 阴影衰落信道和阴影-瑞利衰落叠加信道下,节点孤立概率 vs. 节点密度、理论值与仿真值的比较

瑞利衰落对网络连通性能的影响由衰减指数 $\alpha$ 决定。如图3所示,当 $\alpha < 2$ 时,瑞利衰落能减小节点孤立点概率,对网络连通性有正面作用;而当 $\alpha > 2$ 时,瑞利衰落对连通性的影响则是负面的; $\alpha = 2$ 时几乎没有影响。这种关系由式(11)就可以清楚直观地看出,瑞利衰落的影响主要取决于式(11)中的 $\frac{2}{\alpha} \Gamma(\frac{2}{\alpha})$ 项。在图2中由于 $\alpha = 3.8$ ,因此阴影-瑞利衰落叠加对连通性的影响相对只有阴影衰落的情况都是负面的。

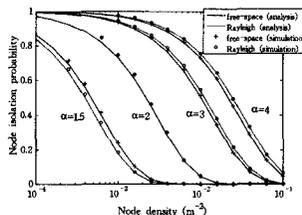


图3 自由空间信道和瑞利衰落信道下,节点孤立概率 vs. 节点密度、理论值与仿真值的比较

图4显示了阴影衰落信道下,网络无孤立概率和1-连通概率随节点密度的变化。无孤立点概率的仿真值与通过式(3)求得的理论值基本吻合。并且,无孤立节点的概率 $P(NI)$ 总是1-连通概率 $P(C)$ 上界。随着节点密度的增大,它们之间的差距越来越小,并最终都收敛于1。这个结果与第2节的分析相符,用临界密度表示即为:

$$\rho(P(C)=p) = \rho(P(NI)=p) + \delta, \delta > 0. \text{ As } p \rightarrow 1, \delta \rightarrow 0$$

从图4还可发现连通概率的增大过程在节点密度的一个较窄的区间呈现突变,使网络发生从不连通到连通的“相变”。这个现象符合利用连续渗流理论<sup>[11]</sup>的分析结果,即当节点密度大于某一阈值时,网络中几乎肯定可以出现一个无限大的连通块;而节点密度小于该阈值时,则几乎不可能出现。在文献<sup>[12]</sup>中证明,图G的任何单调特性都存在这样的相变。相变点可以作为网络有效运作的临界操作点,因为在临界点以后,网络连通性能增益已达到饱和,即使投入再多资源,也不可能再获得更大的提升。

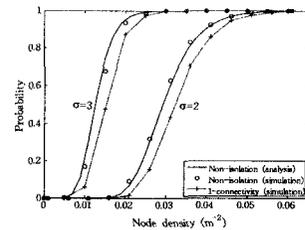


图4 阴影衰落信道下,无孤立点概率和1-连通概率 vs. 节点密度、理论值与仿真值的比较

协作通信对连通性的作用在图5中显示。显然,协作通信能降低节点孤立的概率,即提高网络连通性。随着节点密度增大,协作通信与非协作的效果几乎一致,这是由于密集部署的网络中节点本身已相距不远,无需协作通信就能获得很好的连通性能。值得一提的是,确定性信道下,随着 $\alpha$ 值的增大,协作与非协作通信下网络连通性之间的差距越来越小,即协作通信带来的性能增益逐渐减小。由此可以推知,协作通信的对网络连通性的提高作用很大程度上还依赖于衰减指数这一外部因素的大小。若衰减指数很大,协作通信也不能发挥较大作用。在阴影衰落信道下,同样存在类似的情况,但是与自由空间信道相比,相同环境参数下,协作带来的增益要大很多。

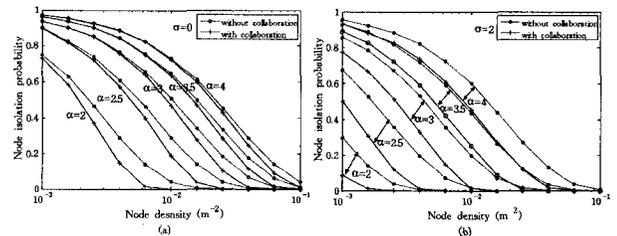


图5 非协作与协作通信下的节点孤立概率 vs. 节点密度

**结束语** 基于齐次泊松过程的节点分布模型,本文首先推导了网络无孤立点概率,并作为网络1-连通概率的上界。然后在不同的衰落信道模型下分析了节点孤立概率,用来计算无孤立点概率,特别研究了阴影衰落和瑞利衰落模型的某些参数对连通性的影响。研究发现阴影方差能增加链路连通的随机性,而瑞利衰落对连通性的作用取决于环境衰减指数

(下转第119页)

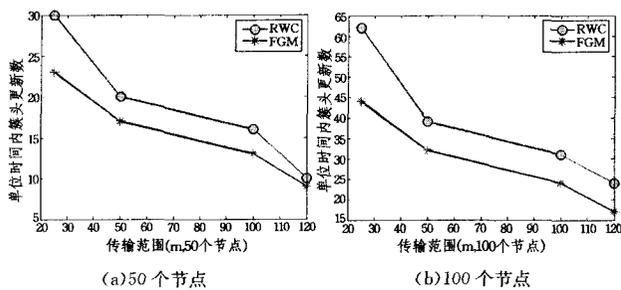


图4 单位时间内簇头更新数(最大速度 20m/s)

由图3和图4可以看出,本文提出的FGM算法较RWC算法在MANET分层稳定性方面有较大改善,是一种稳定性较高、鲁棒性强的MANET分层算法。

**结束语** 基于分簇算法的分层式结构有利于提高大规模MANET的性能。提出了基于多特征融合及GRF-MAP的节点稳定度分布式簇生成算法,给节点赋予不同的稳定度并自动成簇。该算法在参数选择及分簇维护方面比RWC算法考虑得更为合理和全面,限制了分簇的成员节点数,达到了负载均衡的目的,同时降低了簇依附关系改变的机率,减少了簇重构带来的开销。仿真结果表明,FGM算法得到了比RWC算法性能更优、鲁棒性更强的网络结构。

### 参考文献

[1] Xu Yi. Topology Stability Analysis and Its Application in Hierarchical Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1546-1560

[2] 刘鸿飞,黄席樾,李丽君,等. 车用自组织网络分层优化策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 12(7): 119-124

[3] Er I I, Seah W K G. Performance analysis of mobility-based d-hop (MobDHop) clustering algorithm for mobile ad hoc networks [J]. Elsevier Computer Networks, 2006, 50: 3375-3399

[4] Basu P, Khan N, Little T D C. Mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks [C]//Proceedings of 21st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS' 01). Phoenix, AZ: IEEE Computer Society,

2001: 413-418

[5] Chatterjee M, Das S K, Turgut D. WCA: A Weighted Clustering Algorithm(WCA) for mobile ad hoc networks[J]. Cluster Computing, 2002, 5: 193-204

[6] Er I I, Seah W K G. Mobility-based d-Hop Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks [J]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2004, 4: 2359-2364

[7] Francis S A J, Rajasingh E B. Relative Weight Based Clustering in Mobile Ad Hoc Networks[C]//11th International Conference on Computer Modelling and Simulation. IEEE Computer Society, 2009: 526-531

[8] Zhang Yan, Ng J M, Low C P. A distributed group mobility adaptive clustering algorithm for mobile ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2009(32): 189-202

[9] Torkestani J A, Meybodi M R. An efficient cluster-based CDMA/TDMA scheme for wireless mobile ad-hoc networks: A learning automata approach[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010(33): 477-490

[10] Doyle L E, Kokaram A C, Doyle S J, et al. Ad Hoc Networking, Markov Random Fields, and Decision Making--The challenges involved [J]. IEEE Signal Processing Magazine, September, 2006, 23(5): 63-73

[11] West D B. 图论导引[M]. 李建中, 骆吉州, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006

[12] Li S Z. Markov Random Field Modeling in Image Analysis (Third Edition)[M]. Springer-Verlag London Limited, 2009

[13] 孙即祥, 等. 现代模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 53-59

[14] 魏宗舒, 等. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 209-211

[15] Dsai M, Manjunath D. On the connectivity in finite ad hoc networks[J]. IEEE Communication Letter, 2002: 437-439

[16] Yousefi S, Altmaiv E, El-Azouzi R, et al. Connectivity in vehicular ad hoc networks in presence wireless mobile base-stations [C]//7th International Conference on ITS Telecommunication. 2007: 4548-4552

(上接第96页)

的大小。此外,协作通信对于网络连通性能有提高作用。存在节点周期性休眠的无线网络的连通问题将作为进一步的研究内容。

### 参考文献

[1] Gupta P, Kumar P R. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks [J]. Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications, 1998: 547-566

[2] Xue F, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks [J]. Wireless Networks, 2004, 10(2): 169-181

[3] 周一鹿, 钟剑, 刘林森. 自组织网中节点分布对网络连通度的影响分析[J]. 计算机科学, 2006, 33(12): 49-51

[4] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low-power wireless links [C] //Proc. of IEEE SECON 2005. Santa Clara: IEEE Communication Society, 2005: 517-526

[5] Bettstetter C, Hartmann C. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment [J]. Wireless Net-

works, 2005, 11(5): 571-579

[6] Hekmat R, Van Mieghem P. Connectivity in wireless ad-hoc networks with a log-normal radio model [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11: 351-360

[7] Miorandi D, Altman E, Alfano G. The impact of channel randomness on coverage and connectivity of ad hoc and sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(3): 1062-1072

[8] Theodore S. Rappaport. Wireless communications; principles and practice(second edition) [M]. Prentice Hall, 2002

[9] 刘丰威. 无线 ad hoc 网络的连通性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007

[10] Ingmar G, Wolfram K, Rudolf S. Continuum percolation of wireless ad hoc communication networks [J]. Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 325(3/4): 577-600

[11] Bollobás B. Random graphs [M]. Cambridge Press, 2001

[12] Wang L, Liu B, Goechel D, et al. Connectivity in cooperative wireless ad hoc networks [C]//Proc. of ACM MobiHoc 2008. Hong Kong: ACM, 2008