

大规模无线传感器网络中基于 P2P 的路由模型研究

罗 樵¹ 陈 靖^{1,2} 郭一辰¹ 黄聪会¹

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)¹

(205 Dreese Laboratories, Department of Electrical and Computer Engineering,
The Ohio State University, USA)²

摘 要 P2P 网络与无线传感器网络存在许多相似特性,目前基于 P2P 的无线传感器网络路由逐渐成为一个新的研究热点,但其研究成果主要适用于中小规模的网络环境,普遍存在网络能耗不均衡和效率低等问题。提出基于 P2P 的大规模无线传感器网络路由模型。通过在 LEACH 协议上融合结构化 P2P 算法使簇首节点以多跳的方式与基站通信,来提高无线传感器网络可扩展性,同时引入最小能耗路径选择机制,保障节点能耗的均衡。仿真实验证明,新模型有效提高了大规模无线传感器网络路由的效率和生命周期。

关键词 对等网络,大规模,传感器网络,路由模型

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Study of Large-scale WSN Routing Model Based on P2P

LUO Qiao¹ CHEN Jing^{1,2} GUO Yi-chen¹ HUANG Cong-hui¹

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)¹

(205 Dreese Laboratories, Department of Electrical and Computer Engineering, The Ohio State University, USA)²

Abstract Because P2P network and WSN have many similar features, the study of WSN routing based on P2P technology has become a new hot, but mainly research is suitable for small or medium WSN, and has unbalanced energy consumption and inefficient problem. This paper presented large-scale WSN routing model based on P2P. It combines LEACH protocol with structured p2p algorithm to make cluster header correspond with the base station by multiple-hop method, improves WSN's scalability. At the same time, it expands smallest energy consumption path selection mechanism into WSN, supports node of the equilibrium of energy consumption. The experiment proves that this new routing model can greatly increase the large-scale WSN routing efficiency and life cycle.

Keywords P2P, Large-scale, WSN, Routing model

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器节点组成,它是通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息,并发送给观察者^[1,2]。

在传统的无线传感器网络中,消息是通过单跳的方式发送到汇聚节点(C/S模式)的,这常导致耗电量快、资源浪费、通讯超过监测范围,从而使网络变得不稳定、效率低,甚至不可用^[3]。近几年,国内外学者将 P2P 引入 WSN,并试图利用 P2P 的技术优势解决 WSN 的关键技术问题^[4-6]。文献[7]阐述了 P2P 和 WSN 两个领域交叉研究的学术价值。文献[8]论证了 P2P 技术的引入使 WSN 中节点能够更加准确地感知

监测区域目标。文献[9]分析了 P2P 算法在 WSN 中应用的原理和方法。文献[10]采用 P2P 联网方式构建了一个小型的无线传感器网络。它们从不同的方面将 P2P 思想与 WSN 网络结合起来优化 WSN 网络性能,但基本都局限于中小规模。本文提出基于 P2P 的大规模无线传感器网络路由模型(Large-scale WSN Routing Model based on P2P, WRMP),以提高无线传感器网络的可扩展性和路由效率。

2 问题描述

LEACH^[11]协议是最典型的层次式路由算法,较之平面路由有许多优势:(1)层次路由协议消耗能量少且能量消耗分布均匀,能有效地延长网络寿命;(2)层次路由协议减小了路由表尺寸,降低了路由维护开销;(3)层次路由协议的簇形成策略产生一个较稳定的子网络,减少了拓扑结构的变化对路

到稿日期:2011-03-28 返修日期:2011-05-26 本文受国家自然科学基金(71071157),国家军口 863 创新基金(2009AAJ131),陕西省自然科学基金(SJ08-ZT15),空军武器装备军内科研发助项目(KJ09130),空军工程大学博士创新基金(KDYBSJJ08403)资助。

罗 樵(1978—),男,博士生,主要研究方向为分布式系统理论与技术,E-mail:lq1008@hotmail.com;陈 靖(1963—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式系统理论与技术;郭一辰(1988—),男,硕士生,主要研究方向为分布式系统理论与技术;黄聪会(1985—),男,博士生,主要研究方向为分布式系统理论与技术。

由协议带来的影响。鉴于以上优点,采用 LEACH 协议作为基础研究和改进的对象。

同时,LEACH 协议也有明显的缺点:(1)由于节点通信距离有限,簇首直接与基站单跳通信的机制限制了无线传感器网络的规模。(2)向基站发送数据时簇首间能量消耗存在极大差异,离基站远的簇首远远高于离基站近的簇首,容易产生失效节点,导致网络平均生命周期下降。因此,WRMP 模型的设计将针对这两方面的问题,在 LEACH 协议的基础上引入 P2P 的结构化 CAN^[12]算法,即在 WSN 物理网络上构建 P2P 网络覆盖层(overlay),使簇首节点形成 P2P 网络并以多跳的方式与基站通信;同时引入多路径路由技术选择能耗最小的多跳路径发送信息,保障簇首能耗的均衡并提供对大规模无线传感器网络应用的支持。

3 WRMP 模型基本层次结构

WRMP 模型的设计目标是针对下一代网络技术(NGN)的发展对大规模无线传感器网络应用的需求,并配合分布式哈希散列算法建立一个基于 P2P 的大规模 WSN 路由模型。它设计为 3 个阶段,建立阶段:在 WSN 物理拓扑的基础上,按照 LEACH 协议轮换选择机制选举出簇首,构建 P2P 网络覆盖层;稳定阶段:运行基于 DHT(Distributed Hash Tables, 分布式哈希表)的路由算法,产生多路径路由;路径选择阶段:按照最小能耗路径选择机制发送信息,最后在基站进行数据融合。图 1 示出了 WRMP 模型的基本层次结构。

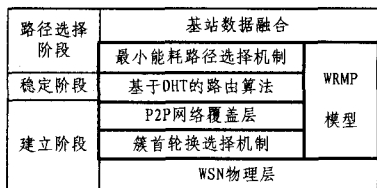


图 1 WRMP 模型的基本层次结构

4 WRMP 路由算法

WRMP 模型中应用的路由算法(简称为 WRMP)是一个基于 WSN 的网络层路由算法。它采用基于 DHT 的杂凑式路由算法,在 LEACH 协议的基础上对 CAN 路由算法进行改进。包括:节点命名机制、P2P 网络覆盖层构建算法、多路径路由产生算法、最小能耗路径选择算法、路由查询和维护算法。

4.1 节点命名机制

与 CAN 路由算法相似,WRMP 模型将 WSN 中节点的 MAC 地址映射到一个 d 维的笛卡尔空间,生成相应的 NID(Node ID),并存储相邻节点表。不同的是,WRMP 模型信息路由的主要目的就是进行节点的路由和定位,每个消息查询键值就是节点的 NID,即查询到消息键值也就实现了节点间的多跳路由。

4.2 P2P 网络覆盖层构建算法

P2P 网络覆盖层构建算法工作在 WRMP 模型建立阶段。它在无线传感器网络物理拓扑的基础上构建结构化 P2P 网络覆盖层,为在 WSN 路由协议的基础上应用结构化 P2P 路由算法打下了基础,算法初始化和构建过程描述如下。

Step1 按照 LEACH 协议轮换选择机制选举出簇首。

Step2 簇首通知网络中其余节点自己被选为簇首。

Step3 非簇首节点按照先前设置好的参考值,例如信噪比、接收信号强度等,来决定它所要加入的簇,并告知相应的簇首。

Step4 簇首根据簇内节点的信息产生一个时分多址(TDMA)方案,给每一个簇内节点分配一个通信时隙。若簇内节点想给簇首传送分组,必须等到自己的时隙。

Step5 将簇首与汇聚节点(Sink 节点)按照 CAN 的散列算法产生 d 维的笛卡尔空间,构建 P2P 网络覆盖层。

4.3 多路径路由产生算法

多路径路由产生算法工作在 WRMP 模型稳定阶段。它在 P2P 网络覆盖层构建完成后,负责在簇首与汇聚节点间产生多路径路由,保障离 Sink 节点较远的簇首节点能够通过多跳的方式发送信息,提供对大规模无线传感器网络应用的支持。设定一个具有 N 个节点的无线传感器网络,笛卡尔空间维数为 d ,查询转发个数为 $R(R < 2d)$,系统多路径条数为 M 。多路径路由产生示意图如图 2 所示,算法描述如下。

Step1 查询节点将 Sink 节点的 MAC 地址 S_{mac} 通过散射函数产生一点 $P(A_1, A_2, \dots, A_b)$,其中 $A_1 = h_1(S_{mac}), A_2 = h_2(S_{mac}), \dots, A_b = h_b(S_{mac})$ 。

Step2 查询节点在 $2d$ 个邻居节点中选择最接近点 P 的 R 个邻居节点,转发查询请求。

Step3 如果邻居节点发现 P 处在自己负责的区域,说明该邻居节点就是 Sink 节点,此时向查询节点返回该多跳路径。

Step4 其余的邻居节点通过查询节点确认上一轮查询请求转发结束后,继续选择最接近点 P 的 R 个邻居节点(除去已经获得查询请求的邻居节点),并转发查询请求。

Step5 当查询节点获得的多跳路径条数达到 M 时,查询结束;否则,回到 Step3。

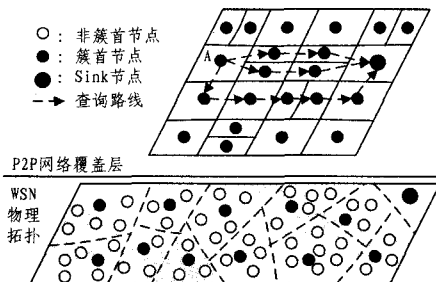


图 2 多路径路由产生示意图

LEACH 协议采用单跳通信机制,大规模 WSN 环境下,有的簇首无法直接与 Sink 节点通信,即使能够通信,也会导致较远簇首消耗大量能量。而 WRMP 模型应用多路径路由产生算法能够合理地解决上述问题,下面将针对单跳/多跳通信模式的能耗给出具体分析。系统模型采用极端分析法:给定一个具有 n 个节点的无线传感器网络,该网络由位于同一条直线上的 $n-1$ 个节点和 Sink 节点组成,任意两相邻节点间距离为 r ,节点 A 向 Sink 节点发送数据,数据包大小为 k bit,不考虑将数据进行融合处理,如图 3 所示。

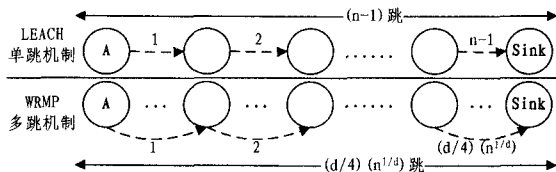


图 3 单跳/多跳通信机制示意图

依照无线通信能耗模型, LEACH 协议采用单跳通信模式时, 发送和接收总共需要消耗的能量为:

$$\begin{aligned} E_{\text{single-hop}} &= \{kE_{\text{dec}} + k\epsilon_{\text{amp}}[(n-1)r]^2\} + kE_{\text{dec}} \\ &= 2kE_{\text{dec}} + (n-1)^2 k\epsilon_{\text{amp}} r^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, E_{dec} 是 1bit 数据在发送或接收过程中消耗的能量, ϵ_{amp} 是信号放大器的能耗系数。WRMP 模型采用多跳通信模式时, 由于多路径路由产生算法基于 CAN 路由算法, 其查询到 Sink 节点的平均跳数 L 为 $(d/4)(n^{1/d})$, 因此总计产生 L 次数据发送和 L 次数据接收, 总的能耗为:

$$E_{\text{multi-hop}} = \frac{d}{4} \sqrt[n]{n} [kE_{\text{dec}} + k\epsilon_{\text{amp}} (\frac{4n}{d} r)^2] + \frac{d}{4} \sqrt[n]{n} kE_{\text{dec}} \quad (2)$$

因为 $(d/4)(n^{1/d}) < n$, 给定 $\lambda (0 < \lambda < 1)$, 则 $(d/4)(n^{1/d}) = \lambda n$, 由式(2)得:

$$\begin{aligned} E_{\text{multi-hop}} &= \lambda n [kE_{\text{dec}} + k\epsilon_{\text{amp}} (\frac{n}{\lambda n} r)^2] + \lambda n kE_{\text{dec}} \\ &= 2\lambda kE_{\text{dec}} n + \frac{k\epsilon_{\text{amp}} r^2}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(1)一式(3)得:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{\text{single-hop}} - E_{\text{multi-hop}} \\ &= 2kE_{\text{dec}} + (n-1)^2 k\epsilon_{\text{amp}} r^2 - 2\lambda kE_{\text{dec}} n - \frac{k\epsilon_{\text{amp}} r^2}{\lambda^2} \\ &= (k\epsilon_{\text{amp}} r^2) \times n^2 - (2k\epsilon_{\text{amp}} r^2 + 2\lambda kE_{\text{dec}}) \times n + \\ &\quad [2kE_{\text{dec}} + (1 - \frac{1}{\lambda^2}) k\epsilon_{\text{amp}} r^2] \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 在一个特定的无线传感器网络中, 除去 n 外其余的参数可以当作常量, 即 ΔE 是一个以节点数 n 为变量的一元二次函数, 且 n^2 的系数 $k\epsilon_{\text{amp}} r^2 > 0$ 。由函数性质可知, 当 n 的取值大于驻点在 X 轴的值时, ΔE 会随着 n 的加大而增大。这一现象证明了, 在大规模的 WSN 网络环境下采用多跳通信机制的 WRMP 模型较之 LEACH 协议更加节省能量, 有效地提高了 WSN 网络的生命周期和可扩展性。

4.4 最小能耗路径选择算法

最小能耗路径选择算法工作在 WRMP 模型路径选择阶段, 负责从多路径路由产生算法产生的多路径路由中选择最小耗能的路径向 Sink 节点发送信息, 以保障簇首能耗的均衡, 提高 WSN 网络的平均生命周期。算法的具体描述如下: 假设簇首 A 有数据要传送给 Sink 节点, 首先分别计算 M 条多路径路由所有中转簇首的权值和函数 W 的值, 然后选择最大权值的路径发送数据。权值和函数 W 定义如下:

$$W = \sum_{i=1}^K W_i = \frac{E_{\text{current}}(i)}{E_{\text{average}}(l-1)} \times \frac{D_{A0\text{Sink}}^2}{D_{A0i}^2 + D_{i0\text{Sink}}^2} \quad (5)$$

$i \in$ (其它 $l-1$ 个簇首节点)

式中, $E_{\text{current}}(i)$ 为中转簇首 i 当前轮的剩余能量, $E_{\text{average}}(l-1)$ 为除了簇首节点 A 之外的其余 $(l-1)$ 个簇首节点剩余能量的平均值, $D_{A0\text{Sink}}^2$ 和 $D_{i0\text{Sink}}^2$ 为簇首 A 、簇首 i 到 Sink 节点的距离, D_{A0i}^2 为簇首 A 到簇首 i 的距离, K 为簇首 A 通往 Sink 节点的最大跳数。

4.5 路由查询和维护算法

在无线传感器网络中, 大多数情况是簇首向 Sink 节点发送信息, 即簇首查询 Sink 节点的路由; WRMP 模型采取基于 DHT 的多路径路由产生算法不仅保障了上述需求, 而且提供了 Sink 节点查询监测区域节点和节点间路由由查询的方式, 这

是因为 P2P 覆盖网络层的构建使得 WSN 中节点具有了对等网络的特性, 能够平等地拥有网络资源和信息查询的能力。路由维护算法中簇首节点的加入和退出类似于 CAN 算法, 在此不再赘述。

5 仿真实验分析

无线传感器网络路由协议最为关注的是节点能耗、网络生命周期和网络可扩展性等问题。本节将从以上几个方面选取最典型的层次式路由协议 LEACH 作为参照, 通过仿真实验分析大规模 WSN 环境下应用 WRMP 模型在路由协议性能方面的改善。

系统采用 NS2 软件作为模拟仿真平台, 以 LEACH 和 WRMP 作为分析对象。仿真过程中, 选择 200 个节点随机分布于 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的区域中, 每个节点的通信半径 $d = 20\text{m}$, 节点的发射功率 $P_{\text{tx}} = 2.0\text{W}$, 接收功率 $P_{\text{rx}} = 1.0\text{W}$, 闲听时的功率设为 $P_{\text{idle}} = 0.035\text{W}$; 仿真时间为 500s; 每个节点的初始能量设为 1000J。

5.1 网络生命周期

图 4 显示了两种算法存活节点数目随时间的变化情况。从图中可以看出, LEACH 在 180s 时出现死亡节点, 而 WRMP 在仿真将近 330s 时才开始出现死亡节点, 网络生命周期提高了 83.3%。WRMP 能量耗尽时间是 LEACH 的 1.2 倍。可见, WRMP 较之 LEACH 明显拥有更长的网络生命周期。这是因为 WRMP 采用基于 P2P 的网络覆盖层拓扑结构, 以多跳的方式向基站传输数据, 有效地均衡了簇首节点的能耗, 提高了网络生命周期。

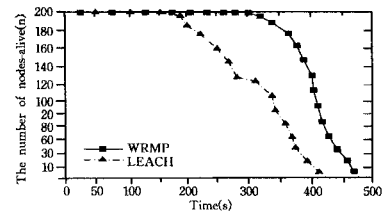


图 4 存活节点数目随时间的变化情况

5.2 网络能量消耗

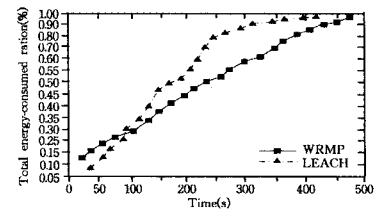


图 5 网络能量消耗随时间的变化情况

图 5 显示了两种算法网络能量消耗比率随时间的变化情况。在网络建立阶段, WRMP 能量消耗略高与 LEACH, 这是因为 WRMP 需要构建 P2P 覆盖层网络, 但到了稳定阶段后 WRMP 耗能曲线逐步平缓, 而 LEACH 在仿真进行到 100s 之后, 随着死亡节点的增加, 能耗曲线明显上扬, 导致相同仿真时间内总体的能耗水平高于 WRMP。这是因为 WRMP 在路径选择阶段引入了多路径技术, 选择最小能耗的路径发送数据, 有效平衡了簇首节点的能量消耗, 减少了死亡节点的产生, 从而降低了网络节点的总体能耗。

5.3 不同网络规模的总体能耗

仿真过程中,选择100~1000个节点,仿真时间设为100s(其它设置与上面实验相同)。图6显示了两种算法在不同网络规模下的总体能耗比率。从图中可以明显看出,当网络规模达到400个节点时,LEACH的总体能耗已经达到了80%,当达到600个节点时网络能量耗尽;而WRMP在200个节点内能耗与LEACH相当,随后能耗一直低于LEACH,到最大1000个节点时还能够剩余20%的能量。这是因为P2P技术的引入,使得网络中的节点能够在分布式的环境下,合理地利用能量资源,更加有效地参与到信息处理的任务中,使WRMP适用于大规模无线传感器网络。

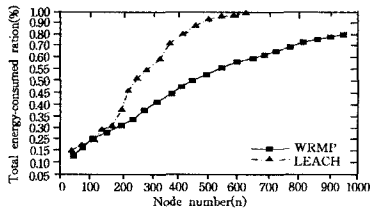


图6 不同网络规模总体能耗的变化情况

结束语 本文提出了一种基于WSN架构的完全分布式自组路由模型。通过构建基于网络实际拓扑的P2P网络覆盖层,在LEACH协议上融合结构化CAN算法实现与基站的多跳通信,并在此基础上引入多路径路由技术选择最小能耗路径发送数据,有效提高了大规模WSN路由效率和生命周期。

参考文献

- [1] Akyildiz L F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks* (Elsevier), 2002, 38(4): 393-422
- [2] 唐宏, 谢静, 鲁玉芳, 等. 无线传感器网络原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010
- [3] Rondini E, Hailes S, Li L. Load sharing and bandwidth control in

(上接第91页)

陷入局部极小值,加快了学习速率,使算法的收敛速度较快。而PID和KF-AQM算法由于参数固定不变,因此很难适应动态的网络环境,导致队列收敛慢,波动大。

结束语 主动队列管理是近几年端到端拥塞控制中研究的一个热点。提出了一种新的自适应主动队列管理算法,它将现代控制理论中的卡尔曼滤波原理与神经元网络结合,在线调整滤波增益矩阵各个分量,使队列稳定在期望值附近。仿真结果表明,在大多数网络环境中,本算法在队列稳定性、延时和链路利用率等方面,性能明显优于PID和KF-AQM算法,同时可以保证快速的收敛速度和较好的瞬态性能。因此,自适应卡尔曼滤波算法是一种有效的主动队列管理算法。

参考文献

- [1] Jacobson F S. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1(4): 397-413
- [2] Hollot C V, Misra V. On Designing Improved Controllers for

mobile P2P wireless sensor networks[C]//Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. IEEE, 2008: 468-473

- [4] Chellury S, Chi M, Michael L, et al. Peer-to-peer Wireless Sensor Network Data Acquisition System with Pipelined Time Division Scheduling[C]//Sarnoff Symposium, IEEE, 2006. Princeton, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-4
- [5] LI Li, Liu Yuan-an, Tang Bi-hua. SNMS: an intelligent transportation system network architecture based on WSN and P2P network[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2007, 14(1): 65-70
- [6] 张丽娟. 结构化无线传感器网络路由协议的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009
- [7] Gutierrez G, Mejias B, van Roy P, et al. WSN and P2P: A Self-Managing Marriage[C]//2008 Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops. Venice, Italy; SASO, 2008: 198-201
- [8] Xue W, Sheng W, Dao W B, et al. Distributed peer-to-peer target tracking in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2007, 7(6): 1001-1027
- [9] Carretti C M. Comparison of distributed optimization algorithms in sensor networks[M]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology(KTH), 2008
- [10] 崔瑞端, 庄雷. 基于P2P的小型无线传感器网络的研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 900-904
- [11] Heinzelman W, Chandrakasan A. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]//Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Washington; IEEE Press, 2000: 3005-3014
- [12] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A Scalable Content-Addressable Network [C] // Proceedings of the International Conference of the Special Interest Group on Data Communication(SIGCOMM '01). New York, NY, USA: ACM Press, 2001: 161-172

AQM Routers Supporting TCP Flows[C]//Proc of INFOCOM'01. Anchorage, USA, 2001: 1726-1734

- [3] Fan Yan-fei, Ren Feng-yuan, Lin Chuang. Design a PID Controller for Active Queue Management[C]//Proc of 8th IEEE International Symposium on Computers and Communication. Antalya, Turkey, 2003: 985-990
- [4] Yan Qiao, Hu Xiao-juan. A New PID Controller for AQM Based on Neural Network[C]//Proceeding of Intelligent Computing and Intelligent Systems(ICIS). 2010 IEEE International, 2010: 804-808
- [5] Alinaghizadeh M, Beheshti M T H. A Robust Discrete-time Controller for Delay Sensitive Applications[J]. *IEICE Electronics Express*, 2009, 22(6): 1548-1555
- [6] Cotter S F, Murthi M N. Target tracking based network active queue management[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Taipei, 2009: 2757-2760
- [7] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [8] USC/ISI, Los Angeles, CA. The NS simulator and the documentation[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>