

The Wireless Energy-Saving Scanning Strategy Based on Vacation Queuing System

Zhiqing Xiao^{1,2*}, Yidong Cui¹

¹State Key Lab of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing

²Wireless and Mobile Technology Research Center, Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing

Email: xzq.xiaozhiqing@gmail.com

Received: Apr. 18th, 2011; revised: Apr. 26th, 2011; accepted: May 12th, 2011.

Abstract: WLAN device, such as Bluetooth, on mobile terminal can be used to scan the surroundings to discover other peers. However, with energy limitations, the scanning actions must be well arranged to reduce power consumption. This paper proposes an energy-saving strategy that turns on and off the Bluetooth device at a configured time. The scenario of Bluetooth scanning is modeled as an M/M/1 vacation queue with specially impatient customers and startup expenses. In the M/M/1 queue, the terminal with Bluetooth device is the only server which scans its nearby customers, and the on-off state of Bluetooth device is indicated as vacation behaviors. The aim of the paper is to find the best vacation strategy. Simulations demonstrated that the best strategy depends on the intended error rate, startup time and expenses and many other factors. The performance of the multiple vacation strategy is satisfactory on most conditions.

Keywords: Energy-Saving; Vacation Queuing; Bluetooth; Environment Perception

基于休假排队系统的无线扫描节能策略

肖智清^{1,2*}, 崔毅东¹

¹北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京

²清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心, 北京

Email: xzq.xiaozhiqing@gmail.com

收稿日期: 2011年4月18日; 修回日期: 2011年4月26日; 录用日期: 2011年5月12日

摘要: 在一些环境感知的应用中, 移动终端的无线模块(如蓝牙)需扫描周围环境以发现其他设备。但这种行为非常耗能。提出了通过间歇性开关蓝牙模块以降低平均能耗的方法。将移动终端扫描的过程描述成一个具有启动时间费用和特殊不耐烦顾客的休假排队系统。在该排队系统中, 扫描周围环境的设备是服务员。节能扫描的算法旨在通过优化休假触发条件和休假结束条件, 以在保证一定的扫描效果的情况下耗能最小。仿真结果表明多重休假策略在大多数情况下能有效降低能耗。

关键词: 节能; 休假排队; 蓝牙; 环境感知

1. 引言

随着移动终端的普及, 各种终端应用层出不穷。当前, 有许多应用基于终端内置的无线通讯设备, 对无线环境进行感知。一些基于 GPS、蜂窝基站位置等技术的应用能够确定终端的地理位置, 另一些基于

WiFi、蓝牙(Bluetooth)技术的应用能够发现周围对等的终端, 并主动与它们交流, 如 MobiClique^[1]、SniffMob^[2]等。MobiClique 是一个利用无线移动交友平台。该平台中的终端通过蓝牙不断扫描周围的环境来寻找朋友及朋友的朋友。在文献[1]中进行了在稠密

ad-hoc 网络中的匹配实验，得到了在蓝牙设备总是开启时的设备发现率和匹配成功率。SniffMob 是一个基于 WiFi 和蓝牙的数据交换网络。在 SniffMob 系统中，终端扫描周围 WiFi 和蓝牙环境，并结合图论查找最佳的数据分享源^[2]。文献[3]对移动终端随机扫描传输数据的性能作了实际测试。它们都试图在随机条件下获得最好的性能。文献[4]考虑到了一个固定的服务员等待顾客进入系统的状况。但是，这些应用有一个共同的缺点：它们会消耗大量的电能。目前，有一些项目对环境感知的节能算法进行了研究。在 EnLoc 系统中，Ionut 等人提出了一种基于节能的定位方法。但是，他们只是在系统结构方面进行调整，没有提出一种普适的节能方案。

现在考虑这样的一个场景：一个移动终端使用蓝牙扫描其附近的移动终端。一旦它发现一个同伴(比如 Jenny)，这个移动终端能够与它交换地址本、收藏夹等信息。蓝牙设备扫描和通信时，会消耗大量宝贵的电量。如果一个终端不断的扫描，电池就很快被用尽。这既干扰到了用户的正常使用，又降低了移动终端及其电池的使用寿命。为了节约电量，则应该关闭蓝牙设备。但是，如果蓝牙设备不再运行，那么它就不能发现在它身旁经过的同伴。为了在保证有足够的概率发现目标的情况下尽量少的消耗能量，本文提出了一种通过间歇性开关蓝牙设备的节能方案。

近几年，排队论被广泛的应用于节能优化中^[5]。一个关于 Ad-hoc 网络的工程介绍了使用排队论分析类似网络的方法。同时，许多关于有中断的排队论模型的研究成果被发表^[6]。文献[7]对当前休假排队系统的数学研究方法进行了完整和详尽的描述，得到了很多数值结果。但是，它们都不是基于下文中提到的特殊不耐烦顾客的情形，也没有考虑到在能耗和匹配概率间的折衷问题。

2. 具有特殊不耐烦顾客的 G/G/1 排队模型

现在考虑引言中描述的场景：这个系统包括一个主要的移动终端(以下称为“服务员”)，它扫描周围环境，发现移动中的其他对等终端(以下称为“顾客”)。发现对等终端后，服务员会和发现的终端交换信息。在同一时刻，它只能与一个终端交换信息。所有的终端都在移动。考虑到客户的相对速度矢量是客户绝对

速度矢量与服务员速度矢量之差，固定服务员的位置并不会失去一般性。这时，假设服务员的扫描范围是一个以 R 为半径的圆。如图 1，客户 1、2 和 4 在服务员的通信范围内，客户 5 在通信范围外。客户 3 正在进入扫描范围，客户 6 正在移动出扫描范围。

这样的—个随机服务系统可以被刻画成 G/G/1 排队系统。当一个新的移动终端(如图 1 中的客户 3)进入服务员的通信范围时，一个顾客进入系统排队。当一个终端结束服务时，一个顾客离开系统出队。对于每个客户，其服务时间是不同的。例如，如果一个服务员希望其他人的通讯录，服务时间取决于通讯录的长度。

在这个服务系统中，客户是“特别”不耐烦的。客户被称为“特别”不耐烦是因为不但在队列中等待的客户会不耐烦，在正在被服务的客户也会不耐烦(如图 2)。如图 1 中的客户 6，无论它现在是否正在被服务，它都以相同的速率离开系统。

在这个系统中主要有以下两个指标：一、有多少移动终端成功匹配了；二、服务员需要消耗多少能量。第一个因素用成功匹配率 m 来表示。假设在时间 Δt 内，有 $N_{enter}(\Delta t)$ 个顾客进入队伍， $N_{served}(\Delta t)$ 个顾客接受完服务离开系统。这时，有

$$N_{miss}(\Delta t) = N_{enter}(\Delta t) - N_{served}(\Delta t)$$

其平均匹配成功率为

$$\begin{aligned} \bar{m} &= E[N_{served}(\Delta t)/N_{enter}(\Delta t)]\bar{m} \\ &= 1 - E[N_{miss}(\Delta t)/N_{enter}(\Delta t)] \end{aligned}$$

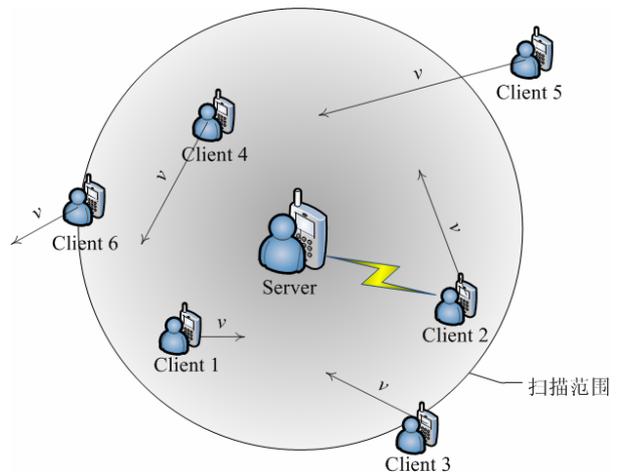


Figure 1. Mobile terminal searching surrounding environment
图 1. 移动终端搜索周围环境

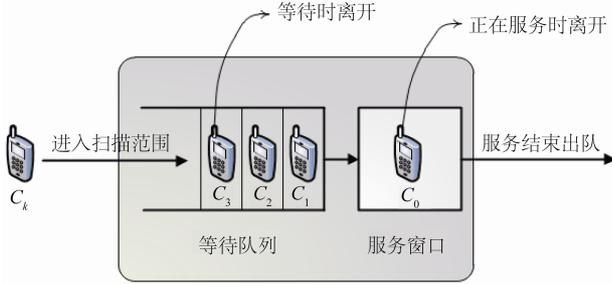


Figure 2. G/G/1 queueing model with special impatient customers
图 2. 具有特殊不耐烦顾客的 G/G/1 排队模型

第二个因素用平均耗能 e 来表征。蓝牙设备的能耗大小取决于它是否在工作。如果服务员没有服务任何终端, 那么单位时间的能耗为单位时间闲期能耗 e_i 。否则, 它需要更多的能耗。这可以用单位时间忙期能耗 e_b 来表示。如果蓝牙设备一直开着, 那么平均耗能就是在一段时间忙期耗能与闲期耗能的加权平均, 即 $\bar{e} = E[(t_b e_b + t_i e_i)/(t_b + t_i)]$ 。如果蓝牙设备需要打开和关闭, 那么开关一次所需要的能量为 e_{open} , 所需要的时间为 t_{open} 。(启动和关闭均被联合起来考虑是因为开启行为和关闭行为总是成对出现的。)这时, 平均耗能指数就和开关次数有关。假设在一段很长的时间内, 蓝牙设备开关 n_{open} 次, 其工作时总忙期长度 $T_b = \sum_{n_{open}} t_b$, 总闲期长度 $T_i = \sum_{n_{open}} t_i$, 休假总时间(不包括开启时间)为 T_v , 则平均耗能为 $\bar{e} = E[(T_b e_b + T_i e_i + n_{open} e_{open})/(T_b + T_i + T_v + n_{open} t_{open})]$ 。节能模型的优化目标, 就是找到一种休假出发策略和休假结束策略, 使得 \bar{m} 尽量大(或是足够大), 并使 \bar{e} 尽量小。

3. 系统性能理论分析

3.1. 无休假情况

显然, 为了达到最优的扫描效果, 蓝牙设备需要一直开启。这对应着服务员一直在岗的情况。这时,

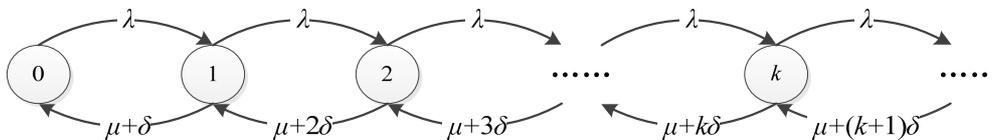


Figure 3. State transition diagram M/M/1 queueing model with special impatient customers
图 3. 具有特殊不耐烦顾客的 M/M/1 排队系统状态转移图

排队系统可以被刻画成一个生灭过程 $N(t)$ 。

对于一般的 G/G/1 排队系统而言, 队长分布、忙期分布等参量是很难获得的。这个系统的“特殊不耐烦”性使得由这些参量导出的匹配成功率和平均耗能值更难获得。我们只能在输入过程、服务时间、离开过程都是泊松过程的情况下求出以上参量的理论值。例如, 假设顾客的到达流是参数为 λ 的泊松过程, 服务时间是参数为 μ 的负指数分布, 所有的顾客以速率 δ 离开系统。(如图 3)

为了求出这时候的成功匹配率为 m_0 , 要求队长分布。假设 $p_k(t)$ 是 t 时刻队长 k 的分布。由状态转移图可得:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = (\mu + \delta) p_1(t) \quad (1)$$

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = \lambda p_{k-1}(t) + [\mu + (k+1)\delta] p_{k+1}(t) - (\mu + \lambda + k\delta) p_k(t) \quad k \geq 1 \quad (2)$$

在稳态时, 队长分布为:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{\prod_{j=1}^k (\mu + j\delta)} \left/ \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{\prod_{j=1}^k (\mu + j\delta)} \right) \right. \quad (3)$$

则 $m_0 = 1 - E[N_{miss}(\Delta t)/N_{enter}(\Delta t)] = 1 - \delta \sum_{k=1}^{\infty} k p_k$ 。为了获得平均耗能 e_0 , 需要构造一个生灭过程 $\tilde{N}(t)$ 来确定该系统忙期的概率分布。过程 $\tilde{N}(t)$ 与 $N(t)$ 的区别在于它的第一个状态是吸收的。在下列方程组中, $d\tilde{p}_0/dt$ 就是忙期的概率密度。

$$\frac{d\tilde{p}_0(t)}{dt} = (\mu + \delta) \tilde{p}_1(t) \quad (4)$$

$$\frac{d\tilde{p}_1(t)}{dt} = (\mu + 2\delta) \tilde{p}_2(t) - (\mu + \lambda + \delta) \tilde{p}_1(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\tilde{p}_k(t)}{dt} = \lambda \tilde{p}_{k-1}(t) + [\mu + (k+1)\delta] \tilde{p}_{k+1}(t) - (\mu + \lambda + k\delta) \tilde{p}_k(t) \quad k \geq 1 \quad (6)$$

闲期长度 t_i 服从参数为 λ 的负指数分布。但是，这个方程很难求出解析解。

3.2. 输入过程、服务间隔、不耐烦过程的多样性

实际上，输入过程、服务间隔、不耐烦过程和扫描方向图、时间、地点、人物、行为等很多因素有关。

输入过程和服务员所在的时间地点环境有关。在上下班时间的输入流要明显大于半夜三更时候的输入流，在单行道上的输入流要明显小于在十字交叉路口处的输入流。而且，由于地理位置的复杂性，其输入分布也不同。

不耐烦过程与客户在系统中停留时间的分布有关。客户在系统中停留的时间，与扫描范围、和客户运动轨迹和相对运动速度有关。

服务用户需要的时间与业务有关：如果要遍历客户们的通讯录，那么服务时间大致和通讯率长度成正比，服务时间分布取决于通信录的分布；如果要向客户们广播一个消息，那么服务时间是一个确定的值。

从终端用户的动作结合用户的使用习惯还可以很精确的估计这些过程的具体分布。一个用户每天都是在同一时候、同一地点上班下班、吃饭睡觉，在执行某一个特点动作时其外环境是大致相同的。带有加速度传感器的移动终端(服务员)可以更加当前移动终端的运动状况，从一个历史的统计结果中选出一个最接近的输入过程、服务时间和不耐烦过程作为当前情况的预测值。

另外，还可以根据对周围统计环境当前的统计状况来自适应的修正目前对各种过程参量的预测。试想，如果很长时间一个终端都没发现，这往往意味着在未来比较长的一段时间内不会有目标终端进入扫描圈。如果这时候的输入强度预测值明显过大，应将其减小。

3.3. 休假排队的节能策略分析

通过间歇性的关闭蓝牙设备，可以减少服务员的能耗。如果蓝牙设备被关闭了，我们称其“在休假”。一个在休假的服务员只会了解它放假前的系统情况。所以，诸如 N 策略休假排队等依赖于外部触发的可控排队策略是不可实现的。服务员重回岗位，涉及前文提到的启动时间 t_{open} 和启动能耗 e_{open} 。对于某种特定的休假策略 P ，在不同的参数下会有不同的成功匹配

率 m_p 和平均耗能 e_p 。上文已经提及，我们要使 m_p 尽可能大，平均耗能 e_p 尽可能小。显然， m_p 不会超过在没有休假的情况下成功匹配率 m_0 。但是由于启动能耗的存在， e_p 在某些情况下会比无休假时的平均能耗 e_0 大。这时，系统的总体性能会比不休假时还要差，休假策略失效。

目前有许多成熟的休假策略，如空竭休假和非空竭休假，闸门服务，有限服务，Bernoulli 休假策略，多重休假策略，增量休假策略，阈值休假策略等等^[8]。不同种类的休假策略在触发条件和结束条件上都不相同。虽然它们都用随机分解的方法来分析，但是分析其附加随机变量需要用到不同的数学工具。这十分复杂。所以，我们不一一从数学上来进行分析，我们采用仿真的方法来获得定量的结果。

4. 不同分布下休假策略的仿真和优化

我们使用 MATLAB，通过对不同输入过程、服务时间和不耐烦过程进行休假策略的仿真，来体现休假策略的有效性和不同分布对休假策略和参数的影响。第 I 种情况，就是 3.1 节提到的 M/M/1 排队系统。假设顾客的到达流是参数为 $\lambda = 3$ 的泊松过程。假设服务时间是参数为 $\mu = 2$ 的负指数分布。所有的顾客离开系统的速率分布相同，假设这个速率为 $\delta = 20$ 。

下面我们来考虑情况 II。如图 4，服务员利用全向天线进行蓝牙通信，其扫描方向图是一个正圆。这时，如果客户到达时间是一个泊松过程，那么客户进入扫描范围和离开扫描范围的过程就不是泊松过程。理由如下：假设各个客户的行走轨迹是有向直线，当用户在圆内的弦上可被服务。客户轨迹的弦心距满足一定分布(比如说是均匀分布)，客户运动速度的大小也满足一定分布(如均匀分布、截短高斯分布、三角分布或者是莱斯分布等)。对于这种情况，我们使用以下的仿真条件：服务员的扫描半径 $R = 10$ ，顾客出现的间隔服从参数为 $\lambda = 3$ 的负指数分布，成功完成服务需要的时间服从参数为 $\mu = 2$ 的负指数分布。客户相对于服务员运动的满足下列规律：顾客的路径是直线，这个路径的圆心距 d 满足 3~10 之间的均匀分布。客户从同一个方向运动(由于圆的对称性，这样假设并不失一般性)，其运动方向垂直于圆心距，且运动速度 v 满足 $A = 1.6$ ， $\sigma = 0.6$ 的莱斯分布(速度大小大约在

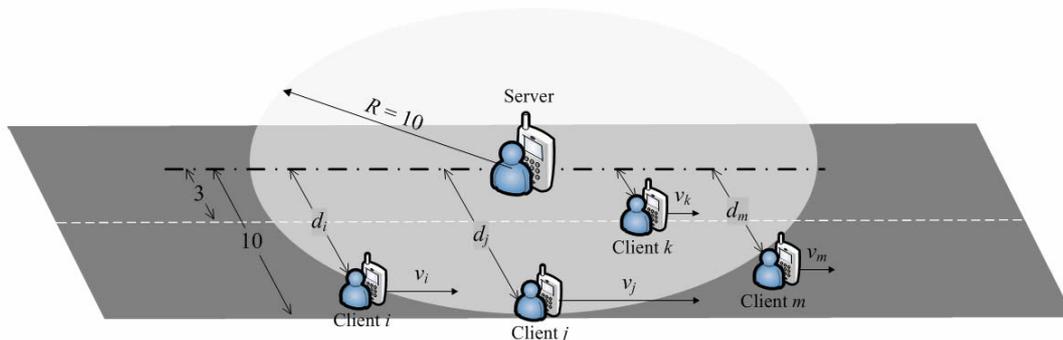


Figure 4. Simulation scene
图 4. 仿真场景

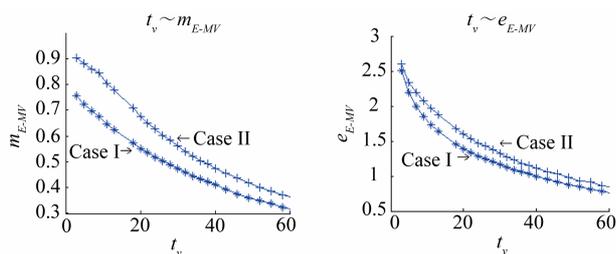


Figure 5. Matching rate and average energy consumption varying with vacation time
图 5. 匹配率和平均耗能随着休假时间变化图

1.5 ~ 2.5 之间)。这样的不耐烦分布比直接使用泊松过程更符合实际情况。

对于这两种场景，单位时间闲期能耗均为 $e_i = 1$ ，单位时间忙期能耗均为 $e_b = 3$ ，启动时间为 $t_{open} = 2$ ，启动能耗均为 $e_{open} = 10$ 。

如果不采用休假策略，经过仿真可得对于情况 I， $m_0^I = 0.835$ ， $e_0^I = 2.119$ ；对于情况 II， $m_0^{II} = 0.938$ ， $e_0^{II} = 2.252$ 。通过对多种休假策略的仿真和比较发现，空竭服务多重休假(Exhaust multiple vocation, E-MV)是较好的策略。在多重休假中，一旦系统内无顾客，服务员立刻开始一次长度为 t_v 的休假。如果结束一次休假时系统中仍无顾客，就接续一个休假，直到某次休假结束时系统中已有顾客等待。这时，服务员终止休假并开始接待顾客。这一休假策略曾广泛应用于最大限度地利用空闲时间设置辅助工作的各种场合。在仿真中，每次休假时间 t_v 是一个固定不变的值。对于不同的 t_v ，可以得到不同的 $m_{E-MV}(t_v)$ 和 $e_{E-MV}(t_v)$ 。

仿真的结果如图 5。它们的横轴表示休假时间 t_v (不包含开关时间)。左图是在不同情况下成功匹配率 m_{E-MV} 随着休假时间的变化情况。休假时间越

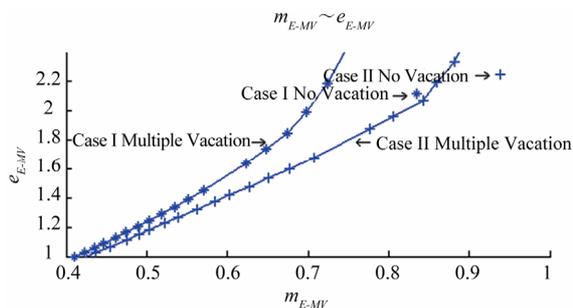


Figure 6. Average energy consumption varying with matching rate (The two isolated points is the case with no vacations)
图 6. 随匹配率变化所需要的平均耗能 (两个孤立点是无休假的情况)

大，成功匹配率越小。在给定指标 m_{E-MV} 的情况下，可以根据本图对休假时间进行配置。右图是在不同情况下平均耗能 e_{E-MV} 随着休假时间的变化情况。休假时间越大，平均耗能越小。在确定休假时间后，可以根据本图对平均耗能进行预测。

$m_{E-MV} \sim e_{E-MV}$ 图可以用来表示在保证匹配率 m_{E-MV} 的情况下所需要的最小 e_{E-MV} 。它可以用来评价系统的整体性能。从图 6 可以看出，采用空竭服务多重休假，能保证在匹配概率为原来一半的情况下，耗能减少约为原来的一半。

5. 结论

本文用有特殊不耐烦顾客的 G/G/1 系统对无线扫描场景进行了建模，提出了在一种休假排队节能策略。该策略能够在保证匹配概率的情况下，有效减少移动终端的能耗。仿真结果表明，采用多重休假策略，能保证在匹配概率为原来一半的情况下，耗能减少约为原来的一半。

参考文献 (References)

- [1] A.-K. Pietilainen, E. Oliver, J. Lebrun, et al. MobiClique: Middleware for Mobile Social Networking. In Proceedings of 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Online Social Networks, 2009-8.
- [2] E. Anderson, C. Phillips, H. Gonzales, et al. SniffMob: Inferring human contact patterns using wireless devices. In International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, 2009-6.
- [3] I. Constandache, S. Gaonkar, N. Saylor, et al. EnLoc: Energy-Efficient Localization for Mobile Phones. In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2009-4.
- [4] M. F. Neuts, M. F. Ramalhoto. Service model in which the server is required to search for customers. *Journal of Applied Probability*, 1984, 21(1): 157-166.
- [5] S. F. Yin, Y. Yin. Shortest Queue Time-Slot Adapting Algorithm Based on Average Reaching Times. In Proceedings of Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009: 417-420.
- [6] P. Kulkarni, M. Nazeeruddin, S. McClean, et al. Deploying Lightweight Queue Management for improving performance of Mobile Ad-hoc Networks. In International conference on Networking and Services, 2006: 102-102.
- [7] N. Tian, Z. G. Zhang. *Vacation Queueing Models—Theory and Applications*. New York: Springer, 2006.
- [8] 田乃硕. 休假随机服务系统[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.