

移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略

彭 颖¹⁾ 王高才²⁾ 黄书强³⁾ 王 淦²⁾ 李道丰²⁾

¹⁾(广西大学电气工程学院 南宁 530004)

²⁾(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)

³⁾(暨南大学网络与教育技术中心 广州 510632)

摘 要 随着移动自组网、移动社会网等移动网络的广泛部署和数据服务的快速发展,如何在高效地利用移动网络资源的同时降低无线终端能耗已成为绿色移动计算中非常重要和迫切需要解决的课题.该文主要研究无线链路在给定的数据生成速率和传输延时要求下的数据传输平均能耗最小化问题.考虑到无线信道质量随时间变化的特征及分布式机会调度能提高网络设备的能量利用率和网络性能的特性,提出基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略.该文首先构建具有传输数据量约束和数据传输平均能耗最小化的有限范围的最优停止问题,然后证明最优停止规则问题的存在并给出求解方法和过程,获得无线发送终端在周期性侦测信道时刻中的最优传输速率阈值.通过比较当前传输速率值与相应最优速率阈值以选择最优传输时刻,实现基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略.在仿真实验中,将该文所提出的优化策略与相关文献的数据传输策略在平均能耗、平均传递成功率和平均调度周期各指标上进行对比,结果表明该文提出的策略具有较小的平均能耗和较高的平均传递成功率,取得较好的能耗优化效果.

关键词 移动网络;数据传输;最优停止;能耗优化;最优速率;绿色计算;移动互联网

中图法分类号 TP302 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2016.01162

An Energy Consumption Optimization Strategy for Data Transmission Based on Optimal Stopping Theory in Mobile Networks

PENG Ying¹⁾ WANG Gao-Cai²⁾ HUANG Shu-Qiang³⁾ WANG Nao²⁾ LI Dao-Feng²⁾

¹⁾(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

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

³⁾(Network and Education Technology Center, Jinan University, Guangzhou 510632)

Abstract With the wide deployment of mobile networks, such as mobile ad hoc networks, mobile social networks, etc., and the rapid development of data services, how to utilize mobile networks resource efficiently and decrease energy consumption of wireless terminals has become a very important and urgent topic for constructing green mobile computing. This paper studies the average energy consumption minimization problem for data transmission under the given data generation rate and transmission delay demand in wireless links. Considering the time-varying characteristics of wireless channel quality, and network performance and energy utilization of network equipment can be improved by using distributed opportunistic scheduling, this paper proposes an energy consumption optimization strategy for data transmission based on optimal

收稿日期:2015-04-08;在线出版日期:2015-11-16. 本课题得到国家自然科学基金(61562006,61262003)、广西自然科学基金杰出青年基金(2013GXNSFGA019006)、广东省自然科学基金(2014A030313386)项目资助. 彭 颖,女,1980年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为移动网络能耗优化. E-mail: 623833@qq.com. 王高才(通信作者),男,1976年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络技术,系统性能评价和随机方法. E-mail: gcwang@gxu.edu.cn. 黄书强,男,1977年生,博士,教授级高级工程师,主要研究领域为无线 Mesh 网络和移动互联网. 王 淦,女,1977年生,硕士,讲师,主要研究方向为网络优化. 李道丰,男,1974年生,博士,副教授,主要研究方向为密码学与网络信息安全.

stopping theory. Firstly, to minimize the average energy consumption per bit data transmitted, a finite horizon optimal stopping problem with transmission data quantity constraint is constructed. And then we prove the existence of the optimal stopping rule and give the solving methods and processes. At last, we obtain the optimal transmission rate threshold of the sending terminal for each channel detection slot time. Thus forms the energy consumption optimization strategy for data transmission based on optimal stopping theory, which selects the optimal transmission time through comparing the current transmission rate with the corresponding optimal transmission rate threshold. In simulation, the average energy consumption, the average delivery success ratio and the average scheduling period of the optimization strategy proposed in this paper are compared with those of other data transmission strategies in related literatures. The results show that the strategy proposed by this paper has lower average energy consumption and higher average delivery success ratio than other strategies, and achieves better energy consumption optimization effect.

Keywords mobile networks; data transmission; optimal stopping; energy consumption optimization; optimal rate; green computing; mobile Internet

1 引言

随着移动自组网、移动社会网等移动网络的广泛部署和数据服务的快速发展,无线终端的数量呈现指数增长,移动网络的能耗也急剧增加.然而,移动设备电池能量有限,且缺乏持续供给能力,特别是在网络基础设施较少的环境中或移动情况下.而能耗问题又极大地影响移动用户的网络体验.因此,在高效地利用移动网络资源的同时降低无线终端能耗成为提高用户网络体验的必然要求,也是构建绿色移动计算的一个重要和迫切需要解决的课题^[1-2].

在移动网络环境中,多径传播、用户移动和信道衰落等特性容易造成无线信道的容量和质量随时间变化而快速波动.因此,如果无线网络总是动态地分配资源给瞬时状况最好的信道,且无线终端总是选择信道质量好的时刻传输数据,那么无线网络资源的利用率将得到极大提高,网络性能也得到改进.这种利用信道质量随时间变化的特性进行高效的数据传输策略称为机会调度^[3].

机会调度分为集中式调度和分布式调度.前者假设网络中存在一个中心调度器,该调度器能感知当前所有信道的状况,并集中进行调度操作和处理;后者则在设备不知道其他设备信道状况的情况下,以确定的概率随机访问和竞争信道,当设备竞争得到信道后,根据信道质量的好坏来选择传输数据或放弃传输机会重新竞争信道,从而让网络资源在良

好的信道状况下得到充分利用.

分布式机会调度技术既能利用多个用户的设备多样性,也能利用信道在不同时间上的差异性.分布式机会调度允许用户对信道进行临时侦测后做出决定,以提高整个网络的效率,且没有复杂的控制中心,也不需要提供所有信道质量的实时信息.另外,分布式机会调度不仅能提高网络性能,如吞吐量^[4-7],还能增加网络设备的能量利用率^[8-12].

在无线链路上,若发送终端的传输功率给定,则传输速率越大,发送终端在相同时间内传输的数据量就越多,即传输单位数据的平均能耗越小.然而,由于传输速率是随无线信道质量波动而随机变化的,发送终端选择在信道质量好的时刻,即传输速率较大时刻发送数据有利于降低传输数据的平均能耗.因此,针对本文提出的最小化链路上数据传输平均能耗的研究目标,发送终端必须实时侦测信道质量,并结合当前等待传输的数据量大小,选择最优时刻发送数据.实际上,发送终端利用信道质量随机变化的特征,根据临时信道状况信息选择信道质量较好的时刻传输数据的问题是一个分布式机会调度问题^[4-12].在该分布式机会调度中,发送终端对链路的信道状况进行持续观察,然后选择具有最优能效(即在传输数据时,具有最小平均能耗)的时刻停止观察并发送数据.因此,该分布式机会调度问题可进一步转换为最优停止规则策略并进行求解.在最优停止规则策略中,决策者(发送终端)根据对随机变量(信道质量)的持续观察,获得最小化期望成本(平均能

耗)的停止观察时刻,然后采取特定的行为(传输数据)实现最小化期望成本的目标。

文献[9]在研究无线链路上的数据传输能耗时,假定发送终端一直具有足够的累积数据,以在最大传输延时的最大传输功率为基础推导出之前的可传输时刻的传输功率阈值。因为该功率阈值不考虑发送终端当前累积的待传输数据量,所以不能获得不同累积数据量情况下的最优能效,也不能保证数据传递成功率(被传递数据总量与待传输数据总量的比值)。我们在本文将发送终端累积生成的待传递数据量作为选择最优传输时刻的关联因素。为了更好地导出最优停止规则,我们给定发送终端的数据生成速率。这也是与现实需要相符合的。例如,当发送终端传输某些在线数据时,单位时间的待传输数据量为确定值。另外,文献[10-11]也假定发送终端以恒定的速率获得待转发数据。本文提出基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略,其总体研究思路如下:在给定的无线链路的数据生成速率和数据传输延时的情况下,利用无线信道质量随机变化的特征,将发送终端选择最优信道质量的分布式机会调度转换为最优停止问题,利用最优停止理论获得发送终端在每个选择时刻的最优传输速率阈值,通过选择最优传输速率时刻发送数据以降低传输单位数据的平均能耗和提高数据的传递成功率。

本文第2节回顾相关研究工作;第3节描述系统模型和具体的优化问题;第4节阐述基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略;第5节给出仿真结果及分析;最后在第6节总结全文,并对进一步工作进行展望。

2 相关工作

当前,基于无线信道状况随时间变化的机会调度在移动自组网、移动社会网等移动网络中得到广泛的研究和应用。其研究主要集中于多设备多信道、多设备单信道和单设备单信道竞争选择最优的传输时刻,改进网络性能和提高设备能效等。研究者重点关注两个优化目标:一是增大网络吞吐量^[4-7],二是提高能量利用率^[8-15]。

(1)为增大机会网络的吞吐量,研究者们提出各种机制和算法以选择良好的信道进行数据传输,从而获得更优传输速率,提高数据传递率。

文献[4]考虑移动网络中安全链路和常规链路同时存在的情况,设计一种基于最优停止理论和满

足安全链路 QoS 约束的分布式调度机制,最大化整个系统吞吐量。文献[5]研究自组织网络中多个链路通过随机访问竞争相同信道,提出网络中心和用户中心两个分布式机会调度策略,有效提高吞吐量。文献[6]则研究提高比例公平的网络吞吐量。文献[7]针对多个设备竞争相同信道的场景,构建依赖不同信道侦测时刻性的块衰落信道模型,考虑信道依赖性对传输调度和性能的影响,形成有限范围的最优停止问题,选择做出决定的有效时刻,然后通过反向归纳法刻画系统性能,并利用递归方法解决问题,有效提高系统吞吐量。

(2)为了减少无线网络的能量消耗,一些研究关注如何选择信道质量最好的时刻进行数据传输,以减少数据传输的能量消耗^[8-12];另一些研究考虑节省从源点传输信息到终点的整个路由过程的能耗^[13-15]。

为了节省数据传输能耗,文献[8-9]分别研究在多设备单信道和单设备单信道场景中如何选择最优的传输时刻,以便于提高能量的利用率。文献[8]给定多个设备竞争信道的访问概率,利用最优停止理论构建无限范围的最优停止问题,使用最优等式推导出同构网络环境下各个侦测时刻的最优传输速率阈值,并提出异构网络环境下的启发式求解方法,有效地优化了网络能效。然而,该文献没有考虑数据的传输延时。文献[9]考虑数据具有最大传输延时的情况,研究信道具有随时间变化特征的链路上传输数据的能耗问题,利用最优停止理论获得发送终端在每个侦测时刻的最优功率阈值,从而选择信道质量最优的时刻传输数据以节省能耗并保证延时。该文假定发送终端随时具有足够的待传输数据。但在实际网络中,当发送终端获得良好传输机会时,待传输的数据可能多于或少于传输时间内所能传输的数据,这将影响传输数据的能效和数据传递成功率。文献[10]研究车载移动网络中路边单元(roadside unit)的数据流量传递给所经过车辆的调度问题,作者引入传输成本函数和超出延时的惩罚代价,利用最优停止理论证明路边单元中数据队列的延时超出某一阈值时是路边单元传递流量的最优时间。实验结果证明最优停止理论能有效地节省路边单元的传输成本。更进一步,文献[11]给出了该问题更加完善的理论推导和实验证明。文献[12]研究移动网络中具有延时约束的良好信道选择问题,考虑延时和能耗双目标约束,利用随机博弈策略求解机会调度中传输数据的最优功率阈值,从而减少信道错误和包

碰撞造成的能量浪费。

另外一些研究关注机会网络中从源点传输信息到终点的整个路由过程中的能耗节省问题。由于信道状况的快速波动,以平均信道质量为基础估计出的路由信息将变得陈旧,机会路由可避免这种情况的出现。与传统路由按照预先定义的端到端路径传递信息方式对比,机会路由允许不存在源点到终点的路径时,将信息从源点传递到终点。如文献[13]提出能量有效的机会合作通信方法,充分利用移动网络信道的瞬时变化特征,通过高效的中继节点将数据包沿着更好的路径传输,有效地减少能量消耗。文献[14]则在传统路由和机会路由中引入端到端能耗目标函数,利用跨层信息交换技术减少能耗,设计基于 Dijkstra 算法的能量有效路由算法。模拟结果表明,机会路由在能效上优于传统路由。我们在文献[15]中提出移动环境中具有传输延时约束的传输能耗最小化路由机制,有效地减少网络能耗。

综上,在分布式机会调度中,利用最优停止理论获得最优调度时刻是一种非常重要的求解方法^[4-11]。研究者们多设备竞争选择多信道^[4]、多设备竞争选择单信道^[5-8]和单设备选择单信道^[9-11]等研究中,构建和求解不同的最优规则问题,获得发送终端的最优传输速率阈值^[4-8]、最优功率阈值^[9]和最优传输时刻^[10-11],从而最大化网络吞吐量^[4-7]和最小化能耗^[8-11]。我们在本文中研究单设备选择单信道场景下的能耗优化问题,与文献[9]所假设的发送终端长时间拥有足够的待传输数据不同,本文假设发送终端以给定的速率生成数据。此外,文献[9]研究最小化期望平均能耗和最小化单位时间平均能耗,我们则考虑最小化传输单位数据的平均能耗,并以传递完所有累积待传输数据量为约束。为此,我们构建具有传输延时要求和传输数据量约束的平均能耗最小化问题,并可转化为一个有限范围的最优规则停止问题,以获得最优传输速率阈值。本文的主要贡献在于:(1)利用无线信道质量随时间变化的特征,研究移动网络中具有延时要求且带传输数据量约束的数据传输能耗优化问题,分析链路上给定的数据生成速率和传输延时对传输单位数据平均能耗的影响;(2)构建具有传输数据量约束的传输单位数据平均能耗最小化的有限范围的最优停止规则问题,并获得发送终端在每个侦测信道时刻的最优传输速率阈值,形成了基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略。

3 背景及问题描述

3.1 系统模型

在无线网络环境中,无线终端通过载波侦听多路访问/冲突避免机制访问信道。若两个无线终端之间需要传递数据,则在传输范围内建立无线链路后,立即选择良好信道时机进行数据传输。本文的研究目标是在满足传输延时要求下最小化无线链路上传输单位数据的平均能耗,同时保证无线链路上的数据传输成功率。

在移动网络中,假定时间被划分为固定的时隙周期 T 。在无线发送终端和接收终端构成的一条无线链路上,信道增益 g 服从某种变化(如 Rayleigh 模型衰落),且在周期 T 内保持不变^[5-9]。发送终端以给定速率 c 生成数据,并以不超过 D_m 的传输延时发送给接收终端,发送终端的传输功率固定为 P 。为了获取信道质量的实时信息,发送终端每隔周期 T 进行一次信道侦测,每次信道侦测持续时间非常短^[9],远小于 T ,每次侦测能耗为 E_D 。当发送终端侦测到良好的信道后,传输数据的持续时间为 t ,传输能耗为 $P \cdot t$,其值远大于侦测能耗 E_D 。由于信道增益 g 在周期 T 内保持不变,所以传输时间 t 满足 $t \leq T$ 。发送终端从侦测信道开始到传输数据结束的整个阶段被称为一轮信道侦测和数据传输,其过程如图 1 所示。一轮的侦测总时间为 $n \cdot T$ (n 为侦测次数,从上一轮传输数据结束后开始计数,并假定第一轮信道侦测的起始计数为 0),侦测总能耗为 $n \cdot E_D$,传输的总数据量为 $R \cdot t$ (R 为传输速率)。当 $Rt < c(nT + t)$ 时,发送终端此轮累积的待发送数据没有被传输完,剩余数据量为 $c(nT + t) - Rt$;当 $Rt \geq c(nT + t)$ 时,发送终端此轮实际传输的数据量为 $c(nT + t)$;当 $Rt > c(nT + t)$ 时,发送终端因没有足够的待传输数据而浪费传输功耗。显然,发送终端选择传输速率大的时刻传输数据能提高给定传输时间内的传输数据量,减小传输单位数据的平均能耗,从而提高能量利用率。根据香农公式:

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

信道传输速率 R 由信道带宽 W 、信道增益 g 、传输功率 P 和噪声功率谱密度 N_0 共同决定。当信道带宽 W 、传输功率 P 和噪声功率谱密度 N_0 的值确定时,传输速率 R 与信道增益 g 成正比。发送终端选择传输速率大的时刻,就是捕捉信道增益值大、信

道质量好的时刻. 因此, 发送终端必须实时侦测链路的信道质量以选择信道质量好的最优传输时刻. 在本文中, 我们利用最优停止理论获取最优传输时刻.

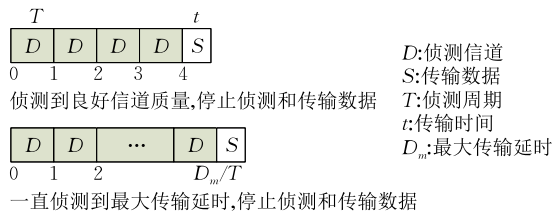


图 1 一轮信道侦测和数据传输过程

3.2 最优停止理论

最优停止理论是决策者基于连续观察到的随机变量, 以最大化报酬或最小化成本为目标, 决定选择一个合适的时刻以采取给定的行为^①. 最优停止规则问题由下列两类对象定义:

(1) 假设服从联合分布的随机变量序列: X_1, X_2, \dots ;

(2) 实值报酬或成本函数序列: $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$.

相关联的停止规则是: 在观察到 $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n (n = 1, 2, \dots)$ 后, 决策者选择停止观察并接受已知报酬或成本函数 $y_n(x_1, \dots, x_n)$, 或者继续观察 X_{n+1} . 如果不进行任何观察, 决策者接受常量 y_0 ; 如果不停止观察, 决策者接受 $y_\infty(x_1, x_2, \dots)$. 这个规则使决策者选择最优停止时刻 $N (0 \leq N \leq \infty)$ 以最大化期望报酬 $E[Y_N]$ 或最小化期望成本 $E[Y_N]$. 其中, $Y_N = y_N(x_1, \dots, x_N)$ 是停止在 N 时刻的随机报酬或成本, $E[\cdot]$ 表示期望值. 当 $n \rightarrow \infty$, 该最优停止规则问题称为无限范围的最优停止问题, 可通过计算最优等式解决. 但在实际应用中, n 的值不超过最大值 N_m , 该问题称为有限范围的最优停止问题, 它是无限范围最优停止问题的特殊情况, 可通过反向归纳解决, 即从最大值 N_m 向最小值 0 进行反向计算. 目前, 在通信领域存在许多选择最优时刻采取行动以最大化期望报酬或最小化期望成本的问题. 因此, 以序列观察的随机变量为决策基础进行最优时刻选择的最优停止理论是解决这种问题的有效工具.

3.3 移动网络中数据传输的最优停止问题

在本文中, 我们假定发送终端以给定的速率生成待传输数据, 数据的最大延时为 D_m , 超过延时未能传输的数据将被丢弃. 发送终端根据对信道质量的持续观察结果选择最优时刻传输数据, 在满足数

据传输延时的前提下, 最小化数据传输平均能耗, 并保证数据传递成功率. 因此, 该数据传输问题可转换为一个具有最大传输延时 D_m 要求的有限范围的最优停止问题.

在移动网络环境中, 无线终端的移动和外部环境的干扰都会对信道质量产生一定的影响, 信道状况具有不确定性. 当无线终端的传输功率确定时, 若信道质量较好, 数据传输速率较快, 在给定的传输时间内传输的数据量就大, 则传输单位数据消耗的能量就小. 当信道质量较差时, 情况相反. 同时, 发送终端以给定的速率生成待传输数据, 并累积在发送终端中. 如果发送终端选择的发送时刻间隔较小, 累积的待发送数据经常少于传输时间内可传输的数据, 则因发送终端浪费传输功率, 导致传输单位数据消耗的能量增多; 如果发送终端选择的发送时刻间隔太大, 累积的待发送数据多于传输时间内可传输的数据, 则发送终端不能将累积数据全部发送, 从而导致部分数据因超出延时被丢弃.

实际上, 无线终端需要根据当前侦测到的信道质量和累积的待发送数据量来决定是否立即进行数据传输, 或者放弃这次机会等待下一个更好时刻传输数据. 发送终端以链路信道质量的随机特征为前提, 以累积的待传输数据量为约束及满足数据传输延时为条件, 对链路信道质量进行观察, 选择最优停止观察和传输数据的时刻以最小化平均能耗, 这是一个最优停止策略问题. 该问题中的各要素与最优停止策略的各要素对应关系如图 2 所示.

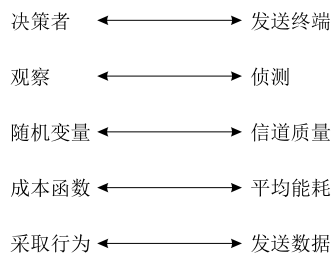


图 2 数据传输中的最优停止问题要素

4 数据传输能耗优化策略

4.1 能耗最小化最优停止规则问题的构建

在无线链路上, 发送终端进行第 n 次信道质量侦测时, 定义侦测变量序列 $X_n = \{\Delta T_n, R_n\}$, 其中,

^① Ferguson T. S. Optimal stopping and applications, <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>. 2006

ΔT_n 为侦测时间序列, R_n 为信道的传输速率序列. 设发送终端至少观察一次, N 为发送终端停止观察和传输数据的时刻编号(简称时刻), $M = \max\{n: \Delta T_n \leq D_m\}$ 为发送终端必须停止观察和传输数据的时刻, 即最大侦测时刻, 则有 $1 \leq n \leq N \leq M$. 令发送终端一轮信道侦测的次数为 N , 每次侦测能耗为 E_D ; 一轮信道侦测后进行一次数据传输, 传输能耗为 $P \cdot t$. 因此一轮信道侦测和数据传输的总能耗为

$$E_N = NE_D + Pt \quad (2)$$

如果发送终端重复使用给定的停止规则 Y 轮, 那么, Y 轮会产生停止时刻编号序列 $\{N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_Y\}$ 和总能耗序列 $\{E_{N_1}, E_{N_2}, \dots, E_{N_i}, \dots, E_{N_Y}\}$. 其中, N_i 表示第 i 轮的停止时刻编号, 从第 $i-1$ 轮传输数据结束后开始计算, 规定第 1 轮的起始时刻编号为 0, 则 $1 \leq N_i \leq M$. E_{N_i} 是第 i 轮停止在 N_i 时的总能耗. 当第 i 轮停止在 N_i 时, 发送终端所花费的总时间为侦测时间 $\Delta T_{N_i} = T \cdot N_i$ 和传输时间 t 之和, 即 $\Delta T_{N_i} + t$, 生成的待传输数据量是 $c(\Delta T_{N_i} + t)$. 假定此时的传输速率为 R_{N_i} , 则此轮不被传输的数据量 L_{N_i} 为

$$L_{N_i} = (c(\Delta T_{N_i} + t) - R_{N_i}t)^+ = \begin{cases} c(\Delta T_{N_i} + t) - R_{N_i}t, & c(\Delta T_{N_i} + t) > R_{N_i}t \\ 0, & c(\Delta T_{N_i} + t) \leq R_{N_i}t \end{cases} \quad (3)$$

定义能耗效率 ζ 为传输单位数据的平均能耗如下:

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^Y E_{N_i}}{\sum_{i=1}^Y (c(\Delta T_{N_i} + t) - L_{N_i})} \quad (4)$$

根据大数定理, 式(4)收敛于 $E[E_N]/E[c(\Delta T_N + t) - L_N]$, N 是发送终端停止侦测和传输数据的时刻, $E[\cdot]$ 代表数学期望值. 因此, 我们构建了一个选择停止时刻 $1 \leq N \leq M$ 以最小化 $E[E_N]/E[c(\Delta T_N + t) - L_N]$ 的最优停止规则问题. 该规则源于间隔周期 T 侦测到的信道传输速率序列 R_N 和侦测时间序列 ΔT_N , 并生成能耗序列 E_N , 待传输数据量序列 $c(\Delta T_N + t)$ 和不能被传输的数据量序列 L_N , 这些序列值都是可测量得到的.

当传输时间固定为 t 时, 待传输数据量为 $c(\Delta T_N + t)$, 若 $R_N t < c(\Delta T_N + t)$, 则有剩余数据不能被传输. 另一方面, 我们要求在时间 t 内将累积的数据全部传输. 因此, 该最优停止问题带有约束条件 φ , 即 $R_N t \geq c(\Delta T_N + t)$, 则停止时刻集定义为

$$N^+ = \{N: 1 \leq N \leq M, E[\Delta T_N] \leq D_m, \varphi\} \quad (5)$$

因此, 带传输数据量约束的平均能耗最小化问题描述为

$$\begin{aligned} & \min_{N \in N^+} \frac{E[NE_D + Pt]}{E[c(\Delta T_N + t) - L_N]} \\ & \text{s. t. } E[R_N t] \geq E[c(\Delta T_N + t)] \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 能耗最小化最优停止规则问题的转化

在本文中, 我们需要推导出发送终端的最优停止规则和最优能耗效率(即传输单位数据的最小平均能耗). 根据式(4), 我们定义最优能耗效率 ζ^* 为

$$\zeta^* = \inf_{N \in N^+} \frac{E[NE_D + Pt]}{E[c(\Delta T_N + t) - L_N]} \quad (7)$$

式(7)中的最优问题等价于

$$\inf_{N \in N^+} (E[NE_D + Pt] - \zeta^* E[c(\Delta T_N + t) - L_N]) = 0 \quad (8)$$

上述数据传输平均能耗最小化问题是一个关于 ζ 的最小化 $E[Z_N]$ 的最优停止问题, 其中

$$Z_N = NE_D + Pt - \zeta(c(\Delta T_N + t) - L_N).$$

假定对于每个 ζ , 都存在一个最小化 $E[Z_N]$ 的最优停止时刻 $N(\zeta) \in N^+$, 则我们的目标是找到最优停止时刻 $N^* = N(\zeta^*)$, 以获得最优能耗效率 ζ^* . 则有

$$N^* = \arg \inf_{N \in N^+} \frac{E[NE_D + Pt]}{E[c(\Delta T_N + t) - L_N]} \quad (9)$$

因此, 第 4.1 节中带传输数据量约束的平均能耗最小化问题式(6)可变换为

$$\begin{aligned} & \min_{N \in N^+} (E[NE_D + Pt] - \zeta E[c(\Delta T_N + t) - L_N]) \\ & \text{s. t. } E[R_N t] - E[c(\Delta T_N + t)] \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

根据拉格朗日对偶理论, 上述问题转化为

$$\begin{aligned} & \min_{N \in N^+} E[Y_N] = \\ & \min_{N \in N^+} (E[NE_D + Pt] - \zeta E[c(\Delta T_N + t) - L_N] + \lambda(E[c(\Delta T_N + t)] - E[R_N t])) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\lambda \geq 0$ 是拉格朗日乘子.

讨论 1. 在式(11)中, 存在

$$\begin{cases} \lambda = 0, & E[c(\Delta T_N + t)] \leq E[R_N t] \\ \lambda > 0, & E[c(\Delta T_N + t)] > E[R_N t] \end{cases}$$

因此有

$$\begin{aligned} & \lambda(E[c(\Delta T_N + t)] - E[R_N t]) = \\ & \begin{cases} 0, & E[c(\Delta T_N + t)] \leq E[R_N t] \\ \lambda(E[c(\Delta T_N + t)] - E[R_N t]), & E[c(\Delta T_N + t)] > E[R_N t] \end{cases} \end{aligned}$$

根据式(3), 我们有

$$\lambda(E[c(\Delta T_N + t) - R_N t]) = \lambda E[L_N],$$

于是, 式(11)表示为

$$\begin{aligned} & \min_{N \in N^+} E[Y_N] = \min_{N \in N^+} (E[NE_D + Pt] - \\ & \zeta E[c(\Delta T_N + t) - L_N] + \lambda E[L_N]) \end{aligned} \quad (12)$$

讨论 2. 能耗效率 ζ 满足: $\frac{E_D}{cT} < \zeta < \frac{Pt}{ct}$.

发送终端在 N 时刻停止观察和发送数据,若丢失数据量 $L_N = 0$,则能耗效率 ζ 的值最小,其值为 $\frac{NE_D + Pt}{cNT + ct}$. 所以,发送终端停止在 N 时刻的能耗效率 ζ 不小于该最小能耗效率值. 即 $\zeta \geq \frac{NE_D + Pt}{cNT + ct}$.

又因为 $t \leq T$, 所以有 $\zeta \geq \frac{NE_D + Pt}{cNT + ct}$.

即有 $\zeta \geq \frac{E_D}{cT} + \frac{Pt - E_D}{(N+1)cT}$.

因为传输能耗 Pt 大于侦测能耗 E_D , 所以, $\zeta > \frac{E_D}{cT}$.

同时, $Pt/(ct)$ 是传输时间 t 内的传输能耗 Pt 与相应时间内生成的数据量 ct 的比值. 若 $\zeta > Pt/(ct)$, 则发送终端不需要进行信道侦测, 直接传输数据将获得更小的能耗效率 ζ 值. 因此有 $\zeta < \frac{Pt}{ct}$.

4.3 能耗最小化最优停止规则问题的求解

对于上述最小化平均能耗的最优停止规则问题的求解, 我们首先证明其最优停止规则的存在, 然后对该最优停止策略进行描述, 最后求解最优停止规则问题. 我们先给出下列命题 1.

命题 1. 式(12)存在最优停止规则.

证明. 根据文献(参见前页脚注①), 如果满足下列两个条件:

A1. $E[\inf_n Y_n] > -\infty$;

A2. $\liminf_{n \rightarrow \infty} Y_n \geq Y_\infty$ a.s.

则最优停止规则存在. 对于式(12), 因为 $\Delta T_n = nT$, 所以有 $Y_n = nE_D + Pt - \zeta c(nT + t) + (\lambda + \zeta)L_n$.

因为 $L_n \geq 0$, 所以 $Y_n \geq nE_D + Pt - \zeta c(nT + t)$.

又因 $\zeta < Pt/(ct)$, 所以 $Y_n > nE_D - \zeta cnT$.

同时, $\zeta > E_D/(cT)$, 且 $n \leq D_m/T$, 所以 $Y_n > -\infty$ 成立.

因此, 条件 A1 满足.

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 存在 $L_n \rightarrow c(nT + t)$, 而且 $nE_D \rightarrow \infty$ 和 $c(nT + t) \rightarrow \infty$ 成立. 于是,

$$\begin{aligned} & \liminf_{n \rightarrow \infty} Y_n \\ &= \liminf_{n \rightarrow \infty} (nE_D + Pt - \zeta c(nT + t) + (\lambda + \zeta)L_n) \\ &= \liminf_{n \rightarrow \infty} (nE_D + Pt + \lambda c(nT + t)) \\ &= \infty, \end{aligned}$$

显然 $Y_\infty = \infty$. 因此, 条件 A2 满足. 证毕.

发送终端每隔周期 T 进行一次信道质量侦测, 然后决定当前是否为最优停止侦测和传输数据的时

刻, 而该决定的做出依赖于未来是否有更好的信道状况期望. 如在第 3.3 节所述, 这是一个有限范围的最优停止问题, 我们通过反向归纳法推导出最后一步到第一步的期望值, 从而得到每一步停止的传输速率阈值. 发送终端的最优停止规则策略就是验证当前的传输速率是否达到阈值, 若达到则停止侦测并传输数据, 否则继续侦测; 当侦测到达最后的延时边界时, 发送终端无条件进行数据传输. 根据文献[7], 我们得到发送终端的信道侦测停止在 n 时刻的最小返回率 $W_n(\lambda, \zeta)$ 为

$$W_n(\lambda, \zeta) = \min(Pt + nE_D - \zeta c(nT + t) + (\lambda + \zeta)L_n, V_{M-n-1}(\lambda, \zeta)) \quad (13)$$

其中, $n=1, 2, \dots, M-1$, $V_{M-n-1}(\lambda, \zeta) = E[W_{n+1}(\lambda, \zeta) | F_n]$. 式(13)考虑发送终端每一次侦测信道的能耗代价 E_D , 并对其停止在 n 时刻的返回率与从 $n+1$ 时刻到 M 时刻继续使用最优停止规则所期望得到的返回率 $V_{M-n-1}(\lambda, \zeta)$ 进行比较. 根据最优停止规则, 当发送终端在 n 时刻的返回率小于或等于期望得到的返回率 $V_{M-n-1}(\lambda, \zeta)$ 时, 其观察停止, 即

$$Pt + nE_D - \zeta c(nT + t) + (\lambda + \zeta)L_n \leq V_{M-n-1}(\lambda, \zeta) \quad (14)$$

根据式(3)中 L_n 的定义, 当 $c(nT + t) > R_n t$ 时, 式(14)转化为

$$Pt + nE_D + \lambda c(nT + t) - (\lambda + \zeta)R_n t \leq V_{M-n-1}(\lambda, \zeta),$$

即 $R_n \geq \frac{Pt + nE_D + \lambda c(nT + t) - V_{M-n-1}(\lambda, \zeta)}{(\lambda + \zeta)t}$.

当 $c(nT + t) \leq R_n t$ 时, 式(14)转化为

$$Pt + nE_D - \zeta c(nT + t) \leq V_{M-n-1}(\lambda, \zeta).$$

最后, 本系统具有延时边界 D_m , 发送终端侦测到最大侦测时刻 M 时必须停止并传输数据, 不必考虑此时的传输速率. 因此, 发送终端在 M 时刻的传输速率阈值为 0.

综上分析可得, 发送终端停止在 n 时刻的传输速率阈值为

$$R_{th,n}(\lambda, \zeta) = \begin{cases} \alpha, \beta > \alpha, & n=1, 2, \dots, M-1 \\ \beta, \beta < \alpha, \text{且满足 } c1, & n=1, 2, \dots, M-1, \\ 0, & n=M \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{Pt + nE_D + \lambda c(nT + t) - V_{M-n-1}(\lambda, \zeta)}{(\lambda + \zeta)t},$$

$$\beta = c(nT + t)/t,$$

$$c1: Pt + nE_D - \zeta c(nT + t) \leq V_{M-n-1}(\lambda, \zeta) \quad (15)$$

假定传输速率的概率密度为 $f_R(r)$, 则传输速率在 M 时刻的累积概率是 $\int_0^{R_{max}} f_R(r) dr$, 记为 $F\bar{R}$,

期望值是 $\int_0^{R_{\max}} r f_R(r) dr$, 记为 \tilde{R} . 此时, 若传输速率 R_M 满足 $R_M \geq \frac{c(MT+t)}{t}$, 则此时不被传输的数据量 $L_M = 0$.

定义 $R_{th} = \frac{c(MT+t)}{t}$. 若 $R_{th} < R_{\max}$, 则传输速率在 M 时刻小于 R_{th} 的累积概率为 $\int_0^{R_{th}} f_R(r) dr$, 记为 \hat{R}_{th} , 期望值为 $\int_0^{R_{th}} r f_R(r) dr$, 记为 \hat{R}_{th} . 于是, 发送终端停止在 M 时刻的返回率期望值 $V_0(\lambda, \zeta)$ 是

$$V_0(\lambda, \zeta) = \begin{cases} (Pt + ME_D) \tilde{R} + \lambda c(MT+t) \tilde{R} - \\ (\lambda + \zeta) \hat{R}_{th} t - \zeta c(MT+t) (\tilde{R} - \hat{R}_{th}), R_{th} \leq R_{\max} \\ (Pt + ME_D + \lambda c(MT+t)) \tilde{R} - (\lambda + \zeta) \tilde{R} t, R_{th} > R_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

根据反向推导, 结合式(13), 我们有

$$\begin{aligned} V_1(\lambda, \zeta) &= E[\min(Pt + (M-1)E_D - \\ &\quad \zeta c((M-1)T+t) + \\ &\quad (\lambda + \zeta)L_{M-1}, V_0(\lambda, \zeta))] \\ &= \int_{R_{th, M-1}(\lambda, \zeta)}^{R_{\max}} (Pt + (M-1)E_D - \\ &\quad \zeta c((M-1)T+t) + \\ &\quad (\lambda + \zeta)L_{M-1}) f_R(r) dr + \\ &\quad \int_0^{R_{th, M-1}(\lambda, \zeta)} V_0(\lambda, \zeta) f_R(r) dr. \end{aligned}$$

同理求得 V_2, \dots, V_{M-1} . 因此, 发送终端停止在 n 时刻的期望返回率 $V_{M-n}(\lambda, \zeta)$ 为

$$\begin{aligned} V_{M-n}(\lambda, \zeta) &= E[\min(Pt + nE_D - \zeta c(nT+t) + \\ &\quad (\lambda + \zeta)L_n, V_{M-n-1}(\lambda, \zeta))] \\ &= \int_{R_{th, n}(\lambda, \zeta)}^{R_{\max}} (Pt + nE_D - \zeta c(nT+t) + \\ &\quad (\lambda + \zeta)L_n) f_R(r) dr + \\ &\quad \int_0^{R_{th, n}(\lambda, \zeta)} V_{M-n-1}(\lambda, \zeta) f_R(r) dr, \\ &\quad n = 1, 2, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $R_{th, n}(\lambda, \zeta)$ 由式(15)给出. 于是, 我们得到式(12)的最优停止规则为

$$N(\zeta^*) = \min\{M \geq n \geq 1; R_n \geq R_{th, n}(\lambda, \zeta^*)\} \quad (18)$$

其中, $R_{th, n}(\lambda, \zeta^*)$ 的定义在式(15)中给出. 接下来, 我们需要求得 λ 和 ζ^* . 由于最优停止规则存在最优等式:

$$V^*(\lambda, \zeta^*) = E[\min(Pt + nE_D - \zeta^* c(nT+t) + (\lambda + \zeta^*)L_n, V^*(\lambda, \zeta^*))].$$

$V^*(\lambda, \zeta^*) = 0$ 为最优解. 因此, 最优等式变换为

$$0 = E[\min(Pt + nE_D - \zeta^* c(nT+t) + (\lambda + \zeta^*)L_n, 0)] \quad (19)$$

同时, 根据 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 条件有

$$\lambda c E[(NT+t)] - \lambda E[R_N t] = 0 \quad (20)$$

求解式(20)需要求得 $E[R_N]$ 和 $E[N]$, 因此我们接下来对 $E[R_N]$ 和 $E[N]$ 进行分析. 在给定信道增益随机变量 G 的累积分布函数 $F_G(g)$ 的情况下, 发送终端在每个周期 T 侦测到的传输速率 R 存在相同分布. 而且, 我们能推导出随机变量传输速率 R 的累积分布函数 $F_R(r)$. 假设发送终端停止在 N 时刻的传输速率随机变量为 R_N , 则随机变量 R_N 的累积分布函数是

$$F_{R_N}(r) = Pr[R_{N, n} \leq r | \text{停止在 } n] = \begin{cases} \frac{F_R(r) - F_R(R_{th, n}(\lambda, \zeta^*))}{1 - F_R(R_{th, n}(\lambda, \zeta^*))}, & r \geq R_{th, n}(\lambda, \zeta^*) \\ 0, & r < R_{th, n}(\lambda, \zeta^*) \end{cases} \quad (21)$$

而发送终端停止在 n 时刻的概率是

$$\rho_n = \left(\prod_{i=1}^{n-1} F_R(R_{th, i}(\lambda, \zeta^*)) \right) \cdot (1 - F_R(R_{th, n}(\lambda, \zeta^*))) \quad (22)$$

因此, 随机变量传输速率 R_N 的期望值为

$$\begin{aligned} E[R_N] &= \sum_{n=1}^M E[R_{N, n} | \text{停止在 } n] \cdot \rho_n \\ &= \sum_{n=1}^M \left(\int_{R_{th, n}(\lambda, \zeta^*)}^{R_{\max}} \frac{r}{1 - F_R(R_{th, n}(\lambda, \zeta^*))} dF_R(r) \right) \cdot \rho_n \end{aligned} \quad (23)$$

随机变量停止时刻 N 的期望值为

$$E[N] = \sum_{n=1}^M n \rho_n \quad (24)$$

综合式(19)和(20), 我们有

$$\begin{cases} 0 = \min(Pt + E[N]E_D - \zeta^* c(E[N]T+t) + \\ (\lambda + \zeta^*)E[L_N], 0) \\ \lambda c TE[N] + \lambda ct - \lambda t E[R_N] = 0 \end{cases} \quad (25)$$

其中, $E[R_N]$ 和 $E[N]$ 的定义在式(23)和(24)中. 最终, 我们通过求解式(25)获得 ζ^* 和 λ . ζ^* 和 λ 的求解过程可详细描述如下:

1. 开始, 令 $k=1$, 初始 $\lambda_k, \lambda_{\max}$ 和 λ_Δ ;
2. 若 $\lambda_k \leq \lambda_{\max}$, 初始 ζ_0 , 执行步 3; 否则, 执行步 8;
3. 根据式(16)求解 $V_0(\lambda_k, \zeta_0)$, 设置 $n=M-1$;
4. 若 $n \geq 1$, 执行步 5; 否则, 执行步 6;
5. 根据式(15)求得 $R_{th, n}(\lambda_k, \zeta_0)$, 根据式(17)求得 $V_{M-n}(\lambda_k, \zeta_0)$, 设置 $n=n-1$, 返回步 4;

6. 根据式(23)和(24)求 $E[R_N]$ 和 $E[N]$, 根据式(25)求得 ζ_{new} , 若 $|\zeta_{\text{new}} - \zeta_0| > \epsilon$ (设定的误差值), 则 $\zeta_0 = \zeta_{\text{new}}$, 返回步 3; 否则, $\zeta_k^* = \zeta_{\text{new}}$, 执行步 7;

7. 令 $k=k+1$; $\lambda_k = \lambda_{k-1} * \lambda_\Delta$, 返回步 2;

8. 选择 ζ_k^* 序列的最小值存为 ζ^* , 相应的 λ_k 存为 λ , 结束.

给定 λ_k 和 ζ_0 , 我们通过牛顿迭代法求解 ζ_k^* , 该迭代法二次收敛于最优能耗效率 ζ^* , 结果值在迭代 3 次后趋于稳定. 为了求得最优 ζ^* , 我们通过一系列的 λ_k 求出一系列的 ζ_k^* , 再选出所有 ζ_k^* 中的最小值为最优 ζ^* . 这里的 λ_k 是拉格朗日乘子, $\lambda_k \geq 0$, 其值小于 ζ_k^* , 并且根据 ζ_k^* 的值确定 λ_k 的系列值. 后面的实验表明该系列值的数量不超过 10. 根据 ζ^* 和 λ , 我们获得最优停止规则式(15)的最优传输速率阈值 $R_{th,n}(\lambda, \zeta^*)$.

最优传输速率阈值 $R_{th,n}(\lambda, \zeta^*)$ 给出发送终端在时刻 n 的停止阈值, 也是传输单位数据平均能耗最小时的速率阈值, 有效地控制发送终端停止侦测的时刻. 发送终端每隔周期 T 侦测一次信道, 当侦测到当前时刻 n 的传输速率大于等于 $R_{th,n}(\lambda, \zeta^*)$ 时, 发送终端停止侦测并发送数据; 否则, 继续侦测. 若发送终端侦测时间达到最大侦测时长 $M \cdot T$, 则必须发送数据. 发送终端按照该策略不断进行信道侦测和数据传输, 减小传输单位数据的平均能耗, 增大数据传递成功率.

5 仿真结果与分析

在本节实验中, 我们首先给出发送终端的数据生成速率 c 、侦测能耗 E_D 、侦测周期 T 、传输时间 t 以及最大传输延时 D_m 五个参数值与本文提出的传输策略的最优能耗效率 ζ^* 值之间的关系, 确定实验取值; 然后对比提出的策略与相关文献策略在不同参数取值下的平均能耗、平均传递成功率和平均调度周期的结果.

无线信道的衰落属于小尺度衰落, 其衰落模型通常被模拟为 Rayleigh 或 Rician 分布. 在模拟实验中, 我们给定发送终端和接收终端相同的信道状况累积分布函数, 且发送终端通过周期信号侦测获取信道状况信息. 根据文献[16], Rayleigh 信道衰落模型的信道增益概率密度函数为

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

其中, σ^2 是信道增益方差相关值, g 是信道增益. 结合式(1)得出传输速率 r 相对于最大速率 R_{\max} 的累积分布函数

$$F_R(r) = \frac{\exp\left(-\frac{(2^{r/W} - 1)^2 \cdot (N_0 W)^2}{2\sigma^2 P^2}\right)}{\exp\left(-\frac{(2^{R_{\max}/W} - 1)^2 \cdot (N_0 W)^2}{2\sigma^2 P^2}\right)}.$$

根据文献[16], Rician 信道衰落模型的信道增益概率密度函数为

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

其中, A 是主信号幅度的峰值, $I_0(\cdot)$ 是第一类 0 阶修正贝塞尔函数. 结合式(1)得出传输速率 r 相对于最大速率 R_{\max} 的累积分布函数

$$F_R(r) = \frac{Q_1\left(\frac{A}{\sigma}, \frac{(2^{r/W} - 1)N_0 W}{\sigma P}\right)}{Q_1\left(\frac{A}{\sigma}, \frac{(2^{R_{\max}/W} - 1)N_0 W}{\sigma P}\right)},$$

其中, $Q_1(\cdot)$ 是第一类 Marcum Q-函数. 仿真实验中各参数值见表 1.

表 1 仿真实验参数值

参数	描述	取值
W	带宽/MHz	1
N_0	噪声功率谱密度/(W/Hz)	10^{-6}
σ^2	信道增益方差相关值	1
g	信道增益	0~4
P	传输功率/mW	100
A	主信号幅度的峰值	1

5.1 不同参数对最优能耗效率 ζ^* 的影响

图 3(a) 给出了传输速率 r 的累积分布曲线. 从图中可看出, r 小于 3×10^4 bps 的累积概率是 0.02, 链路具有该传输速率的机会较小; Rayleigh 分布下 r 小于 1.6×10^5 bps 的累积概率为 0.5, Rician 分布下 r 小于 2×10^5 bps 的累积概率为 0.5, 链路具有大于该传输速率的机会小于 0.5, 此时的数据丢失概率大于 0.5. 因此, 根据传输速率 r 的累积分布, 我们将 Rayleigh 分布下的数据生成速率 c 设定为 $3 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$ bps, Rician 分布下的数据生成速率 c 设定为 $3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ bps.

从式(25)得出, 本文提出策略的最优能耗效率 ζ^* 与发送终端的 5 个参数值密切相关, 图 3(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g) 和 (h) 分别给出 5 个参数与 ζ^* 的关系曲线.

这里, ζ^* 是发送终端总能耗与成功传输数据总量的比值, 总能耗是发送终端每轮侦测能耗和传输能耗的累加和. 首先, 发送终端每轮的传输能耗固定, 随着数据生成速率 c 的减小, 累积的待传输数据量减少, 若它小于传输时间 t 内可传输的数据量, 则

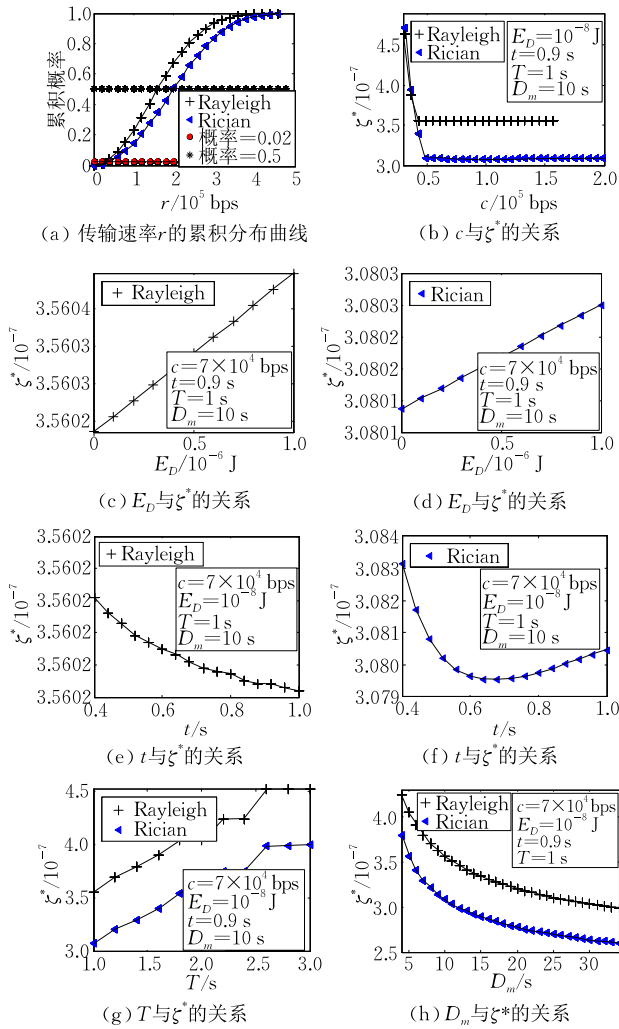


图3 数据传输速率 r 的累积分布曲线及各参数与 ζ^* 的关系

ζ^* 增大,反之 ζ^* 减小。其次,发送终端总能耗包括每次的侦测能耗 E_D ,所以 E_D 增大,总能耗增大, ζ^* 增大,反之 ζ^* 减小。第三,传输时间 t 增加,发送终端的传输能耗增多,若此时累积的数据量小于传输时间 t 内可传输的数据量,则 ζ^* 增大,但数据丢失概率减小,反之 ζ^* 略微减小,但数据丢失概率增大。第四,侦测周期 T 延长,发送终端侦测到良好信道状况的机会减小,在传输时间 t 内发送更多数据的机会减小,则 ζ^* 增大。第五,最大传输延时 D_m 增大,累积的数据量增多,发送终端在良好信道状况时传输的数据量增多,则 ζ^* 减小,但数据丢失概率增大。

以上分析表明了5个参数的取值对最优能耗效率 ζ^* 的影响。为了兼顾最优能耗效率和数据丢失概率,我们在仿真实验中对5个参数的值分别取: $c = 7 \times 10^4$ bps, $E_D = 10^{-8}$ J, $T = 1$ s, $t = 0.9$ s, $D_m = 10$ s。

5.2 不同策略的性能对比与分析

在第4节中,我们给出了带传输数据量约束的传

输单位数据平均能耗最小化问题求解方法。本节利用 Matlab 仿真工具,对本文提出的基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略(Energy Consumption Optimization Strategy for data transmission, ECOS)进行仿真实验,并与相关文献的7种数据传输策略^[9]进行比较,分析和评价各策略在5个参数变化情况下的平均能耗、平均传递成功率和平均调度周期等对比结果。这里,我们简要描述用于比较的7种策略:

- (1) 确定性传输策略(Deterministic Transmission Strategy, DTS):当发送终端等待达到最大传输延时 D_m 后,发送终端开始传输数据;
- (2) 随机传输策略(Random Transmission Strategy, RTS):发送终端以均等概率 $(1/M)$ 从最大传输延时 D_m 的 M 个时刻中随机选择某一时刻进行数据传输;
- (3) 概率传输策略(Probabilistic Transmission Strategy, PTS):发送终端预测到未来传输速率大于当前传输速率的概率小于某个给定概率阈值时,发送终端传输数据,相反继续侦测;
- (4) 平均速率传输策略(Average Rate Transmission Strategy, ARTS):发送终端获取的当前传输速率大于过去侦测的传输速率平均值时传输数据,否则继续侦测;
- (5) 基于秘书问题的最优传输策略(Optimal Transmission Strategy based on Secretary Problem, OTSSP):发送终端首先获得最大传输延时 D_m 的37%时长内的最大传输速率 $R_{c-\max}$,然后在接下来63%时长内不断侦测当前传输速率,若大于 $R_{c-\max}$ 则传输数据,否则继续侦测;
- (6) 能量有效的机会传输调度(Energy-Efficient Opportunistic Transmission Scheduler, E^2 OTS):包括最小化期望能耗(E^2 OTS-I)和最小化单位时间的平均能耗(E^2 OTS-II)两个策略,发送终端侦测到当前传输功率小于或等于相应的最优传输功率阈值时传输数据,否则继续侦测。

5.2.1 平均能耗

平均能耗反映有效发送每比特数据所消耗的能量(既包括每次传输数据的能耗 Pt ,也包括每次侦测信道的能耗 E_D)。图4给出了在 Rayleigh 分布和 Rician 分布下不同参数变化时8种策略的平均能耗对比结果。

从图4观察到,本文提出的 ECOS 的平均能耗最低,即节能效果最好。ECOS 通过最优停止规则获得发送终端在每个侦测时刻的最优速率阈值,从而使发送终端准确选择每轮数据传输的最优能效时刻,有效提高能量利用率。DTS、RTS 的平均能耗值

最大,因为它们没有考虑能量因素. PTS、ARTS 和 OTSSP 从节省能量的角度选择传输时刻,其平均能耗远小于 DTS 和 RTS 的平均能耗,但没有选择最优能效的传输时刻,所以节能效果远差于本文提出

的 ECOS,也劣于以能耗最优为目标的 E^2 OTS. E^2 OTS策略获得较小的平均能耗,其中 E^2 OTS-I 的平均能耗低于 E^2 OTS-II,因为 E^2 OTS-II 策略以最小化单位时间能耗为目标.

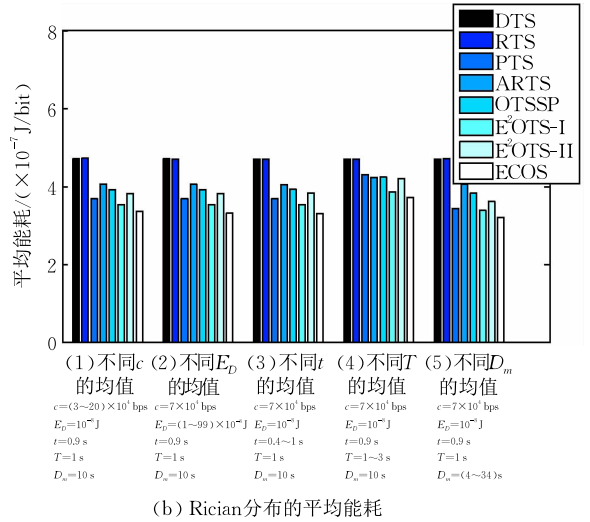
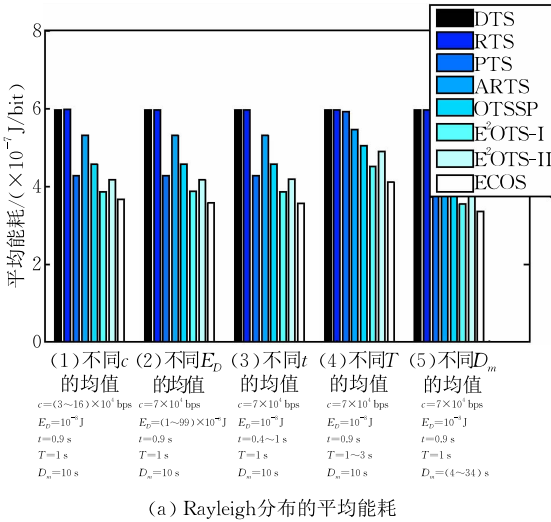


图 4 不同参数变化时的平均能耗对比

5.2.2 平均传递成功率

平均传递成功率为发送终端成功传输数据总量与生成的待传递数据总量的比值. 该值越大,被丢弃的数据量越少. 图 5 给出了在 Rayleigh 分布和 Rician 分布下不同参数变化时 8 种策略的平均传递成功率对比结果.

从图 5 观察到,ECOS 的平均传递成功率较高,即丢弃数据量相对较少. ECOS 构建平均能耗最小化问题时(参见式(6)),将传输完累积数据作为约束条件,获得的最优速率阈值,保证数据传递成功

率的提高. DTS 选择在最大延时时刻发送数据,造成大量超出延时的数据被丢弃,平均传递成功率最低. RTS 和 PTS 的平均传递成功率与传输速率分布相关. ARTS 主要对比过去传输速率的均值,选择的传输时刻较早,数据被成功传输的机会大. OTSSP、 E^2 OTS-I 和 E^2 OTS-II 策略的平均传递率较低. OTSSP 的侦测时长大于 37% 的最大传输时延,较多数据因超出延时被丢弃. E^2 OTS-I 和 E^2 OTS-II 以能耗优化为目标,没有考虑数据的传递成功率.

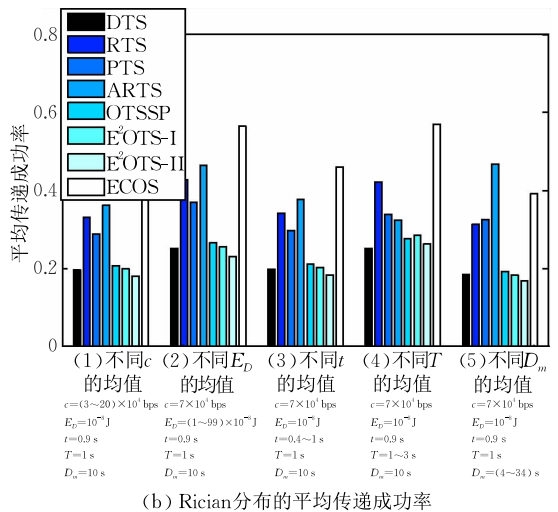
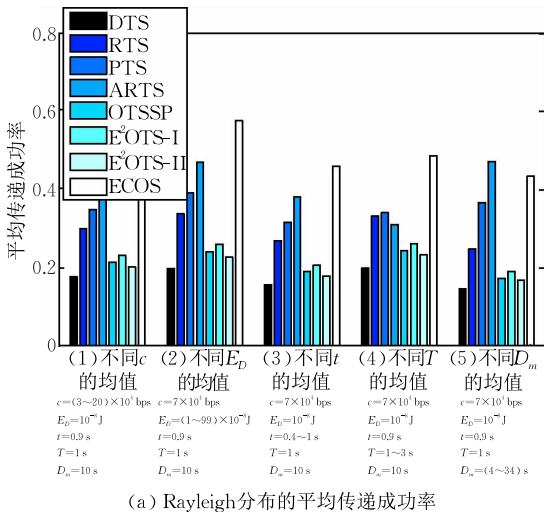


图 5 不同参数变化时的平均传递成功率对比

5.2.3 平均调度周期

平均调度周期是指在给定的时间段内, 发送终端每轮侦测时间的平均值. 该值越大, 表明发送终端平均侦测时间越长, 反之越短. 图 6 给出了在 Rayleigh 分布和 Rician 分布下不同参数变化时 8 种策略的平均调度周期对比结果.

从图 6 观察到, ECOS 的平均调度周期小于 DTS、OTSSP、 E^2 OTS-I 和 E^2 OTS-II 的平均调度周期, 但大于 RTS、PTS 和 ARTS 的平均调度周期. DTS 的平均调度周期最长, 等于最大传输延时.

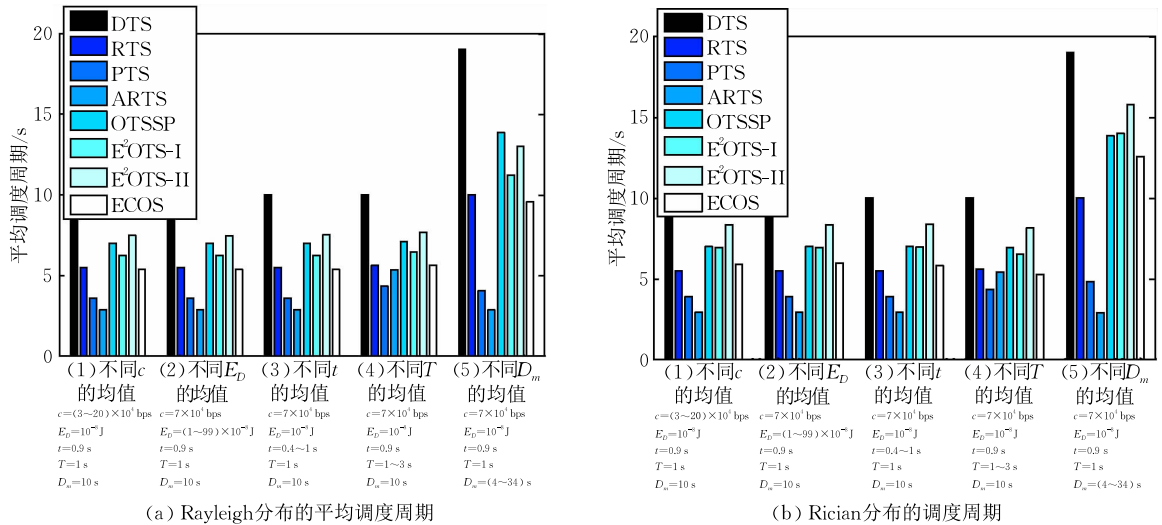


图 6 不同参数变化时的平均调度周期对比

综上所述, 我们提出的基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略能有效提高能量利用率, 减小数据丢失概率, 在保证网络性能的基础上优化网络能效.

6 结束语

随着移动网络技术的迅速发展, 网络能耗呈现快速增长趋势, 构建绿色网络成为移动网络建设和发展的重要研究主题之一. 在移动网络中, 无线链路的信道质量随时间随机变化, 具有不确定性. 当无线终端之间传输数据时, 发送终端独立地根据侦测到的信道质量的实时信息选择数据传输的最优时刻, 从而提高能量使用效率. 考虑到数据传输具有延时要求, 发送终端在最小化平均能耗时, 必须优化数据传递成功率. 本文构建了具有传输数据量约束的传输单位数据平均能耗最小化问题, 考虑到无线信道质量随时间变化的特征及分布式机会调度能提高网络性能和网络设备的能量利用率的特性, 提出基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略. 本文首先

RTS 的平均调度周期接近最大传输延时时内所有停止时刻的期望值. PTS 和 ARTS 的停止时刻分布与信道概率密度相关. OTSSP 的平均调度周期大于 37% 的最大传输延时. E^2 OTS 策略的调度周期与其功率阈值相关, 其平均调度周期较长. 平均调度周期长, 则发送终端累积的平均数据量大, 数据因超出延时被丢弃的概率增大. 因此, DTS、RTS 和 OTSSP 的平均传递成功率较小. 然而, ECOS 以传输完累积的待传递数据为约束来选择速率阈值, 因此每轮数据传输不仅降低平均能耗, 而且提高传递率.

构建具有传输延时要求和传输数据量约束的平均能耗最小化问题, 这是一个有限范围的最优停止规则问题; 然后证明最优停止规则的存在并给出问题求解方法和过程, 从而求得无线发送终端在每个侦测时刻的最优传输速率阈值. 发送终端周期性地侦测信道状况, 然后比较当前传输速率值与相应最优阈值来选择数据传输时刻, 实现降低传输能耗, 增加数据传递成功率. 仿真实验结果表明, 本文提出的策略达到较小的平均能耗和较大的平均传递成功率, 具有较好的能耗优化效果.

更进一步, 提高可变数据生成速率链路上数据传输的能效和传递率是我们今后的研究工作.

致谢 非常感谢评审专家, 你们耐心地审稿及专业的意见和建议对提高本文的质量有很大帮助.

参考文献

- [1] Lin Chuang, Tian Yuan, Yao Min. Green network and green evaluation: Mechanism, modeling and evaluation. 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. 计算机学报, 2011, 34(4): 593-612)
- [2] Zhang Fa, Anta A F, Wang Lin, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms. 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. 计算机学报, 2012, 35(3): 603-615)
- [3] Asadi A, Mancuso V. A survey on opportunistic scheduling in wireless communications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1671-168
- [4] Mao Wen-Guang, Wu Shan-Shan, Wang Xu-Dong. QoS-oriented distributed opportunistic scheduling for wireless networks with hybrid links//Proceedings of the 2013 Globecom. Atlanta, USA, 2013: 4524-4529
- [5] Zheng Dong, Ge Wei-Yan, Zhang Jun-Shan. Distributed opportunistic scheduling for Ad Hoc networks with random access: An optimal stopping approach. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(1): 205-222
- [6] Garcia-Saavedra A, Banchs A, Serrano P, et al. Distributed opportunistic scheduling: A control theoretic approach//Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM. Orlando, USA, 2012: 540-548
- [7] Chen Hua, Baras J S. Distributed opportunistic scheduling for wireless Ad-Hoc networks with block-fading model. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(11): 2324-2337
- [8] Garcia-Saavedra A, Serrano P, Banchs A. Energy-efficient optimization for distributed opportunistic scheduling. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 1083-1086
- [9] Poulakis M I, Panagopoulos A D, Constantinou P. Channel-aware opportunistic transmission scheduling for energy-efficient wireless links. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 192-204
- [10] Yan Zhong-Jiang, Zhang Zhou, Jiang Hai, et al. Optimal traffic scheduling in vehicular delay tolerant networks. IEEE Communications Letters, 2012, 16(1): 50-53
- [11] Huang Li-Jie, Jiang Hai, Zhang Zhou, et al. Optimal traffic scheduling between roadside units in vehicular delay tolerant networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(3): 1079-1094
- [12] Phan C V. A game-theoretic framework for opportunistic transmission in wireless networks//Proceedings of the 2014 IEEE 5th International Conference on Communications and Electronics (ICCE). Danang, Vietnam, 2014: 150-154
- [13] Amin O, Lampe L. Opportunistic energy efficient cooperative communication. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(5): 412-415
- [14] Zuo Jing, Dong Chen, Nguyen H V, et al. Cross-layer aided energy-efficient opportunistic routing in Ad Hoc networks. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 522-535
- [15] Wang Gao-Cai, Peng Ying, Feng Peng, et al. An energy consumption minimization routing scheme based on rate adaptation with QoS guarantee for the mobile environment. Computer Networks, 2014, 74: 48-57
- [16] Haykin S, Song Tie-Cheng, Xu Ping-Ping, Xu Zhi-Yong, et al. Communication System. 4th Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012(in Chinese)
(Haykin S 著, 宋铁成, 徐平平, 徐智勇等译. 通信系统. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2012)



PENG Ying, born in 1980, Ph. D. candidate, lecturer. Her research interests include energy optimization in wireless networks.

WANG Gao-Cai, born in 1976, Ph.D., professor. Ph.D. supervisor. His current research interests include computer networks, system performance evaluation and stochastic

methods.

HUANG Shu-Qiang, born in 1977, Ph. D., professor. His current research interests include wireless mesh networks and mobile Internet.

WANG Nao, born in 1977, M.S., lecturer. Her research interest is networks optimization.

LI Dao-Feng, born in 1974, Ph. D., associate professor. His current research interests include cryptography and information security.

Background

This research is supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 61562006 and 61262003, in part by the Natural Science Foundation of

Guangxi Province under Grant No. 2010GXNSFC013013, and the Educational Commission Fund of Guangdong Province (No. 2013KJCX0018). These projects mainly focus on energy

optimization in computer networks.

With the wide deployment of mobile networks, such as mobile ad hoc networks, mobile social networks, etc., and the rapid development of data services, how to utilize mobile networks resource efficiently and decrease energy consumption of wireless terminals has become a very important and urgent topic for constructing green mobile computing. Our project team members have studied the energy consumption optimization routing scheme. And this paper still focuses on the energy consumption optimization problem in wireless network. It is to solve the problem of minimizing the average energy consumption per bit data transmitted in wireless links, and guarantee the data transmission delay demand. In this paper, we consider the generation rate of data accumulated in the sending terminal, which has less been considered in other literatures.

Therefore, this paper studies the data transmission

energy consumption minimization problem with data transmission delay demand under the given data generation rate in wireless links. Considering the time-varying characteristics of wireless channel quality and network performance and energy utilization of network equipment can be improved by using distributed opportunistic scheduling, this paper proposes an energy consumption optimization strategy for data transmission based on optimal stopping theory. Firstly, a finite horizon optimal stopping problem with transmission data quantity constraint and energy consumption minimization is constructed, and then we prove the existence of optimal stopping rule and give the solving methods and processes. At last, we obtain the optimal transmission rate threshold of the sending terminal for each channel detection slot time, so as to form the data transmission energy consumption optimization strategy based on optimal stopping theory.