

饱和状态下IEEE 802.11广播的性能分析

钟 婷, 秦志光, 杨 磊, 李 扬

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】通过对IEEE 802.11广播协议建立马尔可夫链模型,并增加考虑了数据帧长度对网络性能的影响,分析了无线局域网中饱和状态下广播协议的性能;通过对隐藏站点问题的分析,得到了多跳无线网络中可靠广播的吞吐量范围。利用仿真实验验证了分析模型,性能分析的结果为各种基于IEEE 802.11广播协议的应用提供了分析与改进的依据。

关键词 网络性能; Wi-Fi; 无线自组织网络; 无线局域网

中图分类号 TP393.04

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.024

Analysis of the Performance of IEEE 802.11 Broadcast Scheme under Saturation Condition

ZHONG Ting, QIN Zhi-guang, YANG Lei, and LI Yang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Broadcast is the fundamental part of some distributed protocols. Recently, some applications on vehicular ad-hoc networks begin to use broadcast to transmit information. A Markov chain model is developed to evaluate the performance of IEEE 802.11 broadcast in WLAN under saturation condition. The influence of data frame length on performance is considered in the model. In addition, by analyzing the hidden terminal problems, the ranges of the throughput of IEEE 802.11 reliable broadcast in wireless multi-hop networks are calculated. The analytical model is validated by simulation. The results are the basis for the analysis and enhancement of the performance of the IEEE 802.11 broadcast applications.

Key words network performance; Wi-Fi; wireless Ad hoc networks; wireless local area networks

Wi-Fi技术在无线通信领域得到了广泛应用。很多商用移动设备,包括笔记本电脑、智能手机等都内置了支持Wi-Fi的通信模块。Wi-Fi技术基于IEEE 802.11a/b/g标准,使用2.4 GHz附近的频段,提供从2~54 Mb/s的通信带宽。近几年,在802.11a/b/g标准的基础上又扩展出了802.11p标准。802.11p目前处于标准化的过程中,将被用于车载通讯^[1]或称专用短距离通信(dedicated short range communications, DSRC)系统中。厂商开始逐步在新款车型中配置支持Wi-Fi或DSRC的车载无线通信设备。基于车辆间及车辆与基础设施之间的数据交换,可实现事故预警、辅助驾驶、道路交通信息查询等智能交通方面的应用^[2-5]。

IEEE 802.11系列标准包括单播和广播。802.11单播一直有着非常广泛的应用,针对802.11单播的性能也有较多的研究成果。最近,一些在智能交通方面的应用开始使用802.11广播,例如利用广播分发交通安全信息及交通监管信息^[2-5]。但针对802.11

广播性能的研究成果较少。本文中,将建立马尔可夫链模型,分析饱和状态下IEEE 802.11广播的性能,得出饱和状态下无线局域网及多跳无线网络中802.11广播的可靠度与吞吐量。

1 IEEE 802.11广播协议概述

1.1 DCF机制

无论802.11单播,还是802.11广播,都存在冲突问题。冲突会影响数据包的成功接收,从而浪费有限的带宽。基于IEEE 802.11的无线网络没有中心协调机制,IEEE 802.11的MAC层协议依赖分布式协调功能(distributed coordination function, DCF)协调节点对无线媒介的共享。DCF的核心是带冲突检测的载波监听多址接入(CSMA/CA)协议及随机退避机制。

IEEE 802.11的单播协议的DCF较为复杂,包括ACK确认机制及指数退避机制,其工作流程如下。

1) 发送方:当节点有数据帧需要发送时,即

MAC层从上层接收到数据帧时, 节点通过侦听信道尝试进行发送。如果信道空闲, 则等待信道空闲 DIFS (distributed interframe space) 时长之后, 节点发送数据帧。若信道忙碌, 则进入退避过程。退避过程结束后, 节点发送数据帧。节点发送数据帧之后, 将等待接收方发送的 ACK 确认。如果等待 ACK 超时, 则将数据帧放入队列进行重传。

2) 接收方: 接收方收到数据帧之后, 首先检查接收到的数据帧是否正确。如果正确, 则等待 SIFS (short interframe space) 时长之后发送 ACK 进行确认。

3) 退避过程: 节点退避窗口的初始值及最大值分别为 32 与 1 023, 每个节点维护一个退避计数器。如果是因为等待 ACK 超时, 则将退避窗口大小 W 加倍。选择 $0 \sim (W-1)$ 之间一个随机值作为退避计数器的值开始等待, 直至信道变为空闲之后再额外等待 DIFS 时长。之后, 若信道空闲, 则退避计数器以时隙为单位递减。当退避计数器减为 0 时, 结束退避过程。

802.11 单播 ACK 确认机制也称双向握手机制, 该握手机制通过使节点在网络拥堵情况下等待更长时间缓解网络拥堵造成的冲突。

802.11 广播与单播类似, 当 MAC 从上层接收到数据帧时, 节点侦听信道尝试发送数据帧。如果信道空闲, 则在等待信道空闲 DIFS 时长之后, 节点发送数据帧。如果信道忙碌, 则进入退避过程。退避计数器减为 0, 节点广播数据帧。但广播中的接收方是节点所有的邻居, 不可能实现双向握手机制。在广播中, 不需要发送及等待 ACK 确认。同时, 由于不存在 ACK 确认, 退避窗口大小始终不变。

显然, 这种载波侦听机制并不能解决所有的冲突。首先, 两个节点有可能在某时隙同时结束退避过程发送数据帧, 产生冲突。除此之外, 在下一节中将介绍的多跳无线网络中的隐藏站点问题也是冲突产生的原因之一。

1.2 隐藏站点问题

在支持 802.11 标准的网络中, 如果所有节点都在彼此的传输范围之内, 则称之为无线局域网 (WLAN)。在无线局域网中, 节点能够侦听到网络中所有其他节点发送的信号, 通过载波侦听有效地避免冲突。如果并非所有的节点都在彼此的传输范围之内, 则称该无线网络为多跳无线网络。在多跳无线网络中, 一些节点不能侦听到与之距离过远的节点发送的信号, 因此产生了多跳无线网络中的隐藏

站点问题。

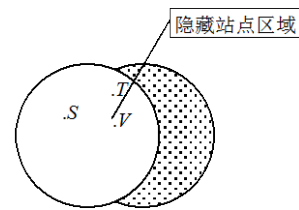


图1 单播下的隐藏站点问题

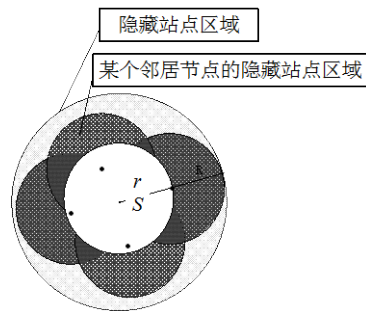


图2 广播下的隐藏站点问题

首先分析单播中的隐藏站点问题。在单播中, 如图 1 所示, 节点 T 在 V 的传输范围之内, 而不在节点 S 的传输范围内。因为 T 无法侦听到 S 向 V 的传输, 所以节点 T 有可能在 S 向 V 传输的同时向 V 发送数据, 造成冲突。而且该冲突无法通过载波侦听解决。图 1 中, T 对于 S 来说是不可见的, 被称为隐藏站点, 而图中阴影部分就是 S 的隐藏站点存在的区域。单播情况下, 隐藏站点区域大小可通过节点 S 与 V 之间的距离来计算。

对于广播情况则不同。如图 2 所示, 节点 S 有 4 个邻居, 每个邻居都有对应的隐藏站点区域, S 的隐藏站点由图中深色的阴影部分构成。广播的接收方是发送节点所有的邻居, 邻居的多少和位置影响隐藏站点区域的大小。但隐藏站点区域的最大可能范围很容易计算。 r 是 S 的传输半径, 与节点 S 距离介于 r 与 $2r$ 之间的区域为隐藏站点区域的最大可能范围, 包括图中所有的阴影区域。当节点密度较大时, S 的隐藏节点区域会接近于该最大可能范围。很容易计算隐藏站点区域的最大面积为 $S_H = \pi(2r)^2 - \pi r^2 = 3\pi r^2$ 。

单播的隐藏站点问题可通过单播的 4 向握手机制来解决。单播的 4 向握手机制也被称为的 RTS/CTS 机制, 其思想是通过节点间交换小的数据包来预留信道。RTS/CTS 机制是 IEEE 802.11 单播的可选机制。由于广播的接收方有多个, 也不可能采用 RTS/CTS 机制解决隐藏站点问题, 因而隐藏站点问题对广播的影响更大。

2 相关的研究工作

关于 802.11 协议性能的研究有较多的成果,但大多集中于 802.11 单播协议。例如在 802.11 协议被标准化之后不久,文献[6-7]就提出了马尔可夫链模型分析 802.11 单播性能。文献[6]分析了 DCF 基本机制 CSMA/CA 下的单播性能,并提出了优化单播性能的网络配置。文献[7]既分析了基本机制 CSMA/CA 下的单播性能,也分析了其可选机制 RTS/CTS 下的单播性能。但文献[6-7]都只考虑了无线局域网的单播性能,而没有考虑多跳无线网络中的情形。在文献[6-7]研究的基础上,又出现的大量的关于 802.11 单播性能分析的文章^[8-10]。其中文献[8]考虑到了隐藏站点问题,分析了多跳无线网络中的单播性能。

文献[11]分析了饱和状态下的无线局域网广播性能,但没有考虑多跳无线网络。除此之外,文献[11]的分析模型中存在一些简化,例如没有考虑数据帧大小对网络吞吐量的影响。文献[12]分析了无线局域网中广播通信流量对单播性能的影响。文献[13]讨论了多跳无线网络中的 802.11 广播的最大吞吐量,但其没有考虑到 802.11 广播的退避机制,是不准确的。

3 分析模型

为建立一个数学模型分析饱和状态下 802.11 广播的性能,做出以下合理的假设和定义。

1) 所有的节点在网络中均匀分布,即假设节点密度为 λ ,则在面积为 S 的区域内共有 λL 个节点;

2) 所有节点有同样的传输半径和侦听半径 r ,用 n 表示一个节点传输范围内的平均节点数, $n = \lambda \pi r^2$ 。

假设节点每次发送的数据帧的大小是相等的。之所以有这样的假设,是为了分析数据帧大小对网络性能的影响及简化数学模型。用 δ 表示发送一个数据帧占用时隙的个数, δ 包括了链路层头和、物理层头占用的时隙。关注可靠广播:当一个节点进行广播时,当且仅当其传输范围内的所有节点都成功接收到广播数据帧才算作是一次成功的广播。可靠广播在应用中非常有用,是某些分布式协议的基础^[14]。假设整个网络处于饱和状态,即无线网络中的每个节点的发送队列总是不空的。饱和状态即是无线网络的满负荷状态。在上述的假设之上,节点随机退避过程可以用一个马尔可夫链模型来描述。

3.1 节点随机退避过程的马尔可夫链模型

首先,节点的随机退避机制可以用一维的马尔可夫链模型来描述^[11]:

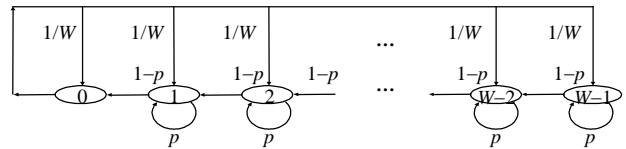


图3 节点随机退避过程的马尔可夫链模型

图3中, W 是退避窗口的大小。节点处于状态(k)表示当前节点退避计数器值为 k 。当节点进入状态(0)时,退避计数器的值减为0,此时节点立刻广播数据帧。每个时隙开始,处于等待状态(k)的节点以 p 的概率仍停留在当前状态,而从以 $(1-p)$ 的概率从(k)跃迁到($k-1$)。 p 是处于等待状态的节点侦听到信道忙碌的概率。由于网络处于饱和状态,广播后节点总是立即进入新一轮退避过程。退避计数器的值在 $0 \sim W-1$ 之间随机选择,故从状态(0)跃迁到其他所有状态的概率都是 $1/W$ 。在饱和状态下,在节点状态从(0)跃迁到其他状态之前,总需经历时长为DIFS的等待。

令 p_k 表示为一个节点处于状态(k)的概率。特别要关注传输状态的概率 p_0 ,也就是一个节点在退避过程处于状态(0)的概率。根据马尔可夫链规则,从右到左迭代计算,可以得到:

$$p_k = \frac{(W-k)p_0}{W(1-p)} \quad k=1,2,\dots,W-1 \quad (1)$$

显然,各状态的概率相加总和等于1,得到:

$$\sum_{k=0}^{W-1} (p_k) = 1 \quad (2)$$

把式(1)和(2)两个式子结合起来,可解出:

$$p_0 = \frac{1}{\frac{W-1}{2(1-p)} + 1} \quad (3)$$

上面的马尔可夫链模型中,除了(0)之外的其他各状态持续时间均为一个时隙。而(0)状态的持续时长为 $\delta + T_{\text{DIFS}}$ 。在任选的一个时隙中,某个节点处于传输状态的概率为:

$$P_0 = \frac{\delta p_0}{(\delta + T_{\text{DIFS}})p_0 + (1-p_0)} \quad (4)$$

任选的一个时隙中,节点试图减小其退避计数器而信道忙的概率 p 也就是其他的节点中至少有一个处于传输状态的概率有:

$$p = 1 - (1-p_0)^{n-1} = 1 - \left(1 - \frac{\delta p_0}{\delta p_0 + T_{\text{DIFS}}p_0 + (1-p_0)}\right)^{n-1} \quad (5)$$

综合式(3)与(5)可求得 p_0 与 δ , n 之间的关系。在不同的 δ 取值之下, p_0 是关于 n 的变量。特别关

注 δ 分别取值为 30、100、400 的情形。以 802.11b 协议为例, 考虑到物理层和 MAC 层的头长度, 上述 δ 取值对应数据包的长度分别约为 120、470、1 970 个字节。可以利用 MATLAB 工具画出不同的 δ 取值下 p_0 随着 n 变化的情况。

3.2 无线局域网中的可靠度及吞吐量

在无线局域网中, 任何一个节点都可以侦听到其他所有节点广播的信号, 又因为假定数据帧大小是相等的, 所以多个节点广播数据帧占用的时隙要么是完全重合的, 要么是完全分离的。广播数据帧发生冲突的概率等于一个时隙中信号发生冲突的概率。

将可靠度 R 定义为传输的帧不与其他帧发生冲突的概率。在无线局域网中, 可靠度 R 即为在一个随机选择的时隙中, 传输节点的所有的邻居节点都不进行广播的概率为 $R = (1 - p_i)^{n-1}$ 。

将吞吐量 T_H 定义在任意一个时隙中有且仅有一个节点在传输的概率为 $T_H = np_i(1 - p_i)^{n-1}$ 。

吞吐量也可解释为用于成功广播数据帧所占用时隙的比例。图 4 和图 5 分别显示了无线局域网中不同 δ 取值下可靠度与吞吐量随节点数 n 变化的曲线图。

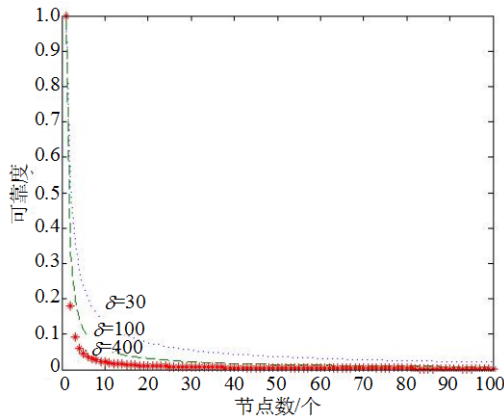


图 4 无线局域网中可靠度随节点数变化的曲线图

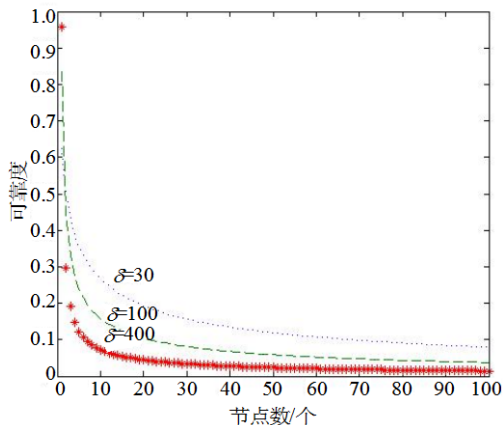


图 5 无线局域网中吞吐量随节点数变化的曲线图

从图 4、图 5 中可以看出, 随着节点数的增多, 冲突概率增加, 网络的吞吐量及可靠度下降。而在节点数相同的情况下, 数据帧较长时, 可靠度及吞吐量较低。

3.3 多跳无线网络中的可靠度与吞吐量

在多跳无线网络中, 存在隐藏站点问题, 多跳无线网络中的可靠度与吞吐量更低。假设多跳无线网络中隐藏站点个数为 m , 可靠度 R 即为在任一时隙中传输节点的所有的邻居节点都不进行广播且所有的隐藏站点均不广播的概率为 $R = (1 - p_i)^{(n-1)+m}$, 而吞吐量可以表示为 $T_H = np_i R = np_i(1 - p_i)^{(n-1)+m}$ 。

广播的隐藏站点区域的大小及其中的隐藏站点数 m 无法准确计算, 因此无法准确地计算多跳无线网络中的可靠度及吞吐量。由第 1 节中的分析, 隐藏站点区域的最大范围的大小为 $3\pi r^2$, 不难估算, 当节点数超过 5 时, 在节点均匀分布的情况下, 其隐藏站点的区域大于 πr^2 。在节点超过 5 的情况下, m 介于 n 与 $3n$ 之间, 可以确定多跳无线网络可靠度及吞吐量的范围。

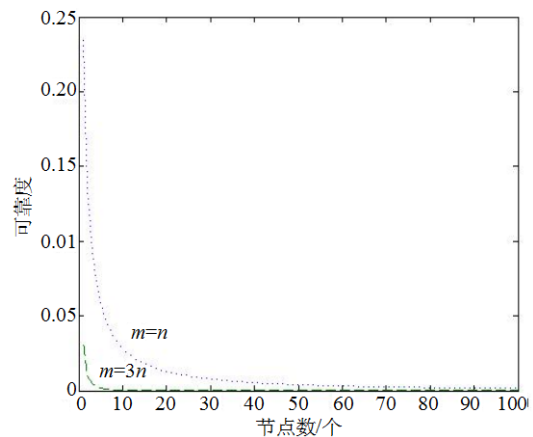


图 6 多跳无线网络中吞吐量随节点数变化的曲线图

图 6 显示了 δ 取值为 30, 而 $m=n$ 式 $m=3n$ 时, 吞吐量随节点数变化的曲线。 n 超过 5 时, 多跳无线网络可靠度与吞吐量随节点数变化的曲线应位于 $m=n$ 与 $m=3n$ 的两条曲线之间。在多跳无线网络中, 如果考虑可靠广播, 网络的吞吐量及可靠度是非常低的。

4 模型验证

采用康奈尔大学开发的 SWANS 系统验证模型的正确性。该系统基于 JIST 平台仿实现了 IEEE 802.11 系列协议。在 SWANS 系统基础上, 对其物理层及链路层的实现进行修改, 使之符合本文模型的假设条件。仿真实验采用 802.11b 协议, 仿真实

验中, 仿真吞吐量 $T_{Hsim} = \frac{\delta \times \sum_{i=1}^n r_i}{(n-1) \times T_{sim}}$, 其中,

T_{sim} 是以时隙为单位的仿真时间; $\sum_{i=1}^n r_i$ 是仅考虑可靠广播

时, 节点接收到的数据帧总数。对于多跳无线网络下的可靠广播, $n > 5$ 时, 仿真实验中得到吞吐量与理论值一致, 基本为 0。对于无线局域网, 在各种情形下, 仿真结果与理论结果也很接近, 图 7 中给出了 δ 取值为 30 时仿真结果与理论结果的对比情况。

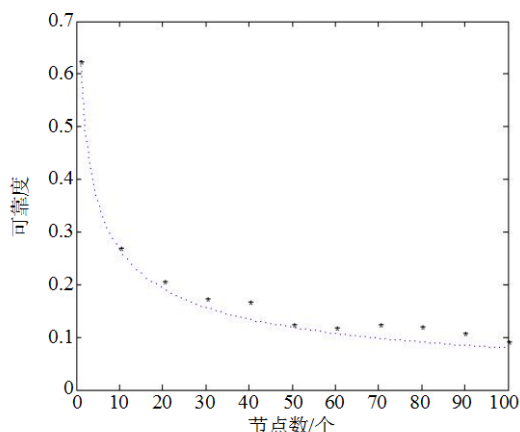


图 7 仿真实验结果

5 结论

本文通过建立一个简单的马尔可夫模型分析 802.11 广播机制的性能。分析结果显示, 在无线局域网中, 随着节点数的增多, 广播可靠度与吞吐量降低。在无线局域网中, 由于节点能够侦听其他节点发送的信号, 即使节点数达到 100, 仍然能保持一定的吞吐量。数据帧的大小对网络的吞吐量有较大的影响, 在节点数相同的情况下, 数据帧越小, 吞吐量越大。在多跳无线网络中, 由于存在隐藏站点问题, 随着竞争信道的节点数增多, 广播性能急剧下降。在多跳无线网络中, 可靠广播的性能很差。

参考文献

[1] American Society for Testing and Materials. Standard E2213-03: Telecommunications and information exchange between roadside and vehicle systems 5 GHz band dedicated short range communications (DSRC) medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. E17.51, [S.1.]: ASTM, 2003.

[2] TAMER E, SIDDHARTHA K G, GAVIN H, et al. Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications[C]//The 3rd international

workshop on vehicular Ad hoc networks. Los Angeles, California, USA: ACM Press, 2006: 1-9.

[3] SURIYAPAIBONWATTANA K, POMAVALAI C. An effective safety alert broadcast algorithm for VANET[C]//ISCIT 2008: the International Symposium on Communications and Information Technologies. Lao PDR: IEEE Press, 2008: 247 - 250.

[4] ZHONG Ting, XU Bo, WOLFSON O. Disseminating real-time traffic information in vehicular Ad-hoc networks[C]//2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands: IEEE Press, 2008.

[5] ZHONG Ting, XU Bo, WOLFSON O. Trafficinfo: an algorithm for VANET dissemination of real-time[C]//The World Congress, in Conjunction with ITS America's 2008 Annual Meeting. New York: [s.n.], 2008.

[6] FREDERICO C, MARCO C, ENRICO G. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit[J]. IEEE/ACM Transactions-TON, 2000, 8(6): 785-799.

[7] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.

[8] BAROWSKI Y, BIAZ S, AGRAWAL P. Towards the performance analysis of IEEE 802.11 in multi-hop ad-hoc networks[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, USA: IEEE Press, 2005: 100-106.

[9] YANG Xiao. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCF under saturation condition[C]//2004 IEEE International Conference on Communications. Paris: IEEE Press, 2004: 170-174.

[10] PAAL E E, OLAV N O. Non-saturation and saturation analysis of IEEE 802.11e EDCA with starvation prediction[C]//Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Montréal, Canada: ACM Press, 2005: 224-233.

[11] MA Xiao-min, CHEN Xian-bo. Saturation performance of IEEE 802.11 broadcast networks[J]. Communications Letters (IEEE), 2008, 11(8): 686 - 688.

[12] OLIVEIRA R, BERNARDO L, PINTO P. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function with unicast and broadcast traffic[C]//IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Helsinki, Finland: IEEE Press, 2006: 1-5.

[13] WOLFSON O, XU B, HUA Y, et al. Search-and-discover in mobile P2P network databases[C]//International Conference on Distributed Computing Systems. Lisboa, Portugal: IEEE Press, 2006: 1-9.

[14] CHOI Jong-mu, SO Jung-min, KO Young-bae. Numerical analysis of IEEE 802.11 broadcast scheme in multihop wireless Ad hoc networks, Lecture Notes in Computer Science[M]. Berlin: Springer, 2005: 1-10.