

无线网络中具有信道感知的期望能耗最小化策略研究

黄荣喜¹ 王 淦² 谢天骁² 王高才²

(广西农业职业技术学院电子信息工程系 南宁 530007)¹

(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)²

摘 要 随着无线网络技术的快速发展,节省能耗已成为构建绿色无线网络的一个非常重要的课题。由于信道的时变特性,在无线通信中利用好的信道状态能够获得更高的能量利用率。从整个无线网络的数据传输能耗出发,提出一种基于最优停止理论的数据传输期望能耗最小化策略(E^2 CMS)。 E^2 CMS 策略延迟数据的传输直到找到最好的期望信道状态,同时考虑了最大传输延迟和给定的接收端功率。首先,构建具有 QoS 约束的能耗最小化问题;接着,通过最优停止理论证明 E^2 CMS 策略是一种纯粹的阈值策略;然后,通过逆向归纳法求解定点方程,以求出功率阈值;最后,在典型的小尺度衰落信道模型中进行仿真实验,将 E^2 CMS 策略与多种不同的传输调度策略进行对比。结果表明, E^2 CMS 策略具有更小的单位数据平均能耗,显著提高了网络性能。

关键词 无线网络,信道感知,最优停止理论,数据传输,能耗优化

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.025

Study on Channel-aware Expected Energy Consumption Minimization Strategy in Wireless Networks

HUANG Rong-xi¹ WANG Nao² XIE Tian-xiao² WANG Gao-cai²

(Department of Electronic and Information Engineering, Guangxi Agricultural Vocational College, Nanning 530007, China)¹

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)²

Abstract With the rapid development of wireless network technology, saving energy consumption has become a very important topic to build green wireless networks. Due to the time-varying characteristics of the channel, it is possible to obtain a higher utilization for energy by using the channel with good state in wireless communication. From the view of the data transmission energy consumption of the whole wireless network, this paper proposed the expected energy consumption minimization strategy(E^2 CMS) for data transmission based on the optimal stopping theory. The E^2 CMS delays the transmission of data until the best desired channel state is found, taking into account the maximum transmission delay and the given receiver power. This paper first constructed an energy consumption minimization problem with quality of service constraints. Then it proved that the E^2 CMS is a pure threshold strategy by the optimal stopping theory, and obtained the power threshold by solving a fixed-point equation with backward induction. Finally, it conducted simulations in a typical small-scale fading channel model and compared E^2 CMS with a variety of different transmission scheduling strategies. The results show that E^2 CMS has smaller average energy consumption per unit of data and significantly improves the network performance.

Keywords Wireless networks, Channel awareness, Optimal stopping theory, Data transmission, Energy consumption optimization

1 引言

近年来,信息和通信技术发展迅速,该行业的碳排放量也急剧增加,预计在未来二十年内碳排放量将增一倍^[1]。因此,信息和通信技术领域中的网络节能已成为一个亟需解决的、对环境和经济发展具有重要影响的研究课题^[2]。在无线环境

中,信道状态是随时间变化而快速波动的。由于信道的时变特性,如果在无线通信中总是动态地利用信道的最好状态,即在信道状态最好时传输数据,那么无线网络的能量利用率将得到极大提高。

无线信道的衰落可以分为大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落按原因分为路径损耗、阴影效应;而小尺度衰落的原因

到稿日期:2017-08-09 返修日期:2017-11-21 本文受国家自然科学基金:移动环境下基于博弈论的能量感知协同内容分发策略研究(61562006),广西自然科学基金(2016GXNSFBA380181)资助。

黄荣喜(1979—),男,硕士,讲师,主要研究方向为物联网技术及应用;王 淦(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为移动网络能耗优化, E-mail:7482227@qq.com(通信作者);谢天骁(1990—),男,硕士生,主要研究方向为移动网络性能评价;王高才(1976—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机网络技术、系统性能评价和随机方法。

因是多路径问题^[3]。大尺度衰落的衰落模型通常被模拟为对数正态分布,而小尺度衰落模型被模拟为 Rayleigh 分布或 Rician 分布。在本文研究的无线网络系统中,假设无线链路都能够侦测到其他链路的通信,且所有的链路使用随机接入竞争同一信道,因此在每个时刻至多只有一条链路能够成功传输数据。节点在一次成功的信道竞争后,获得的信道的状态信息(Channel-State Information, CSI)是已知的。由于信道衰落,竞争成功的链路的信道状态可能是好的或者较差的,如果在较差的信道上传输数据,为了满足接收终端的接收功率要求,则需以一个较高的功率发送数据,导致能量利用率下降。一个合理的做法是让这条链路放弃这次传输机会,并且让所有的链路重新竞争信道,使重新竞争信道后成功获得信道的链路在一个更好的信道状态下传输数据。因为不同链路在不同时间经历不同的信道状态变化,在进行进一步的信道侦测后,链路有可能获得状态更好的信道。因而可以利用无线网络用户的多样性和信道波动的多样性来优化网络性能。另一方面,每多一次的信道侦测将导致数据延迟发送,而这个延迟的时间原本是用来传输数据的。显然,这是在更好的信道状态能提高网络性能和继续侦测信道造成传输延迟之间进行权衡。考虑到这一问题,需要一个最优停止规则来进行信道侦测,以最小化网络能耗。本文系统地描述了基于最优停止理论的数据传输期望能耗最小化策略。

与文献[10]中的调度策略不同,本文所提出的调度策略 E²CMS 是从整个网络的数据传输能耗出发研究节能问题。文献[9]也是从网络的角度提出调度策略,但其研究的是对网络吞吐量的优化,本文则从网络的能耗出发,优化整个网络的性能。本文提出的策略采用了一个有限范围的最优停止理论并且考虑了 QoS 约束,在实际的通信网络中,这是一个更为合理的假设。此外,本文将 E²CMS 策略表示成一种分布式算法,该算法的复杂度并不会很高,它最主要的计算只需在开始阶段执行一次;E²CMS 策略还考虑了链路竞争信道的能量消耗,这通常是不能被忽略的。因此,E²CMS 策略很好地权衡了获得更好传输信道状态的能效和继续侦测信道直到最大侦测上限的能耗成本。

本文第 2 节介绍相关工作;第 3 节介绍系统模型及相关理论;第 4 节讨论基于最优停止理论的期望能耗最小化优化策略;第 5 节进行仿真实验并对实验结果进行分析;最后总结全文并给出下一步的研究工作。

2 相关工作

近年来,无线通信网络中的节能问题引起了越来越多研究者的兴趣。研究者们针对开放系统互连参考模型的不同层提出了不同的方法来实现无线网络节能。一些研究工作关注系统的睡眠-唤醒机制,以减少无线系统能耗。文献[4]将睡眠调度机制应用于无线传感器中,针对不同类型的应用环境,提出了 4 种睡眠调度机制。还有一些研究工作通过优化路由规划过程来减少能耗。文献[5]利用跨层信息交换的优点,引入基于能量消耗的目标函数,设计基于 Dijkstra 算法的节能路由算法,并将其应用于传统路由或机会路由中以节省能耗。然而,大多数研究工作集中在媒体访问控制层和物理层。文献[6]在无线网络中提出了一种有效的数据速率自适应机制,

使用统计学准则(如通过发送成功/失败的数据包数目和 RTS/CTS 控制帧)来判断信道质量以调整数据传输速率,从而实现数据的高能效传输。文献[7]在移动自组织网络中关于网络层和媒体访问控制层提出了一种节能的跨层设计,以降低能量消耗和延长网络生命周期。仿真结果表明,此跨层设计比现有的协议有更好的包交付率、更大的吞吐量、更低的数据传输消耗和更高的网络寿命。文献[8]在具有严格能量限制与延时约束的无线网络环境中提出了一种基于博弈论的机会传输策略,此机会传输策略通过随机博弈论获取最优功率阈值,在时变的无线信道中选择在信道质量较好的时刻传输数据,以降低由于信道错误和分组冲突造成数据传输失败而产生的能量消耗。在许多无线网络(如无线自组织网络)中,对于能耗的优化,由于有效链路的同信道干扰和衰落信道的时变特性,仍然存在许多能够改进的地方。

利用最优停止理论研究无线网络能耗优化问题也受到了研究者的广泛关注。文献[9]在无线自组网中研究联合信道探测和分布式调度过程,提出了一种分布式机会调度策略,在更好的信道条件下吞吐量的增加与进一步的探测成本之间得到较好的权衡。文献[10]在单设备单信道场景中,考虑到数据传输具有最大延时,根据信道具有时变的特性,使发送终端通过最优停止理论获取各个侦测时刻的最优功率阈值,通过对比当前信道传输功率与功率阈值来选择最优时刻进行数据传输以节省传输能耗。文献[10]假设发送端在任何时候都具有可传输的数据,而文献[11]则假设发送终端有固定的数据生成速率,其研究单设备使用单信道的系统中数据传输的能量消耗问题,发送终端通过最优停止理论获取各个侦测时刻的最优功率阈值,通过对比当前信道传输功率与功率阈值来选择最优时刻进行数据传输以节省传输能耗。

本文研究的问题是为无线设备的通信找到最优时刻以最小化能量消耗,同时考虑数据最大传输延时的约束。我们发现,在许多科学领域(如统计学、经济学和数理金融学,特别是通信学)中,许多问题都是选择最佳时机采取某种行动以最大化期望收益或最小化期望成本的问题。最优停止理论^[15]是在依次观察的随机变量中选择最佳时间做出决策的问题。最优停止规则问题由以下两个部分定义:

- 1) 已知联合分布的随机变量序列 $\{X_1, X_2, \dots\}$;
- 2) 实值报酬函数序列 $\{y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)\}$ 。

根据上面的定义,最优停止问题可以描述为:决策者观察随机变量 $X_n = x_n$ 序列,在每一步 n 都可以选择停止观察和接受已知的奖励 $y_n(x_1, \dots, x_n)$ 或继续下一步观察 X_{n+1} 。最优停止规则是选择最佳时间来停止观察,以最大限度地提高期望的报酬(或最小化期望成本),这意味着决策者必须确定停止时间 $0 \leq N \leq \infty$,从而最大化 $E[Y_N]$ 。 $Y_N = y_N(x_1, \dots, x_N)$ 表示在 N 停止的随机报酬, $E[\cdot]$ 代表对应的期望值函数。由定义可知,对变量的观察可以无限继续下去,但许多实际问题都有一个已知的观察数量上限 N_{\max} (停止问题的范围),在这个范围内观察必须停止,这些问题被称为有限范围的停止问题,其是一般问题中设 $y_{N_{\max}+1} = \dots = y_\infty = -\infty$ 的特殊情况。理论上,这种类型的问题可以通过从阶段 N_{\max} 向初始阶段 0 的逆向归纳法来解决。最优停止理论能够高效地解

决许多问题,如文献[16]所述,其中最出名的是秘书问题和停车问题。

3 系统模型

本文的主要目标是 minimized 无线网络的数据传输能耗。为了达到这个目标,利用信道的良好时机来构建一个分布式机会传输调度策略。在一个多用户的无线网络(如无线 Ad Hoc 网络)的通信系统中,有 M 条链路(见图 1),节点间的相互通信会产生干扰,节点通过载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)机制对信道进行访问。本文的分析主要集中在整个无线网络中无线链路的高能效通信。

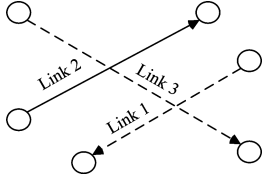


图 1 网络系统模型

Fig. 1 Network system model

本文系统模型只考虑小尺度衰落(Small-Scale Fading, SCF)对通信链路的影响,并假设 QoS 要求在通信中竞争信道成功的链路的发送终端必须在规定的时间范围内发送数据,发送终端发送数据的延迟时间不能超过规定的时间上限,并且传输速率是恒定的,即接收终端的接收功率是固定的。我们规定在通信环境中总有数据可以被传输,即当终端设备决定传输数据时总有可以获得的数据,这些数据可以是存储在设备内存中的或是设备能够即时获取到的。

假定无线信道特性按照一个已知的长期统计分布函数进行波动。信道的概率密度函数(PDF)可以通过非参数的密度估计技术进行估计,估计技术能够通过测量数据直接估计 PDF 而不用事先知道潜在的分布规律^[13]。对于特殊的区域分散环境,信道的长期概率密度函数可通过统计的射线跟踪方法估计。同时,假设发送终端能够感知信道的瞬时 CSI,从而知道当前的信道状态是良好的还是较差的。这些信道信息可从接收端定期传输来的训练信号中得到,即从原点发送一种可被终点识别的短时信号,然后终点通过测量信号功率来估计信道,这种方法被称为基于导频或训练的信道估计^[14]。

为了方便,将无线网络中能够成功获取一条信道的随机竞争过程称为一轮信道侦测,将信道侦测的各个轮次表示为 $j=0,1,\dots,m$,也将它称作时隙。用 τ 表示一条链路连续两次竞争信道的最小时间间隔,即时隙。规定 τ 大于信道的相干时间,相干时间表示在此时间中信道状态是保持不变的。显然一次成功的信道竞争所用的时隙数目(定义为 K)是一个几何随机变量,即 K 服从概率 p_s 的几何分布,从而可以得到一轮的信道侦测对应的随机持续时间为 $K\tau$,期望为 τ/p_s 。

定义 $s(n)$ 表示在第 n 轮信道侦测中成功竞争到信道的链路, $P_{1,s(n)}$ 表示其相应的数据发送功率。在无线通信中, $P_{n,s(n)}$ 的大小取决于随时间变化的信道状态,因此它是一个随机变量。根据无线通信中的衰落信道,假设在持续时间 T 内 $P_{n,s(n)}$ 保持不变,即在传输数据的过程中信道的状态是不变

的, T 为信道的数据传输持续时间,并且小于或等于信道的相干时间。

此外,假设在一次通信中可接受的信道侦测最大数目为 m ,可得发送终端能够延迟数据发送的时间上限为 D_{\max} , $D_{\max} = K_1\tau + K_2\tau + \dots + K_m\tau$,则本文所研究的问题为在时间范围 $[0, D_{\max}]$ 内决定什么时刻开始传输数据是最佳的。因此,根据最优停止理论,该问题为找到能最小化能耗的停止时刻 N (实时持续时间为 $N \times \sum_{i=1}^N K_i\tau$),这个持续时间是调度策略延迟本次通信的时间,将其定义为调度延时。如果延迟的时刻到达 D_{\max} 并且数据还未被发送,那么此时无论信道状态如何,无线设备都将在 $t = D_{\max}$ 时发送数据。在连续的两次信道侦测中发送终端的通信模块还可以被设置成空闲或睡眠模式来节省更多的能量。

为了对信道侦测和数据传输调度有一个更具体的认识,在图 2 中描述了一个 N 轮的信道侦测和一次数据传输的实例情况。第一轮信道侦测所用的时间为 $K_1\tau$,此时链路 $s(1)$ 的传输功率 $P_{1,s(1)}$ 是较大的,表明这是一个较差的信道状态,使得 $s(1)$ 放弃了这次传输机会并让所有的链路重新竞争。第二轮信道侦测的时间为 $K_2\tau$,因为 $P_{2,s(2)}$ 也较大, $s(2)$ 又放弃了这次数据传输的机会。这样持续 N 轮信道侦测后, $s(N)$ 进行了数据传输,因为此时的信道状态是较好的, $P_{N,s(N)}$ 较小,即所需能耗较少。

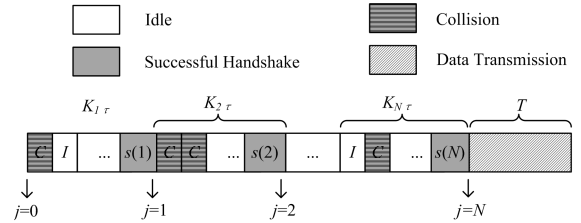


图 2 信道侦测和数据传输实例

Fig. 2 Instance for channel detection and data transmission

下面证明每轮信道侦测上传输功率的独立性假设是合理的。

假设: $\{P_{n,s(n)}, n=1,2,\dots\}$ 是独立的。

实际上,上述条件在许多实际应用场景中是成立的,原因如下:1)在一个多用户无线网络中,由于发生冲突,链路获取信道需要经历多个时隙。 $q_s(k)$ 表示同一条链路连续两次竞争信道成功的概率, k 表示时隙数目。则有:

$$q_s(k) \stackrel{\Delta}{=} \Pr(s(n+1) = s(n)) \\ = \sum_{m=1}^M \frac{p_{s,m}}{p_s} (1-p_s)^k p_{s,m} = \frac{(1-p_s)^k}{p_s} \sum_{m=1}^M p_{s,m}^2$$

其中, $p_{s,m}$ 表示链路 m 成功竞争到信道的概率,约为 $\frac{1}{eM}$ 。通过计算可得出 $q_s(k)$ 是相当小的,特别是在链路的数目很大时。2)当原因 1)所述的情况发生时,两次成功的信道竞争对应的信道状态彼此独立这一假设仍然是合理的,因为两次连续的信道竞争相隔的时间大于信道的相干时间。

基于香农公式:

$$R = W \log_2 \left(1 + \frac{g \cdot P}{N_0 W} \right) \quad (1)$$

其中, R 是信道容量, W 是信道带宽, g 是信道增益, P 是传输

功率, N_0 是噪声功率谱密度。对于一个给定的接收功率(在 QoS 的约束下,发送终端的传输速率要求不变),传输功率 P 与信道增益 g 成反比例。因此,当信道状态较好时,所需的传输功率会减少,能耗也会减少。

4 期望能耗最小化优化策略

4.1 最小化问题

使用 E_N 表示无线网络数据传输能耗,则优化问题可以表示为选择一个停止规则 $1 \leq N \leq m$ 来最小化网络的期望能耗 $E[E_N]$ 的最优停止问题。为了让模型更符合实际情况,假设发送终端每次进行信道竞争的过程中都会消耗一定的能量,定义为 E_c [17]。因此,网络中总的数据传输能耗 E_N 是信道侦测消耗的总能量与在时间 T 中传输数据的功率消耗 $P_N T$ 的总和, E_N 可以表示成:

$$E_N = P_N T + N E_S = \frac{(2^{\frac{R}{W}} - 1)}{g_N} N_0 W T + N E_S = \frac{A}{g_N} T + N E_S \quad (2)$$

其中, $E_S = K \sum_{m=1}^M I_m E_c$, 表示一轮信道侦测消耗的能量; I_m 取值为 1 或者 0, 表示链路是否参与信道竞争; $A = (2^{\frac{R}{W}} - 1) N_0 W$, 其在 QoS 约束下是恒定的, 代表接收端的接收信号功率。则最优停止规则是通过每轮侦测信道的增益序列 g_N 和能耗序列 E_N 推导出来的。

上文已经把无线网络中的数据传输能耗问题转化为期望能耗最小化问题, 并且建立了相应的数学模型。在对该问题进行求解之前, 首先证明提出的期望能耗最小化问题存在最优解。本文给出以下命题。

命题 1 式(2)存在最优停止规则。

证明: 根据文献[15]可证明当下列两个条件满足时, 最优停止规则存在:

$$\begin{cases} C1: E[\inf_n E_n] > -\infty \\ C2: \lim_{n \rightarrow \infty} \inf E_n \geq E_\infty \quad \text{a. s.} \end{cases}$$

下面分别考虑这两个条件。

上文已经得知 $N \leq m$ (信道最大侦测次数)。此外, 随机变量 g_n 是独立同分布且所在域都是有限值。因此 $E_n > -\infty$ 成立。条件 $E[\inf_n E_n] > -\infty$ 满足。

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $N E_S \rightarrow \infty$ 。并且, 随机变量 g_n 是独立同分布且所在域都是有限值, 于是:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf E_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf \left(\frac{A}{g_N} T + N E_S \right) = \infty$$

显然 $E_\infty = \infty$ 。因此, 条件 $\lim_{n \rightarrow \infty} \inf E_n \geq E_\infty$ 满足。证毕。

$$P_{th,j}^* = \begin{cases} \frac{A_{m-j}}{T} = \int_0^{P_{th,j+1}^*} p dF p + P_{th,j+1}^* - P_{th,j+1}^* F p(P_{th,j+1}^*) + \frac{E[I_m] M E_c}{p_s T}, & j=1, \dots, m-1 \\ P_{\max}, & j=m \end{cases}$$

当 $j=m$ 时, $P_{th,m}^* = \frac{A_0}{T} = P_{\max}$ 。最优多阈值策略可以表示为下面的功率阈值向量:

$$\vec{P}_{th}^* = [P_{th,1}^*, \dots, P_{th,m}^*] \quad (6)$$

因此有以下命题。

命题 2 最优功率阈值 $P_{th,j}^*$ 随着时刻 j 的递增而增大

4.2 多阈值策略

链路在时刻 j 获得信道状态后, 必须决定这个时刻是否是传输数据的最佳停止时刻, 而是否停止或继续侦测则取决于在未来时刻是否有更好的信道状态期望。有限范围的问题通常可以通过逆向归纳法从最后阶段追溯到初始阶段来解决, 而上节提到的最优停止规则则可通过发送终端在每个阶段 j 与阈值序列相比较然后决定是传输数据或继续侦测来推导出。下面给出的函数代表在前面已经侦测了信道 $G_1 = g_1, \dots, G_j = g_j$ 在特定时刻 j 时的最小能耗成本。

$$V_j^{(m)} = \min\{P_j T, A_{m-j}\} + E_S, j=1, \dots, m \quad (3)$$

其中, $A_{m-j} = E[V_{j+1}^{(m)} | F_P]$ 表示继续进行信道侦测能够获得的期望成本。可以看出, 式(3)是用停止在时刻 j 获得的成本 $P_j T$ 和继续使用最优停止规则对时刻 $j+1$ 到时刻 m 获得的期望成本进行比较, 并且考虑继续在每个阶段侦测所需的侦测能耗成本 E_S ; A_{m-j} 项只取决于要继续侦测的时刻数目 $m-j$ 。因此, 最优停止规则是: 在时刻 j , 如果 $P_j T \leq A_{m-j}$, 则发送终端停止侦测并传输数据, 反之则放弃这次信道传输机会并继续进行信道侦测。最优停止规则意味着在每个时刻 j 都有一个传输功率阈值 $P_{th,j} = (A_{m-j})/T$ 。本文所提到的“最优”是指如果无线网络在对某一轮的信道侦测后停止了侦测, 那么表明它认为即使继续侦测信道直到最大侦测次数所能获得的系统能耗成本不会小于此次停止所能获得的成本, 因此对于无线网络, 本次停止能够在整个信道侦测过程中获得最小的能耗成本, 即是最优的。

无线系统在某一时刻获得的即时能耗成本是信道侦测获得的信道状态和侦测次数状态的客观反映, 而继续进行下一次信道侦测能够获得的期望能耗成本则是根据当前的信道状态和侦测次数动态计算而得到的。用 P_{\max} 表示发送终端的射频功率放大器的最大输出传输功率, $F_P(p)$ 表示相对于 P_{\max} 的传输功率累计分布函数(CDF)。为了保证最大的传输延迟(调度延时)为 D_{\max} , 在时刻 $j=m$, 设 $A_0 = P_{\max} * T$ 。通过逆向归纳法求解式(4)可计算出各个阶段的 A_{m-j} :

$$\begin{aligned} A_{m-j} &= E \min[PT, A_{m-j-1}] + E[E_S] \\ &= \int_0^{\frac{A_{m-j-1}}{T}} p T dF p + \int_{P_{\max} \frac{A_{m-j-1}}{T}}^{A_{m-j-1}} A_{m-j-1} dF p + \\ &\quad \frac{E[I_m] M E_c}{p_s}, j=1, \dots, m-1 \end{aligned} \quad (4)$$

根据提出的模型, 最优停止策略要求找出每个时刻的最小化期望能耗的阈值。根据下式可以容易地计算出相应的最优阈值 $P_{th,j}^*$:

$$P_{th,j}^* \leq P_{th,j+1}^*, \forall j=1, \dots, m-1 \quad (7)$$

证明: 上式等价于 $A_{i+1} \leq A_i, \forall i=0, \dots, m-2$ 。

首先, 假设 $A_1 > A_0$, 那么 $A_1 = E \min[PT, A_0] + E[E_S] > A_0 = P_{\max} * T$, 则有 $P_{th,m-1}^* > P_{th,m}^* = P_{\max}$, 显然这是不合理的。

因此 $A_1 \leq A_0$, 那么可得到 $A_2 = E \min[PT, A_1] + E[E_S] \leq$

$E \min[PT, A_0] + E[E_s] = A_1 \leq A_0$ 。

同理,继续递归有 $A_{i+1} \leq A_i, \forall i=0, \dots, m-2$ 。证毕。

因此,只要时刻 j 增加,功率阈值就随着增加,即随着侦测次数的增加,就会越来越接近最大侦测次数,能够获得最小传输功率的期望就会减少。这是因为确保在最大传输延迟 D_{\max} 时,最后的功率阈值为最大传输功率 P_{\max} ,停止侦测是一个确定性事件。计算出每个时刻的功率阈值后,我们将功率阈值与当前发送终端所需的传输功率 P_j (由当前信道状态和接收终端的 QoS 约束计算得出) 进行比较,从而调度数据的传输。期望能耗最小化策略 (Expected Energy Consumption Minimization Strategy, E^2 CMS) 对各个时刻 $j=1, \dots, m$ 可表达成下面的条件表达式:

如果 $P_j \leq P_{th,j}^*$ \rightarrow 在 j 时刻传输数据

否则 \rightarrow 延迟

将期望能耗最小化策略 (E^2 CMS) 表示成算法的形式,如算法 1 所示,算法输入为最大侦测次数 m 、链路数目 M 、传输功率累计概率函数 $F(p)$ 、最大传输功率 P_{\max} 、传输时间 T 等,输出为最优传输功率 p' 。如果执行算法一次,那么其最多比较的次数为 m 次,因此算法的时间复杂度为 $O(m)$,有较高的执行效率。

算法 1 E^2 CMS

```

Input: m, M, F(p), P_max, T, etc. /* 最大侦测次数,链路数目,传输功率 CDF,最大传输功率,传输时间等 */
Output: p' /* 最优传输功率 */
Begin
  P_th^* ← A_i/T /* 计算功率阈值向量 */
  p' ← 0 /* 初始化传输功率 */
  stopped ← false /* 还未停止 */
  for 1 ≤ j < m do /* 侦测 */
    if (p_j ≤ P_th,j^*) then
      p' ← p_j, stopped ← true;
      break;
    endif /* 停止侦测并发送数据 */
  endfor
  if (!stopped) then /* 未找到最优传输功率 */
    p' ← P_m
  endif
Return p'

```

5 仿真结果和讨论

上文使用最优停止理论为无线网络中数据传输的能耗最小化问题提出了理论方法。本节评估 E^2 CMS 策略的性能,给出 E^2 CMS 策略在不同场景中的仿真模型、评估指标和数值结果,并且将 E^2 CMS 策略与其他一些调度策略进行对比,得到仿真测试结果,以证明和验证本文的理论研究。

5.1 仿真模型和评估指标

为了从数值上评估 E^2 CMS 策略,在 MATLAB 中进行扩展仿真实验,同时只考虑小尺度衰落对网络中无线链路的影响。

在仿真实验中假设数据传输的最大延时为 D_{\max} ,且在网络的节点中总是有数据可以传输。在所有的仿真实验中,使用固定的或者懒惰的移动节点,这意味着它们的环境不会显著地影响信道的累积分布函数(CDF)。

如前文所述,假设一个信道的 CDF 是已知的,并且其对 CSI 的感知可以通过周期性的训练信号获得。结合接收终端的 QoS 要求,可以得到对应于信道 CDF 的传输功率的累积分布函数 $F_P(p)$ 。关于信道的衰落,考虑下面常见的两种情况:1) Rayleigh 信道衰落;2) Rician 信道衰落。我们将会给出仿真结果是如何受到信道特性影响的。此外,链路竞争信道所需的能耗用 E_c 表示,链路竞争信道的能耗远小于链路传输数据所用的能耗。通过特殊的无线设备的测量技术能够计算 E_c 的精确值,在仿真实验中,我们探讨 E_c 的不同取值对调度策略性能的影响。

E^2 CMS 策略最主要的评价指标是平均功率消耗和平均吞吐量。另一个关键指标是单位数据平均能耗,用来衡量数据传输时系统是否高效节能,该指标越低,系统的能效就越高。单位数据平均能耗的单位是焦每兆字节,即瓦特每兆字节每秒,计算公式如下:

$$\text{单位数据平均能耗} = \frac{\text{平均功率消耗}}{\text{平均吞吐量}} \quad (8)$$

数据传输的平均功率消耗的计算公式为:

$$PC = \frac{P_N T + NE_s}{\sum_{i=1}^N K_i \tau + T} \quad (9)$$

平均吞吐量的计算公式为:

$$THR = \frac{RT}{\sum_{i=1}^N K_i \tau + T} \quad (10)$$

在给出 E^2 CMS 策略的数值结果之前,给出如下 5 种数据传输优化调度策略来与 E^2 CMS 策略进行对比。这些调度策略是基于简单的统计(通过一些长期的统计方法)或者是其他的最优停止问题在传输延迟上的解决方法,是从不一样的决策角度考虑而得出的。

(1) 确定性传输调度策略 (Deterministic Transmission Scheduler, DTS): 这是一个非常简单的方法,在一个不变的等距离时刻上调度数据的传输,即链路每隔 D_{\max} 传输数据。尽管这是一个简单且基本的调度策略,但作为参考是很有必要的。

(2) 随机传输调度策略 (Random Transmission Scheduler, RTS): 与 DTS 不同,这个策略不会使无线链路在规定的时刻进行数据传输,而是在时间范围 $[0, D_{\max}]$ 内的一个随机时刻传输数据。

(3) 概率传输调度策略 (Probabilistic Transmission Scheduler, PTS): 一个比较合理的做法是,如果找到小于当前功率值 p_j 的功率值的概率小于给定阈值,则链路不应该延迟数据的传输。因此,这个策略可表达成下面的条件语句:

如果 $\Pr[P < p_j] < \text{阈值}$ \rightarrow 传输

否则 \rightarrow 延迟

(4) 平均功率传输调度策略 (Average Power Transmis-

sion Scheduler, APTS):此策略是基于过去侦测的传输功率平均值与当前传输功率值 p_j 的对比。具体如下:

如果 $p_j < \text{average}_{v_i \in [1, j-1]}(p_i) \rightarrow$ 传输

否则 \rightarrow 延迟

(5) 最小功率传输调度策略 (Least Power Transmission Scheduler, LPTS):这是基于上文提到的经典的最优停止问题——秘书问题而提出的调度方法。根据秘书问题,对我们的问题做一个简单的调整,可得出优化策略为发送终端首先获得最大传输延时 D_{\max} 的 37% 时长内的最小传输功率 P_{\min} ,然后在接下来 63% 时长内不断侦测信道,计算当前传输功率,若小于 P_{\min} 则传输数据,否则继续侦测。可表示成如下形式:

如果 $j < 0.37 * m \rightarrow$ 延迟
 否则,如果 $p_j < p_{\min} = \min_{v_i \in [1, j-1]}(p_i) \rightarrow$ 传输
 否则 \rightarrow 延迟

5.2 仿真结果及分析

5.2.1 瑞利衰落信道

无线通信信道受到瑞利 (Rayleigh) 衰落, Rayleigh 信道衰落模型的信道增益概率密度函数 (PDF) 如下:

$$f_G(g) = \frac{g}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{g^2}{2\sigma^2}\right), g \geq 0 \quad (11)$$

结合式 (1) 能够容易地得出传输功率相对最大功率 P_{\max} 的标准化累积分布函数 (CDF) 为:

$$F_P(p) = \frac{\exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2 p^2}\right)}{\exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2 P_{\max}^2}\right)} \quad (12)$$

其中, $p(g) = \frac{A}{g}$, A 由式 (2) 给出。

本文指出, E^2 CMS 算法通过最优停止理论获得链路竞争到信道后传输数据的最优功率阈值, 该最优功率阈值依赖信道分布。这是符合实际情况的, 因为在实际应用中, 信道分布可以通过非参数的密度估计技术进行估计, 估计技术能够通过测量数据直接估计概率密度分布。对于特殊的区域分散环境, 信道的长期概率密度函数可通过统计的射线跟踪方法估计。

E^2 CMS 算法以降低平均能耗为目标, 通过链路的信道分布计算传输数据的传输功率期望值, 从而获得其最优传输功率阈值。若信道分布的估计误差相比于传输功率期望值产生的误差小, 则对算法性能的影响较小。

设 $A = 0.5 \text{ W}$, 最大传输功率 $P_{\max} = 5 \text{ W}$, 时隙周期 $\tau = 0.10 \text{ s}$, 传输持续时间 $T = 0.09 \text{ s}$, 链路数目 $M = 15$, 竞争信道能耗 $E_c = 1 \times 10^{-8}$, 链路竞争信道成功的概率 $p_s = \exp(-1)$ 。首先研究最大侦测数目 m 对网络能耗的影响。

从图 3 可以看出, 当最大的侦测数目 m 增大时, 无线网络系统中的平均功率消耗和单位数据平均能耗会越来越低。这是合理的, 因为在本文的最优停止方案中, 当侦测数目增大时, 找到所期望的最优值的机会将增大。此外, 对于 $m \geq 12$, 网络的平均功率消耗和单位数据平均能耗都是较低的并且趋

于稳定, 说明为了获得更高的网络能效, 最大侦测次数需要大于 12。

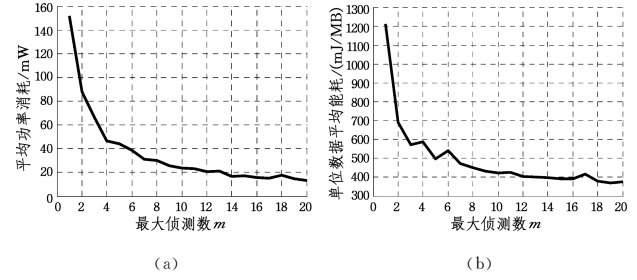


图 3 平均功率消耗、单位数据平均能耗与最大侦测次数的关系
 Fig. 3 Relationship of average power consumption, average power consumption of per/unit and number of maximal detection

另外, 需要特别指出的是: 图 3 比较了不同最大侦测次数 m 时的单位数据平均能耗值。图 3 的单位数据平均能耗曲线表明: 当 m 小于 3 时, 单位数据平均能耗值较大; 当 m 超过 4 时, 单位数据平均能耗值迅速减小。这充分证明了选择信道质量良好时传输数据能极大地节省能耗。如果竞争到信道的链路直接发送数据, 那么链路在信道质量较差时传输数据的机会增大, 单位数据平均能耗值也将增大。然而, E^2 CMS 算法的关键是侦测信道质量, 选择在信道质量良好时发送数据, m 值较小则减少了信道质量的选择机会, 从而削弱了 E^2 CMS 算法的优势, 失去了 E^2 CMS 算法的意义。同时, 实际网络中传输的数据也能够容忍一定的延时。因此, E^2 CMS 算法需要将 m 的值设置在延时约束范围内, 从而实现满足延时要求下的能耗优化目标。实际上, 当 m 超过 7 时, E^2 CMS 算法的能耗优化效果优于其他传输算法。

我们研究了网络中的链路数目 M 对网络能耗的影响。所使用的无线网络场景参数为: $A = 0.5 \text{ W}$, $P_{\max} = 5 \text{ W}$, $\tau = 0.10 \text{ s}$, $T = 0.09 \text{ s}$, $m = 15$, $E_c = 1 \times 10^{-8}$, $p_s = \exp(-1)$ 。

图 4 给出了无线网络中链路的数目对系统平均功率消耗和单位数据平均能耗的影响。当网络链路数目增大时, 无线网络的平均功率消耗和单位数据的平均能耗也会相应地增大, 这是因为更多的链路竞争信道会消耗更多的能量, 并造成整个网络的能效下降。

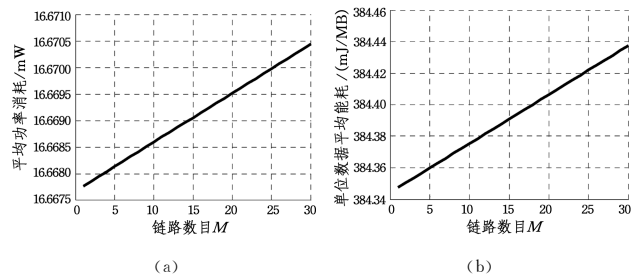


图 4 平均功率消耗、单位数据平均能耗与链路数目的关系
 Fig. 4 Relationship of average power consumption, average power consumption of per/unit and number of link

由于链路竞争信道所需的能量消耗也是重要的影响因素, 因此在图 5 中研究不同的竞争信道能耗 E_c 如何影响无线

网络的平均功率消耗和单位数据平均能耗。所使用的无线网络场景参数为: $A=0.5\text{ W}$, $P_{\max}=5\text{ W}$, $\tau=0.10\text{ s}$, $T=0.09\text{ s}$, $m=15$, $M=15$, $p_s=\exp(-1)$ 。从图 5 可以看出,在计算无线网络的能量消耗时 E_c 的取值起到重要作用。此外,在仿真实验中应该根据特定的应用需求来设置 E_c 的取值。

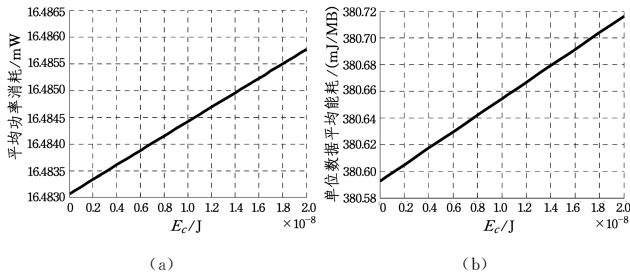


图 5 平均功率消耗、单位数据平均能耗与 E_c 的关系

Fig. 5 Relationship of average power consumption, average power consumption of per/unit and value of E_c .

下面比较 $E^2\text{CMS}$ 策略与上文提到的 5 种调度策略的网络性能。在仿真实验中,对于所有的调度策略,使用完全相同的信道特性和无线网络环境,并进行 100 次数据传输,然后获取数值结果的平均值。无线网络场景仿真参数为: $A=0.5\text{ W}$, $P_{\max}=5\text{ W}$, $\tau=0.10\text{ s}$, $T=0.09\text{ s}$, $m=15$, $M=15$, $p_s=\exp(-1)$, $E_c=1\times 10^{-8}$ 。表 1 列出了所有的仿真结果。平均调度时间代表在时间间隔 $[0, D_{\max}]$ 内数据包被相应的调度策略延迟传输的时间平均值,这个指标对于反映系统中的每次数据传输延迟是非常有用的;平均传输功率即发送终端传输数据时平均每次使用的功率;平均功率消耗为系统平均每秒消耗的能量;平均吞吐量表示系统平均每秒传输的数据量;单位数据平均能耗为平均功率消耗和平均吞吐量的比值,表示系统中每传输 1 Mb 的数据量所消耗的能量,反映了系统的能效。

表 1 瑞利衰落信道仿真结果

Table 1 Simulation results of Rayleigh fading

调度策略	平均调度时间/s	平均传输功率/mW	平均功率消耗/(mW/s)	平均吞吐量/kbps	单位数据平均能耗/(mJ/Mb)
$E^2\text{CMS}$	1.786	225.944	16.761	45.269	386.305
DTS	4.077	577.022	12.463	12.633	986.542
RTS	2.338	553.009	29.610	29.803	945.441
PTS	0.606	285.972	50.544	102.034	488.889
APTS	0.810	395.009	44.595	65.435	675.296
LPTS	3.257	367.003	9.601	16.868	627.488

从表 1 中可以看出, $E^2\text{CMS}$ 策略在大多数的评估指标中占有主要优势。在满足 QoS 要求的情况下, $E^2\text{CMS}$ 策略的平均传输功率能够比其他传输调度策略减少 20%~61%。DTS 策略、RTS 策略的平均传输功率最大,因为它们没有考虑能耗因素。PTS 策略、APTS 策略、LPTS 策略在传输数据时从节能的角度选择传输时刻,其平均传输功率远小于 DTS 策略、RTS 策略的平均传输功率,但所选择的传输时刻并不是能效最优的,因此平均传输功率大于本文提出的 $E^2\text{CMS}$ 策略。

$E^2\text{CMS}$ 策略的平均调度时间小于 DTS 策略、RTS 策略和 LPTS 策略的平均调度时间,但大于 PTS 策略和 APTS 策

略的平均调度时间。DTS 策略的平均调度时间最长,为最大传输延时。RTS 策略的平均调度时间与最大传输延时时内停止时刻的期望值相近。PTS 策略和 APTS 策略的停止时刻分布与信道 PDF 相关。LPTS 策略的平均调度时间大于最大传输延时的 37%。LPTS 策略的平均功率消耗是最低的,但此策略在选择传输时刻所持续的时间也是较大的,因此造成平均吞吐量较低。PTS 策略的平均吞吐量最大,因其平均调度时间最少,但是其平均消耗功率是最大的,所以能效并不是最好的。

$E^2\text{CMS}$ 策略的单位数据平均能耗最少,即传输单位数据所需的能量最少,是其他调度策略的 40%~80%,这表明其能量最高效,网络系统性能最好。因此,在具有 QoS 需求的如能量和吞吐率的网络系统中, $E^2\text{CMS}$ 策略具有明显的优势。

最后,我们研究以下场景,在无线网络系统中,链路必须传输定量的数据(如 1 GB),在每次传输中这个数据量被分成更小的数据包(如 90 kB)。

可以看出,图 6 给出的结果与之前所考虑的场景是非常相似的。 $E^2\text{CMS}$ 策略完成所有数据的传输所需的能量是最少的,为 $3.86\times 10^5\text{ mJ}$,消耗能量最多的则是确定性传输策略(DTS),为 $9.87\times 10^5\text{ mJ}$,这说明 $E^2\text{CMS}$ 策略具有较高能效。

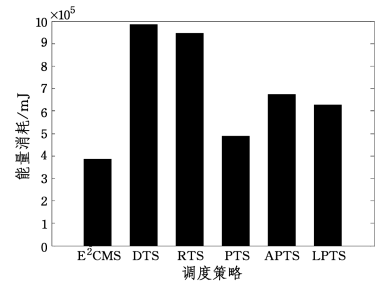


图 6 不同调度策略的能量消耗

Fig. 6 Power consumption of different scheduling strategies

5.2.2 莱斯衰落信道

无线通信信道受到莱斯衰落, Rician 信道衰落模型的信道增益概率密度函数(PDF)如下:

$$f_G(g) = \frac{g}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{g^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{gs}{\sigma^2}\right), g \geq 0 \quad (13)$$

其中, s 指主信号幅度的峰值, $I_0(\cdot)$ 为修正的 0 阶第一类贝塞尔函数。结合式(1)能够容易地得出传输功率相对最大功率 P_{\max} 的标准化累积分布函数(CDF)为:

$$F_P(p) = \frac{Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{A}{\sigma p}\right)}{Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{A}{\sigma P_{\max}}\right)} \quad (14)$$

其中, $p(g) = \frac{A}{g}$, A 由式(2)给出。 $Q_1(\cdot)$ 为一阶 Marcum Q 函数。

下面在 Rician 衰落信道模型中比较 $E^2\text{CMS}$ 策略与文中提到的 5 种调度策略的网络性能。同样设 $A=0.5\text{ W}$, 最大传输功率 $P_{\max}=5\text{ W}$, 时隙周期 $\tau=0.10\text{ s}$, 传输持续时间 $T=0.09\text{ s}$, 链路数目 $M=15$, 最大侦测次数 $m=15$, 竞争信道能耗 $E_c=1\times 10^{-8}$, 链路竞争信道成功的概率 $p_s=\exp(-1)$ 。在

仿真实验中,对于所有的调度策略,使用完全相同的信道特性和无线网络环境,并进行 100 次数据传输,然后获取数值结果的平均值。

表 2 列出了所有调度策略的仿真结果。从表 2 中可以看出,莱斯衰落信道的仿真结果与瑞利衰落信道的仿真结果类似,同样地, E^2 CMS 策略在平均传输功率和单位数据平均能耗上占有主要优势。与其他的调度策略相比, E^2 CMS 策略在传输单位数据的能耗方面具有明显的优势,无线网络能效提高了 24%~40%。

表 2 莱斯衰落信道仿真结果

Table 2 Simulation results of Rician fading

调度策略	平均调度时间/s	平均传输功率/mW	平均功率消耗/(mW/s)	平均吞吐量/kbps	单位数据平均能耗/(mJ/Mb)
E^2 CMS	1.299	213.286	19.536	55.966	364.652
DTS	4.077	349.392	7.547	12.633	597.405
RTS	2.283	350.595	21.125	35.699	599.411
PTS	0.389	296.632	62.569	123.620	507.107
APTS	0.758	281.180	32.916	68.166	480.702
LPTS	3.273	280.188	7.646	17.071	479.078

结束语 在无线网络系统模型中,多个用户路使用随机接入的方式竞争同一个信道,因为信道衰落,通过信道侦测成功获取的信道状态可能是较好的或是较差的。当侦测到质量较差的信道时,放弃此信道继续进行侦测,这样尽管会造成额外的传输延迟,但是很可能会侦测到更好的信道从而提高网络能效。本文从整个无线网络能耗的角度考虑,使系统中的所有节点合作地最小化整个网络能耗。通过最优停止理论,证明了本文提出的最优策略是一种纯粹的阈值策略,而功率阈值向量可通过逆向归纳法求解定点方程式获得。最后,在典型的小尺度衰落信道模型中进行仿真实验,将 E^2 CMS 策略与多种不同的传输调度策略进行对比,结果表明 E^2 CMS 策略达到了满意的节能效果,显著提高了网络能效,对无线网络能效的研究具有重要意义。我们下一步的工作是在具有多输入多输出链路的无线网络中研究能耗的优化。

参 考 文 献

[1] LIN C, TIAN Y, YAO M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4): 593-612. (in Chinese)
林闯,田源,姚敏.绿色网络和绿色评价:节能机制、模型和评价[J].计算机学报,2011,34(4):593-612.

[2] ZHANG F, ANTA A F, WANG L, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 603-615. (in Chinese)
张法, ANTA A F, 王林, 等.网络能耗系统模型及能效算法[J].计算机学报,2012,35(3):603-615.

[3] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital Communications Over Fading Channels[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

[4] LIU B, LIN C, JIANG X, et al. Performance analysis of sleep

scheduling schemes in sensor networks using stochastic Petri net [C]//Proceedings of the International Conference on Communications (ICC 2008). Beijing, China, 2008: 4278-4283.

[5] ZUO J, DONG C, NGUYEN H V, et al. Cross-layer aided energy-efficient opportunistic routing in Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 522-535.

[6] KOHAN M, KHOTANLOU H, NASSIRI M. An efficient mechanism for data rate adaptation in wireless LAN's [J]. Advances in Computer Science: an International Journal, 2013, 2(3): 19-25.

[7] WENG C C, CHEN C W, CHEN P Y, et al. Design of an energy-efficient cross-layer protocol for mobile ad hoc networks [J]. IET Communications, 2013, 7(3): 217-228.

[8] VAN PHAN C. A game-theoretic framework for opportunistic transmission in wireless networks [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE 2014). Danang, Vietnam, 2014: 150-154.

[9] ZHENG D, GE W Y, ZHANG J S. Distributed opportunistic scheduling for Ad Hoc networks with random access: an optimal stopping approach [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(1): 205-222.

[10] POULAKIS M I, PANAGOPOULOS A D, CONSTANTINOU P. Channel-aware opportunistic transmission scheduling for energy-efficient wireless links [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 192-204.

[11] PENG Y, WANG G C, HUANG S Q, et al. An Optimization Strategy of Energy Consumption for Data Transmission Based on Optimal Stopping Theory in Mobile Networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(6): 1162-1175. (in Chinese)
彭颖,王高才,黄书强,等.移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略[J].计算机学报,2016,39(6):1162-1175.

[12] QIN X, BERRY R. Exploiting multiuser diversity for medium access control in wireless networks [C]//IEEE INFOCOM, San Francisco, USA, 2003: 1084-1094.

[13] SHEN X, AGRAWAL S. Kernel Density Estimation for An Anomaly Based Intrusion Detection System [C]//International Conference on Machine Learning: Models, Technologies & Applications (MImlta 2006). Las Vegas, Nevada, USA, DBLP, 2006: 161-167.

[14] YUE G, ZHOU X, WANG X. Performance comparisons of channel estimation techniques in multipath fading CDMA [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 716-724.

[15] FERGUSON T. Optimal Stopping and Applications 2006 [OL]. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/contents.html>.

[16] FREEMAN P R. The secretary problem and its extensions: a review [J]. International Statistical Review, 1983, 51(51): 189-206.

[17] LI C P, NEELY M J. Energy-optimal scheduling with dynamic channel acquisition in wireless downlinks [C]//2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2007: 1140-1147.