

# 具有保护区域的无线Ad-hoc网络传输性能研究

唐菁敏<sup>1</sup>, 倪晨泉<sup>1</sup>, 杨孟<sup>1</sup>, 陈昌海<sup>2</sup>, 赵坤<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650000; 2. 四川工程职业技术学院电气信息工程系 四川 德阳 618000)

**【摘要】**对现有抑制网络中干扰信号强度的方法进行了研究, 针对抑制干扰的同时也限制了网络的传输容量的问题, 提出在无线Ad-hoc网络中设置保护区域来抑制干扰, 并推导了最优保护区域的半径。理论分析和仿真结果表明, 设置保护区域能够极大程度降低网络中的干扰信号强度, 合理地设置保护区域大小能有效提高传输容量, 并且保护区域半径存在一个最优值, 能使得网络的传输容量达到最大值。

**关键词** 无线自组网; 干扰抑制; 最优保护半径; 传输容量

中图分类号 TN911.22

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.04.008

## Research on Transmission Performance of Wireless Ad-hoc Networks with Guard Zone

TANG Jing-min<sup>1</sup>, NI Chen-quan<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>1</sup>, CHEN Chang-hai<sup>2</sup>, and ZHAO Kun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology Kunming 650000;

2. Department of Electric and Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College Deyang Sichuan 618000)

**Abstract** The existing methods for suppressing the strength of interference signals in the networks can suppress interference signals effectively but they cause a limit to the transmission capacity of the networks at the same time. To solve this problem, a method of setting guard zone in wireless Ad-hoc network is proposed to suppress interference and the optimum radius of guard zone is derived. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method could greatly reduce the level of interference signal and reasonable radius of guard zone could increase the transmission capacity. The transmission capacity will reach maximum due to an optimum radius of guard zone.

**Key words** Ad-hoc Networks; interference suppression; optimum guard radius; transmission capacity

无线Ad-hoc网络容量是网络信息论中研究的一个热点问题。文献[1]首次把无线Ad-hoc网络容量与传输距离联系在一起, 给出了传送容量(transport capacity)这一定义。此后关于无线Ad-hoc网络传送容量的研究得到了迅速的发展, 并出现了一些有代表性的研究成果<sup>[2-4]</sup>。使用文献[1]的经典分析方法只能得到传送容量与网络参数之间的数量级对应关系, 而无法给出准确的结果。为了解决这个问题, 近年来, 人们开始应用随机几何理论对无线Ad-hoc网络进行建模, 并根据新的网络模型提出了无线Ad-hoc网络容量的一种新定义, 即传输容量(transmission capacity)。传输容量被定义为网络中单位面积上能够达到接收机(receiver, RX)信干比(signal-to-interference ratio, SIR)门限的成功通信数量。而在一般情况下, 很难得出传输容量的闭合表达式, 因

此只能通过某种方式求得传输容量的取值范围。文献[4]给出了一般情况下的传输容量上下界, 研究结果表明传输容量的上界比下界更加靠近仿真值。文献[5]在Ad-hoc网络中考虑了信道反馈信息, 并给出了信道容量的上下界表达式。文献[6]在Ad-hoc网络中考虑了数据包重发机制, 从而来改善信道容量。文献[7]给出了信道容量的上界闭合表达式, 且通过仿真证明上界与仿真值相符。

无线Ad-hoc网络中的任意发送机(transmitter, TX)可以使用同一频率与其他TX同时通信, 这就造成了彼此的互相干扰。对于任意RX, 除了与其相对应的TX外, 网络中其他的TX都是该RX的干扰源。由于无线Ad-hoc网络的网络容量与网络中的干扰信号强度密切相关, 因此如何控制网络中的干扰一直是人们十分关心的一个问题。文献[8]假设存在一种

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(41364002); 云南省科技厅面上项目(KKS0201303017, KKS0201303009); 云南省人培项目(KKSY201203029)

作者简介: 唐菁敏(1979-), 男, 博士, 主要从事Ad-hoc网络、认知无线电技术、干扰消除等方面的研究。

完美的干扰消除技术,并研究了该情况下的无线Ad-hoc网络传输容量。文献[9]的研究表明,网络中任意RX处的干扰主要由距离与其较近的干扰TX产生。

为了能够有效地降低干扰信号强度,本文在无线Ad-hoc网络的模型中设置保护区域,在所有的RX周围都设置一个保护区域,在此区域内不允许任何干扰源传输数据,这样就能够极大地降低RX处的干扰信号强度。本文主要研究了具有保护区域时的无线Ad-hoc网络的传输容量,并通过严格的数学推导得出了使传输容量最大时的最佳保护半径。

## 1 系统模型

在一个无线Ad-hoc网络的二维平面上,同一时刻使用相同的通信频率的TX的位置服从密度为 $\lambda_0$ 的泊松点过程<sup>[10]</sup>(poisson point process, PPP)( $\Pi_0$ ),也就是说,在一个半径为 $a$ 的圆形区域内出现 $k$ 个TX的概率为:

$$\Pr = \frac{(\lambda\pi a^2)^k}{k!} e^{-\lambda\pi a^2} \quad (1)$$

如图1所示,在二维坐标原点处放置一个接收节点RX,假设网络中任意TX都有唯一一个目标RX( $\notin \Pi_0$ )与之相对应,则该RX与其对应的TX的编号记为 $0(0 \in \Pi_0)$ ,构成一个通信对。由于泊松点过程具有平稳的特性,所以所有RX的中断概率的统计特性一致。在此网络中,除了编号一致的TX发送的是有用信号外,RX接收到的其他编号TX信号都被认为是干扰信号。

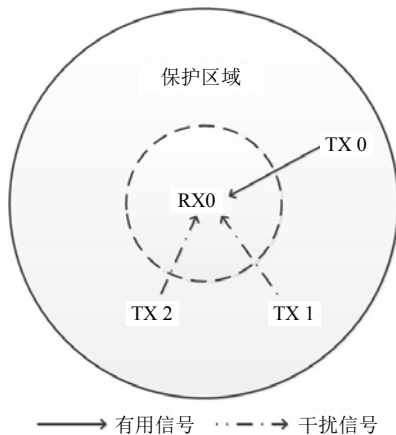


图1 Ad-hoc系统模型

设保护区域是以RX为圆心,半径为 $d$ 的圆形区域,在该区域内的干扰TX都将保持静默,不发送信号。为了降低分析复杂度,假设不同RX的保护区域没有交点,TX的密度为 $\lambda_0$ ,因为保护区域的存在,部分TX将会停止发送数据,最终的TX密度为:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp(-\lambda_0 \pi d^2) & 0 \leq d < a \\ 0 & d = a \end{cases} \quad (2)$$

这部分最终发送数据的TX将重新构成一个密度为 $\lambda$ 的PPP。

使用文献[4]的经典模型,本文的传输模型如下: $P_i$ 为TX $i$ 的发送功率; $\alpha$ ( $\alpha > 2$ )为路径衰减系数; $X_i$ 为TX $i$ 和RX $0$ 之间的距离; $H_{i0}$ 为TX $i$ 与RX $0$ 之间的功率衰落系数,则在RX $0$ 处接收到的总的干扰信号功率为 $\sum_{i \in \Pi} P_i H_{i0} X_i^{-\alpha}$ 。为了降低分析难度,本文假设任意TX $i$ 与RX $i$ 之间的传输距离是固定值 $R$ ,所有TX使用相同的发送功率 $P_i$ ,信道衰落假设是瑞利衰落,因此功率衰落系数服从指数分布,即:

$$f_{\tau}(x) = \tau \exp(-\tau x) \quad x \geq 0 \quad (3)$$

式中, $\tau$ 为指数分布参数。如果在RX $0$ 处的SIR不低于门限值 $\beta$ 就可以认为能够成功实现信号的传输,即网络的中断概率<sup>[5]</sup>为:

$$q(\lambda) = \Pr \left( \frac{H_{00} R^{-\alpha}}{\sum_{i \in \Pi} H_{i0} X_i^{-\alpha}} < \beta \right) \quad (4)$$

目前无线Ad-hoc网络的传输容量网络定义为达到通信最大中断概率时单位面积上成功传输的通信数量。假设当网络的最大中断概率为 $\varepsilon$ 时,通过对 $q(\lambda) = \varepsilon$ 求解,可得TX最大分布密度 $\lambda_c$ ,则传输容量<sup>[5]</sup>表示为:

$$C(\varepsilon) = \lambda_c (1 - \varepsilon) \quad \varepsilon \in (0,1) \quad (5)$$

## 2 最优保护半径

网络的中断概率表达式(4)可重写为:

$$q(\lambda) = \Pr(H_{00} < \beta R^{\alpha} I_{\Pi}) \quad (6)$$

其中,

$$I_{\Pi} = \sum_{i \in \Pi} H_{i0} X_i^{-\alpha} \quad (7)$$

因为功率衰减因子 $H_{ij}$ 服从参数为 $\tau$ 的指数分布,则式(6)可以转变为:

$$\begin{aligned} q(\lambda) &= E \left[ \int_0^{\beta R^{\alpha} I_{\Pi}} \tau \exp(-\tau x) dx \right] = \\ &= 1 - E[\exp(-\tau \beta R^{\alpha} I_{\Pi})] = \\ &= 1 - \mathcal{L}_{I_{\Pi}}(\tau \beta R^{\alpha}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\mathcal{L}_{I_{\Pi}}(*)$ 是总干扰信号 $I_{\Pi}$ 的概率密度函数(probability density function, PDF)的拉普拉斯变换。

**定理 1** 在设置了保护区域的无线Ad-hoc网络中,在RX $0$ 处的总干扰信号 $I_{\Pi} = \sum_{i \in \Pi} H_{i0} X_i^{-\alpha}$ 的概率密度函数的拉普拉斯变换为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{in}}}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda \int_d^\infty \frac{sx^{-\alpha+1}}{sx^{-\alpha} + \mu} dx\right) \quad (9)$$

证明:

**定义** 假设以RX0为圆心,  $a$ 为半径的圆形区域为可接收信号区域, 保护区域为以RX0为圆心、 $d$ 为半径的圆形区域时, 用 $\mathcal{L}_{I_{\text{in},a}}(s)$ 表示此时RX0处总干扰信号 $I_{\text{in}}$ 的PDF的拉普拉斯变换, 则 $\mathcal{L}_{I_{\text{in}}}(s) = \mathcal{L}_{I_{\text{in},a}}(s)$ 。

由于保护区域内的干扰源TX不发送信号, 则对RX 0产生干扰的TX只存在于内环半径为 $d$ 外环半径为 $a$ 的环形区域内, 假设该区域存在 $K$ 个干扰TX, 并且由于干扰节点是随机分布的, 则任意干扰节点TX $i$ 与RX的距离 $X_i$ 的PDF为 $f_{X_i}(r) = \frac{2r}{a^2 - d^2}$ , 则:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{in},a|K}}(s) = \left\{ \frac{1}{\pi(a^2 - d^2)} \int_d^a 2\pi x E_{\text{H}}[\exp(-sH_{i0}x^{-\alpha})] dx \right\}^K \quad (10)$$

式中,  $E_{\text{H}}(*)$ 表示对功率衰减因子求期望。由式(1)和式(10)可以得到:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{in},a}}(s) = \exp\left\{ \frac{a^2}{a^2 - d^2} 2\pi\lambda \times \int_d^a x \{E_{\text{H}}[\exp(-sH_{i0}x^{-\alpha})] - 1\} dx \right\} \quad (11)$$

当 $a \rightarrow \infty$ 时,  $\mathcal{L}_{I_{\text{in}}}(s) = \mathcal{L}_{I_{\text{in},a}}(s)$ , 则:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{in}}}(s) = \exp\left\{ 2\pi\lambda \int_d^\infty x \{E_{\text{H}}[\exp(-sH_{i0}x^{-\alpha})] - 1\} dx \right\} \quad (12)$$

使用式(3), 则:

$$E_{\text{H}}[\exp(-sH_{i0}x^{-\alpha})] = \frac{\tau}{sx^{-\alpha} + \tau} \quad (13)$$

把式(13)代入式(12)可得:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{in}}}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda \int_d^\infty \frac{sx^{-\alpha+1}}{sx^{-\alpha} + \tau} dx\right) \quad (14)$$

将式(9)代入式(8)可得:

$$q(\lambda) = 1 - \exp\left(-2\pi\lambda \int_d^\infty \frac{x^{-\alpha+1}}{x^{-\alpha} + \beta^{-1}R^{-\alpha}} dx\right) \quad (15)$$

网络的中断概率式(15)还存在一个积分, 在多数情况下要得出其闭合表达式较为困难, 无法得到中断概率和传输容量的闭合表达式。

在无线Ad-hoc网络中, 设置多大保护区域能够最大限度地降低网络中的干扰强度, 提高传输容量是本节的重点, 下面对最优保护半径进行研究。

**定理 2** 当 $\beta^{-1}R^{-\alpha} \ll 1$ , 最大中断概率为 $\varepsilon$ 时,

设置了保护区域的无线Ad-hoc网络最优保护半径为:

$$d_\varepsilon = \sqrt{\frac{\frac{2}{\alpha} \beta^{\frac{2}{\alpha}} R^2 \pi \csc\left(\frac{2}{\alpha} \pi\right)}{1 - e \ln(1 - \varepsilon)}} \quad (16)$$

此时的传输容量为:

$$C(\varepsilon) = \frac{1 - e \ln(1 - \varepsilon)}{\gamma e \beta^\gamma R^2 \pi^2} (1 - \varepsilon) \sin(\gamma \pi) \quad (17)$$

证明:

根据式(15)对 $q(\lambda) = \varepsilon$ 求解, 可得TX最大分布密度为:

$$\lambda_\varepsilon = \frac{-\ln(1 - \varepsilon)}{2\pi \int_d^\infty \frac{x^{-\alpha+1}}{x^{-\alpha} + \beta^{-1}R^{-\alpha}} dx} \quad (18)$$

由式(18)可见, 最大TX密度 $\lambda_\varepsilon$ 随保护区域半径 $d$ 增加而增大, 同时对应于固定最大中断概率 $\varepsilon$ 的传输容量也随之增大。事实上并不是保护区域半径 $d$ 越大则传输容量越大, 由式(2)可知, 最大TX密度 $\lambda_\varepsilon$ 与节点密度 $\lambda_0$ 存在一定的关系, 即:

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_0 \exp(-\lambda_0 \pi d^2) \quad (19)$$

令 $\frac{\partial \lambda_\varepsilon}{\partial \lambda_0} = 0$ 并求解, 可知 $\lambda_0 = \frac{1}{\pi d^2}$ , 将该结果代入

式(19), 可得 $\lambda_\varepsilon \leq \frac{1}{\pi d^2}$ 。将该结果 $\lambda_\varepsilon$ 代入式(19), 最大TX密度 $\lambda_\varepsilon$ 的表达式应该写成如下形式:

$$\begin{cases} \lambda_\varepsilon = \frac{-\ln(1 - \varepsilon)}{2\pi \int_d^\infty \frac{x^{-\alpha+1}}{x^{-\alpha} + \beta^{-1}R^{-\alpha}} dx} \\ \lambda_\varepsilon \leq \frac{1}{\pi d^2} \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20)可知, 保护区域半径 $d$ 存在一个最优值, 能获得最大的传输容量, 即:

$$\frac{-\ln(1 - \varepsilon)}{2\pi \int_d^\infty \frac{x^{-\alpha+1}}{x^{-\alpha} + \beta^{-1}R^{-\alpha}} dx} = \frac{1}{\pi d^2} \quad (21)$$

此时得出的保护区域半径 $d$ 为最优解。综上所述, 在确定的最大中断概率 $\varepsilon$ 条件下, 存在最优保护半径 $d_\varepsilon$ 能够使得TX密度 $\lambda_\varepsilon$ 最大, 通过对式(21)求解, 可得:

$$d^2 = k \left[ \frac{1}{\alpha} \beta^{\frac{2}{\alpha}} R^2 \pi \csc\left(\frac{2}{\alpha} \pi\right) - \int_0^d \frac{x^{-\alpha+1}}{x^{-\alpha} + \beta^{-1}R^{-\alpha}} dx \right] \quad (22)$$

式中,  $k = \frac{-2}{e \ln(1 - \varepsilon)}$ 。如果 $\beta^{-1}R^{-\alpha} \ll 1$ , 则式(22)可以近似为:

$$d^2 \cong k \left[ \frac{1}{\alpha} \beta^{\frac{2}{\alpha}} R^2 \pi \csc\left(\frac{2}{\alpha} \pi\right) - \frac{d^2}{2} \right] \quad (23)$$

对式(23)进行求解, 最优保护半径为:

$$d_\varepsilon = \sqrt{\frac{\frac{2}{\alpha} \beta^\alpha R^2 \pi \csc\left(\frac{2}{\alpha} \pi\right)}{1 - e \ln(1 - \varepsilon)}} \quad (24)$$

根据式(20), 当  $d$  为最优保护区域半径  $d_\varepsilon$  时, 根据传输容量的定义可得到此时的传输容量为:

$$C(\varepsilon) = \frac{1 - e \ln(1 - \varepsilon)}{\alpha} (1 - \varepsilon) \sin\left(\frac{2}{\alpha} \pi\right) \quad (25)$$

### 3 仿真与数学结果分析

仿真参数设置为:  $R = 10 \text{ m}$ ,  $\beta = 3$ ,  $\alpha = 4$ 。根据仿真参数的设置, 此时  $\beta^{-1} R^{-\alpha} = 1/30\,000 \ll 1$ , 则可使用定理2的结论。存在最优保护区域半径和无保护半径时的传输容量曲线对比图如图2所示, 图中给出了理论值和仿真值的对比曲线。由图可见: 1) 理论曲线和仿真曲线较吻合, 由此验证了理论推导的正确性。2) 前期随着最大中断概率的增加, 传输容量也随之增大, 但当最大中断概率达到某一个值时, 传输容量陡然下降, 这是因为传输容量是由最大TX密度和成功通信概率的乘积决定的(参见式(5)), 当最大中断概率较小时, 此时网络中的TX密度较小, 干扰较小, 中断概率的增大意味着网络中的最大TX密度增大, 且由于干扰较小的缘故导致TX密度增加的速度远高于成功通信概率减小的速度, 最终结果是: 随着最大中断概率的增大, 传输容量不断增大; 当中断概率较大时, 尤其是接近于1时, 此时网络中的干扰信号功率已经很大了, 再增大最大中断概率并不能够使得最大TX密度得到显著提升, 反而会显著降低通信成功概率, 使得传输容量变小, 极端情况时, 当最大中断概率为1时, 成功通信概率为0, 传输容量为0。图中之所以会出现曲线陡然归零的情况, 是因为图中的横坐标中断概率使用了指数形式。3) 最优保护区域半径的传输容量远优于无保护区域时的传输容量。无线Ad-hoc网络是干扰受限系统, 决定网络容量大小的是网络中的整体干扰强度, 具体到一个通信对时, 该通信能否成功关键取决于距离RX节点最近的几个干扰信号的强度。设置了保护区域后, 保护区域内RX节点处的大功率干扰信号得到了抑制, RX节点处的通信成功概率得到提升, 在最大中断概率相同时, 网络可以容纳的最大TX密度增大, 最终导致传输容量得到提高。由以上分析可知, 保护区域传输容量的提升是以抑制保护区域内

大功率干扰信号的发射为代价的, 这些取消发送信号的节点可以在下一个时隙到来时再发送信号, 而保护区域的作用是把干扰严重的一些节点通过分散到不同时隙发送信号的方式来提高通信成功概率。传输容量的研究目标是单跳时的网络容量, 对于从起始节点到目标节点的网络容量是否能得到提高还不可知, 需要后续进一步深入的研究。

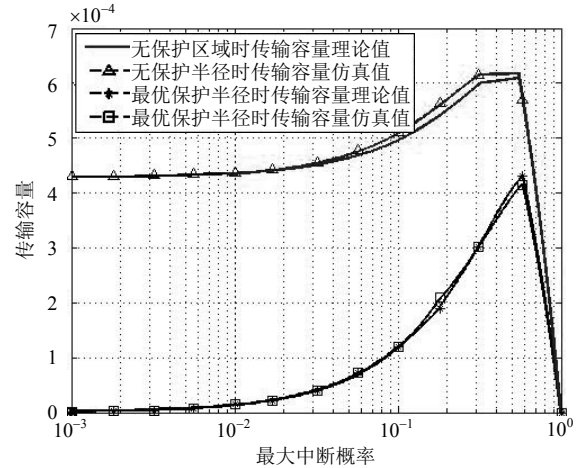


图2 最优保护半径传输容量曲线图

最优保护区域半径与最大中断概率  $\varepsilon$  的关系曲线, 如图3所示, 随着最大中断概率  $\varepsilon$  的增加, 最优保护区域半径减小, 相比无保护区域的网络, 在设置保护区域的网络中相同数量干扰源TX能够造成的干扰强度减小。

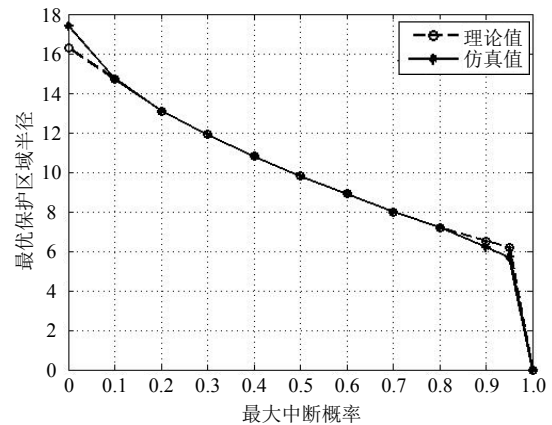


图3 最优保护区域半径与最大中断概率的关系曲线

综上所述, 在TX密度  $\lambda$  相同的条件下, 图后设置保护区域比无保护区域的网络能减小干扰强度, 增大了传输容量。而设置最优保护半径, 其传输性能更是远优于其他状态。

## 4 结束语

本文首先使用保护区域对无线Ad-hoc网络进行建模, 推导了网络中断概率和传输容量上下界, 研

究了保护区域对传输容量影响。结果表明, 保护区域的设置在降低网络中的干扰信号强度的同时也降低了网络中的可用通信面积。过小的保护区域对干扰信号强度的降低效果有限, 并不能够有效地提升网络的传输容量; 过大的保护区域半径将导致网络中的可用通信面积的严重减小, 最终反而会使传输容量下降。所以, 合理设置保护区域的半径的大小是使用保护区域的前提。最后, 通过对保护区域半径和传输容量的权衡, 得到了对应于最大传输容量时的最优保护区域半径。仿真结果表明, 设置保护区域能极大地抑制网络中的干扰信号强度, 降低中断概率; 合理地设置保护区域的大小能够提高传输容量; 而保护区域半径存在一个最优值, 能使得网络的传输容量达到最大值。

### 参 考 文 献

- [1] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000(46): 388-404.
- [2] HUNTER A M, ANDREWS J G, WEBER S. Transmission capacity of ad hoc networks with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5058-5071.
- [3] WEBER S P, ANDREWS J G, YANG Xiang-ying. Transmission capacity of wireless Ad-hoc networks with successive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(8): 2799-2814.
- [4] WEBER S P, YANG Xiang-ying, ANDREWS J G. Transmission capacity of wireless Ad-hoc networks with outage constraints[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4091-4102.
- [5] VAZE R, TRUONG K T, WEBER S. Two-way transmission capacity of wireless Ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(6): 1966-1975.
- [6] NARDELLI P H C, KAYNIA M, CARDIERI P, et al. Optimal transmission capacity of Ad-hoc networks with packet retransmissions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(8): 2760-2766.
- [7] AO W C, CHEN K C. Upper bound on broadcast transmission capacity of heterogeneous wireless Ad-hoc networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(11): 1172-1174.
- [8] HASAN A, ANDREWS J G. The guard zone in wireless Ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(3): 897-906.
- [9] BLOMER J, JINDAL N. Transmission capacity of wireless ad hoc networks: Successive interference cancellation vs. joint detection[C]//IEEE ICC 2009 Proceedings. American: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [10] LEE W H. Continuous and discrete properties of stochastic processes[D]. Nottingham: The University of Nottingham, 2010.

编 辑 张 俊