

基于移动模型的移动自组网干扰分布特征仿真研究^①

谭国平^② 朱燕丹 唐璐瑶 李岳衡

(河海大学计算机与信息学院 南京 211100)

摘 要 为了分析移动自组网络中的干扰情况,以改善网络的整体性能,引入了三个常见的移动模型——随机路点(RWP)移动模型、高斯-马尔可夫(GMS)模型和参考点组(RPG)移动模型,并采用基于泊松点过程(PPP)的节点空间干扰分布的理论统计几何方法研究了移动自组网络干扰特征,然后利用 NS-2 软件搭建了基于有冲突避免的载波监听多路访问(CSMA/CA)机制的干扰仿真平台,仿真分析了基于泊松点过程的和基于不同移动模型的干扰的累积分布函数(CDF)及概率密度函数(PDF)。研究发现无线信道间的干扰会极大地影响移动自组网的性能,而在接收节点处的干扰特征主要是由干扰发送节点的几何分布决定的;泊松点过程的干扰分布特征和随机路点移动模型较相似,但与其他两个移动模型存在很大差异。最后分析了存在差异的原因。

关键词 移动自组网,干扰分布,泊松点过程(PPP),移动模型,NS-2 仿真

0 引 言

移动自组网是一种分布式网络,它在没有网络基础设施的情况下能自行组织网络,不需要集中式控制,所以能很好地适应不同环境,抗毁能力较强,应用非常广泛。移动自组网通常采用分布式的随机接入技术,该技术对网络的整体性能有着重要的影响。特别需要注意的是,接入的随机性与分布式特性会使得同时调度的若干会话节点工作在同一频段,从而引发严重的同信道干扰问题,导致网络性能急剧下降。该问题促使许多学者研究在各种接入协议下的准确干扰模型,用以改善分布式随机接入协议的性能,从而提高网络的整体性能。本文主要从

文献[1]研究的全面干扰模型的子模型——干扰节点空间分布模型入手,从理论上分析终端节点按照典型的分布模型——泊松点过程(Poisson point process,PPP)分布时各个干扰节点对指定接收节点的累积干扰分布情况。同时考虑到理论上分析的节点分布模型都是随机分布且静止的,而实际情况下终端节点处在运动状态,必然与理论上分析的干扰存在差异,所以本文又引入了三个经典的移动模型:随机路点(random way-point, RWP)移动模型、高斯-马尔可夫(Gauss-Markov, GM)移动模型和参考点组(reference point group, RPG)移动模型。最后通过 NS-2 仿真平台分别对这三个移动模型和理论上的泊松点过程进行仿真,并对比分析其实验结果。

① 国家自然科学基金(61001068)和教育部博士点基金(20100094120017)资助项目。
② 男,1975年生,博士,副教授;研究方向:MANET,无线多媒体通信,随机网络优化与控制和网络信息论等;联系人,E-mail:gptan@hhu.edu.cn
(收稿日期:2014-03-18)

1 泊松点过程干扰的理论分析

泊松点过程的简单、易处理特性使其成为研究干扰的最经典的空间点过程,本文假设终端节点在空间二维平面上的分布服从泊松点过程。在文献[2]中,若终端节点在二维平面内服从泊松分布,那么在面积为 A 的区域范围内节点个数为 n 的概率公式如下:

$$P(N = n) = \frac{(\lambda A)^n}{n!} \exp(-\lambda A) \quad (1)$$

其中 N 表示区域中节点的个数, λ 表示泊松点过程的密度。

本文从随机分布的终端节点入手,采用统计几何的方法,利用一个函数来模拟一个指定接收节点处检测到的累积干扰功率值,这个函数与干扰节点到接收节点的位置距离相关,并且假设每个干扰节点对接收节点的干扰功率值互不相关,也就是所阐述的累积干扰功率可以模拟为各个冲激噪声的叠加^[3]。

假设在一维情况下,一个无记忆的线性滤波器的随机脉冲响应函数为 $f(k, t)$, k 表示一个随机变量,即此脉冲响应是随机的。我们假设在时隙 $\{t_j\}$ 时,这个线性滤波器的输入是一个一维的密度为 λ 的泊松点过程,则此线性滤波器的输出 $I(t)$ 为

$$I(t) = \sum_j f(k_j, t - t_j) \quad (2)$$

式中, $\{k_j\}$ 是一个随机序列,它的值来源于一个常见的分布函数并独立于 $\{t_j\}$ 。这个线型滤波器的输出 $I(t)$ 就是基于密度为 λ 的泊松点过程的冲激噪声。

实际情况下,为了模拟无线网络中的干扰分布特征,必须考虑二维或更高维的点过程情况。在文献[4]中,上述讨论的一维泊松点过程的情况用来模拟发送端到接收端的干扰信号的路径损耗,假设发送端到接收端的距离为 r ,路径损耗指数为 η ,则此线性滤波器的脉冲响应函数为

$$f(k, r) = kr^{-\eta} \quad (3)$$

则基于泊松点过程(PPP)的干扰模型可以表示为

$$I = \sum_{i \in \Phi_{\text{PPP}}} k_i r_i^{-\eta} \quad (4)$$

式中, Φ_{PPP} 表示二维泊松点过程, i 表示点过程中的某一干扰节点, k_i 为一个随机变量,表示传播信道对第 i 个节点的其它影响总和。在本仿真中我们假设信道传播只有确定性路径损耗,因此 $k_i = 1$ 。由文献[5]可以得到,在 $\eta = 4$ 时,累积分布函数(cumulative distribution functions, CDF)存在闭合形式,可表示为

$$F_{I_{\Phi_{\text{PPP}}}}(w) = P(I_{\Phi_{\text{PPP}}} \leq w) = L^{-1} \left\{ \frac{\exp[-\lambda_{\text{PPP-eff}}(s)^{\frac{1}{2}} K(4)]}{s} \right\} = \text{erfc} \left(\frac{\lambda_{\text{PPP-eff}} \pi^2}{4 \sqrt{w}} \right) \quad (5)$$

式中 $\text{erfc}(x)$ 为互补误差函数,它的定义表示式为

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad [6]。$$

2 移动模型

由于上面所述的是采用泊松点过程(PPP)来模拟终端节点在二维空间上的位置分布,从而统计累积干扰分布情况,它在默认情况下是静止的,位置是不动的。而在实际情况下端是一直处于不断移动状态的,所以本研究又引入三种常见的移动模型来模拟终端节点的移动情况,它们是随机路点(RWP)移动模型、高斯-马尔可夫(GM)移动模型和参考点组(RPG)移动模型。

移动模型一般可以用来描述节点的移动方式,如网络中的节点或用户随着时间的变化,它们的位置、速度及加速度等在一定程度上会发生变化,网络的整体行为和性能也可能发生变化。不同的移动模型对应网络中不同的拓扑结构,对系统仿真结果有直接的影响。移动模型可以分为随机移动模型,具有时间、空间依赖性的移动模型,受地理位置约束的移动模型等,而本文主要研究最常见的几个移动模型。

2.1 随机路点 (RWP) 移动模型

随机路点移动模型是由 Maltz 和 Johnson 在文献[7]中首先提出的。由于它的结构简单,容易实现,因而被当作最基础的研究模型。在该模型中,各个节点在一块仿真区域内随机地选择一个位置作为目的地址,然后从它原来的位置匀速运动到这个目的位置,其速率 v 在 $[v_{\min}, v_{\max}]$ ($v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别是节点移动的最小、最大速率)中随机选择,节点的速率和方向的选取独立于其它节点。到达目的地后节点暂停一段时间,然后又以另一个速度朝着重新选择的新的目的地址移动,节点暂停的时间可以用“ t_{pause} ”来表示, $t_{\text{pause}} \in [t_{\min}, t_{\max}]$,然后再停一段时间,这样一直反复整个过程直到仿真结束。在此模型中, $v_{\max}$ 和 t_{pause} 两个参数决定了节点的运动轨迹,当 $v_{\max}$ 较小, t_{pause} 较大时,移动自组网的拓扑形式相对稳定,相反, $v_{\max}$ 较大, t_{pause} 较小时,网络拓扑结构会频繁变化。

2.2 高斯 - 马尔可夫 (GM) 移动模型

在高斯 - 马尔可夫移动模型中,移动节点当下的运动方向和速度会受到前一时刻的运动状态的影响,节点的时间与速度存在相关性。在此模型中,节点在 t 时刻的运动状态可以由节点在 $t-1$ 时刻运动的速度值、方向值和一个随机变量进行计算得到。具体计算方法如下^[8]:

$$v_t^x = \alpha v_{t-1}^x + (1 - \alpha)v^x + \sigma^x \sqrt{1 - \alpha^2} w_{t-1}^x \quad (6)$$

$$v_t^y = \alpha v_{t-1}^y + (1 - \alpha)v^y + \sigma^y \sqrt{1 - \alpha^2} w_{t-1}^y \quad (7)$$

上式中, (v_t^x, v_t^y) 和 (v_{t-1}^x, v_{t-1}^y) 分别表示节点在 t 和 $t-1$ 时刻的速度矢量; v^x 和 v^y 分别表示当 $n \rightarrow \infty$ 时速度的平均值; (w_{t-1}^x, w_{t-1}^y) 表示两个不相关的均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯矢量; α 是个可调节的参数, $\alpha \in [0, 1]$, 它决定了速度前后的相关程度。

2.3 参考点组 (RPG) 移动模型

以上讨论的两种模型均为实体移动模型,它们都是描述单个节点的移动行为,节点运动独立于其它节点。它们的位置、速度和方向都不受附近节点

的影响。而在一些实际的移动自组网中节点的移动会受到相邻节点状态的影响,多个节点的位置、速度在空间上存在相关性,因此出现了群组移动模型,参考点组 (RPG) 模型就是其中的一种。

参考点组移动模型是由多组节点构成的,每个组都有属于自身的逻辑中心,由它指引本组节点的移动,包括速度、加速度和位置的变化,每个组的移动轨迹是由中心节点的移动路径决定的。另外,此模型还为各个分组的节点设置了一个随组移动的参考节点,节点可在参考节点的一定范围内移动,如图 1 所示。节点 u 在 t 时刻的速度矢量满足如下表达式:

$$V_u^t = V_{\text{group}}^t + RM_u^t \quad (8)$$

在该式中,节点在 t 时刻的速度 V_u^t 等于组中心的速度矢量 V_{group}^t 和节点 u 距离它的参考点的随机矢量 RM_u^t 的矢量和^[9,10]。

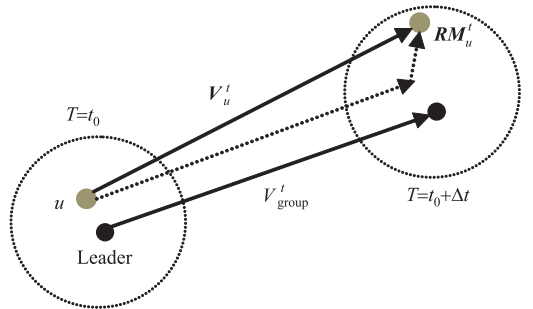


图 1 参考点组移动模型的部分示意图

3 仿真分析

为了验证上述所讨论的理论上的泊松点过程是否与实际情况下节点动态分布的点过程引起的干扰情况相符,我们利用 NS-2 软件搭建了带有冲突避免的载波监听多路访问 (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) 机制下的干扰仿真平台,旨在获得不同情况下的累积干扰分布和概率密度分布情况,并对比分析其结果。

本文主要观察随机路点移动模型、高斯 - 马尔

可夫移动模型和参考点组移动模型这三种常见移动模型下的 CSMA/CA 网络干扰特征,并与泊松点过程理论干扰分布情况进行比较。试验的仿真区域是 $200\text{m} \times 200\text{m}$,节点数都设置为 50,持续时间是 100s,采用的网络模型是单位圆盘加权图模型,信道传播模型都是确定性路径损耗模型,速度的最小值统一为 0 m/s ,最大值为 20m/s ,随机数种子 R 为 0,场景生成时间为 3600s,三个不同移动模型的各自参数设置见表 1、表 2、表 3,基于 NS-2 的泊松点过程的干扰仿真参数见表 4^[11]。

表 1 随机路点移动模型仿真参数表

仿真区域维度 O	2
最大停留时间(s)	5

表 2 高斯-马尔可夫移动模型仿真参数表

角度标准偏差(rad)	0.5
速度角度更新频率(s)	0.1
速度标准偏差(m/s)	0.5

表 3 参考点组移动模型仿真参数表

最大停留时间(s)	5
平均每组节点数	5
组变换概率	0.05
到组中心的最大距离(m)	50
组大小标准偏差(m)	2

表 4 基于 CSMA/CA 干扰的 NS-2 仿真参数表

仿真协议	CBR/UDP/802.11a
节点发送功率(mW)	1
载波检测阈值(nW)	6.25
数据传送速率(Mbps)	3
仿真重复次数(次)	1000
节点位置分布	随机分布
“监控”时间(s)	80
数据包大小(byte)	1500

图 2 为随机路点移动模型、高斯马尔可夫模型、参考点组移动模型及泊松点过程四种不同模型下的干扰累积分布函数曲线图,从图中可以看出,泊松点过程的理论分布曲线和随机路点移动模型的分布曲线较相似,同时从图 2、图 3 所示的各自的概率密度函数分布情况也可以看出,泊松点过程和随机路点模型的干扰分布和轮廓都较相似,它们的累积干扰分布曲线都相对比较平滑,概率密度函数分布都服从 α -稳态分布曲线。因为随机路点移动模型中的节点运动没有任何规律,它们随机移动,其他节点对某一接收节点所造成的干扰功率值覆盖比较全面,因此它最接近于不考虑节点移动情况的泊松点过程理论干扰分布。

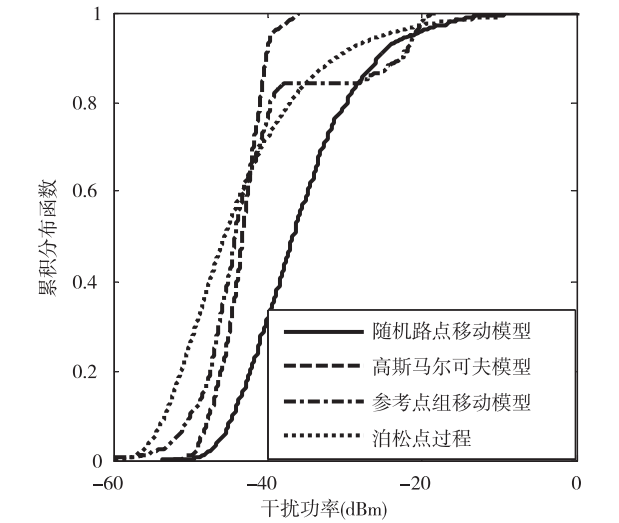


图 2 干扰的累计分布特征

图 3 ~ 图 6 为四个不同模型各自对应的干扰统计概率密度函数分布情况。从图 2 中可以看到,高斯-马尔可夫移动模型和参考点组移动模型的干扰累积分布函数曲线表现出各自不同的形状,造成这种情况的原因可以从它们各自的概率密度函数图来分析。如图 5 和图 6,高斯-马尔可夫移动模型中的节点移动速度在时间上前后有相关性,其它节点相对于接收节点始终保持一定距离,因此相对于随机路点移动模型下的干扰分布,它的干扰功率值较为集中。而参考点组移动模型因其节点为分组移

动,组内距离较小,组与组之间距离较大,对某一指定接收节点造成的干扰功率大小差异大,所以干扰分布呈分散式集中,对应的累积分布曲线呈凹凸起伏状态。

除了上述节点数为 50 的情况外,我们还仿真了几组节点数分别为 20 和 100 的情况,总的可以看出,不同模型下的干扰分布随着节点数的增加,干扰统计值也相应增加,但是干扰的累积分布曲线和概率密度函数曲线整体形状没有发生太大的改变。随机路点移动模型还是和泊松点过程的理论分布情况比较相似,而其他两个移动模型由于它们各自的不同特性与泊松点过程差异较大。

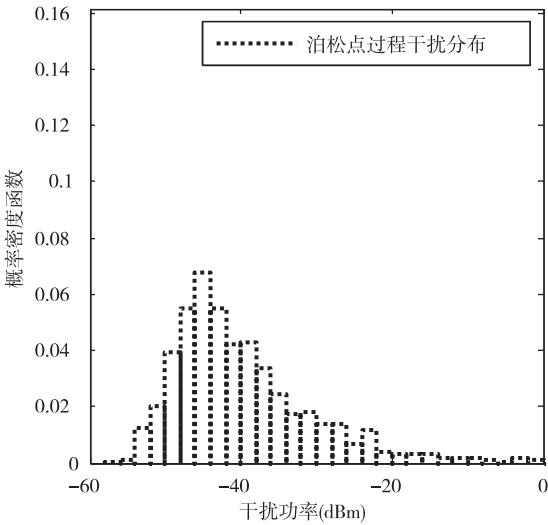


图 3 基于泊松点过程的干扰概率密度函数分布

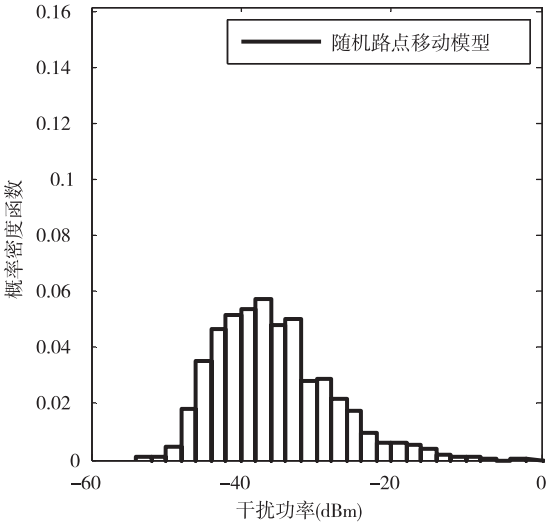


图 4 基于随机路点模型的干扰概率密度函数分布

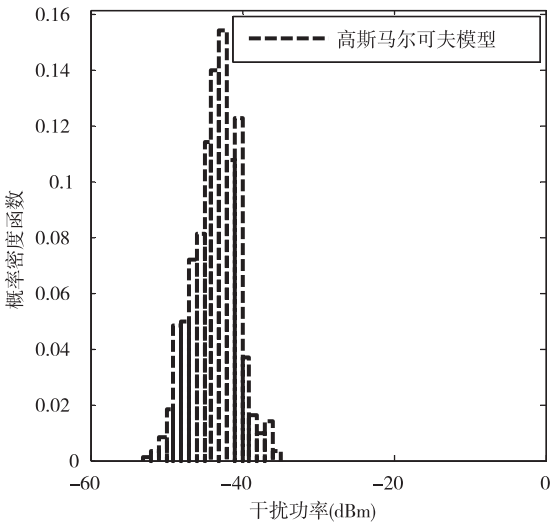


图 5 基于高斯 - 马尔可夫模型的干扰概率密度函数分布

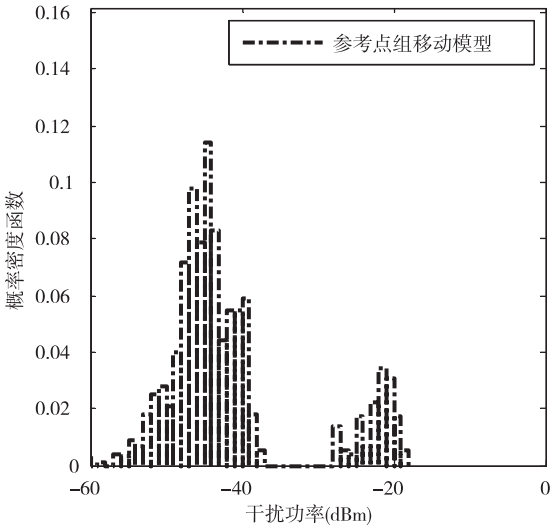


图 6 基于参考点组移动模型的干扰概率密度函数分布

4 结 论

通过 NS - 2 的仿真实验,发现实际基于随机路点移动模型的干扰特征与基于泊松点过程理论分布情况较相似,因为泊松点过程的节点是随机分布的,较符合随机路点移动模型的情况,但是其他两个移动模型与理论泊松点过程存在一定的差距,由于它们的特性不同,因而概率密度函数也不相同。在实际系统中,移动自组网不同于有基础设施的网络,网络中的节点分布有很大的不确定性,或者说也有可

能不是完全随机移动的,它的干扰情况不能用规定的网络部署来严格控制,所以需要进一步模拟仿真更接近于实际情况的移动模型,并与理论上的干扰模型进行对比分析,改进现有不足的理论干扰模型,使干扰模型更准确、更符合实际。

最后,值得指出的是,本文仅对三种不同移动模型下的干扰特征分布进行了仿真研究,并仅与采用 CSMA/CA 机制的协议进行了对比研究。未来还需对比分析各种不同接入机制下的干扰分布状况,并研究不同移动模型下干扰分布的理论表达式,进而综合分析各自的特征及其对实际系统的影响。

参考文献

[1] Haenggi M. Outage and throughput bounds for stochastic wireless networks. In: Proceedings of the International Symposium on Information Theory, Adelaide, Australia, 2005. 2070-2074

[2] Chiu S N, Stoyan D, Kendall W S, et al. Stochastic Geometry and Its Applications. Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 35-63

[3] Shao M, Nikias C L. Signal processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(7): 986-1010

[4] Venkataraman J, Haenggi M, Collins O, et al. Shot noise models for the dual problems of cooperative coverage and outage in random networks. In: Proceedings of the 44th

Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, USA, 2006. 709-718

[5] Sousa E S, Silvester J A. Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network. *Selected Areas in Communications*, 1990, 8(5): 762-771

[6] Baccelli F, Blaszczyzyn B. Stochastic Geometry and Wireless Networks Volume II: APPLICATIONS. Paris: Now Publishers Incorporated, 2009. 29-68

[7] Imielinski T, Korth H F. Mobile Computing. New York: Springer US, 1996. 153-181

[8] Liang B, Haas Z J. Predictive distance-based mobility management for PCS networks. In: Proceedings of the 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, US, 1999. 3: 1377-1384

[9] Hong X, Gerla M, Pei G, et al. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In: Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, New York, USA, 1999. 53-60

[10] Sánchez M, Manzoni P. ANEJOS: a java based simulator for ad hoc networks. *Future generation computer systems*, 2001, 17(5): 573-583

[11] 谭国平, 唐璐瑶, 花再军等. 基于 CSMA/CA 的无线多跳网中干扰特征仿真. *计算机应用*, 2013, 33(12): 398-401

Simulation study on distribution characteristics of
ad-hoc networks based on mobile models

Tan Guoping, Zhu Yandan, Tang Luyao, Li Yueheng

(College of Computer and Information, Hohai University, NanJing 211100, China)

Abstract

To analyst the interference in wireless ad-hoc networks to improve the networks' performance, three common mobile models, i. e. the random waypoint (RWP) model, the Gauss-Markov (GM) model and the reference point group (RPG) model were applied to study. A stochastic geometry approach was used to investigate the spatial distribution of the interferences in a wireless ad-hoc network based on the Poisson point process (PPP) model, and an in-

interference simulation platform constructed based on the mechanism of the carrier sense multiple access with collision avoidance(CSMA/CA) by using the NS-2 software was use to analyze the cumulative distribution functions(CDF) and the probability density functions(PDF) for interference under the mode's of PPP,RWP,GM and RPG. It was found that the performance of wireless ad-hoc networks was gleaty degraded by the co-channel interference,since the interference at a receiver crucially depends on the distribution of interfering transmitters;the PPP based interference distribution characteristics were similar to that under the random waypoint model,but very different from that under the other two mobile models. The reasons for the differences were finally analyzed.

Key words: wireless ad-hoc network, interference distribution, Poisson point process (PPP), mobile model, NS-2 simulation