

移动网络中基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略

彭颖¹ 王高才² 王淦²

(广西大学电气工程学院 南宁 530004)¹ (广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)²

摘要 数据传输能耗是移动网络能耗的重要部分,提高数据传输能耗效率是优化移动网络能耗的重要课题。考虑数据具有传输延时的要求,研究了基于数据到达速率的数据传输平均能耗最小化问题。利用无线信道质量随机变化的特征,构建基于数据到达速率的平均能耗最小化问题,然后将其转化为最优停止问题,证明最优停止规则存在。最后通过求解最优近视停止规则来获得各侦测时刻的最优传输速率阈值,实现基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略。对提出的策略与其他策略就平均能耗、平均传递率和平均调度周期进行了仿真对比,结果表明提出的策略具有较小的平均能耗和较高的平均传递率,取得了较好的能耗优化效果。

关键词 移动网络,到达速率,数据传输,能耗优化,最优停止,最优速率

中图分类号 TP302 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.023

Energy Consumption Optimization Strategy for Data Transmission Based on Data Arrival Rate in Mobile Networks

PENG Ying¹ WANG Gao-cai² WANG Nao²

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

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

Abstract Energy consumption of data transmission is a significant part of energy consumption in mobile networks. Energy efficient transmission is an important topic to optimize energy consumption in mobile networks. The average energy consumption minimization problem based on data arrival rate was studied, when data has delay demand. The minimization problem was constructed using time-varying characteristics of wireless channel quality and it was turned into an optimal stopping problem. The existence of optimal stopping rule was proved. Finally, the optimal myopic stopping rule was solved to obtain optimal transmission rate threshold at each detection time. Thus the energy consumption optimization strategy for data transmission based on data arrival rate was realized. Simulations compared this strategy with others in the index of average energy consumption, average delivery ratio and average scheduling period. The results show that our strategy has less average energy consumption and higher average delivery ratio, gaining better optimization effect.

Keywords Mobile networks, Arrival rate, Data transmission, Energy consumption optimization, Optimal stopping, Optimal rate

1 引言

随着移动网络技术的快速发展,移动网络被部署到各个领域,如办公、学习等。用户携带移动终端(如PADS、智能电话等)就能即时进行网络通信,移动终端的方便性和灵活性使其受到广泛青睐,特别是在移动情况下。两个移动终端进入传输范围并建立连接后就能传输数据。传输数据会消耗能量,能量对电池驱动的移动终端非常宝贵,尤其是在电池无法及时得到能量补充的情况下。节省移动网络的数据传输能耗,提高能耗效率,受到学者们的广泛关注,并成为移动网络的重要研究主题^[1-4]。

在移动网络中,设备移动和环境干扰造成信道质量随机

变化。根据香农公式^[5],当传输功率和传输持续时间(简称传输时间)固定时,传输速率越大,则传输数据量越多,传输单位数据的能耗越少。因此,发送终端周期性地侦测信道,当发现良好质量(即更高的传输速率)时后传输数据。然而,发送终端的待传输数据量可能少于信道质量保持时间内可传输的数据量,所以本文解除文献[5]对传输时间的固定,并根据待传输数据量来调整传输时间,以节省传输功率。与文献[3]忽略传输延时不同,本文考虑最大传输延时要求。与文献[4]最小化期望能耗和单位时间平均能耗不同,本文最小化传输单位数据平均能耗。文献[5]研究了无线链路以给定的速率产生待传输数据时的平均能耗最小化问题,本文则假定产生待传输数据的速率可变。在某些场景中,数据的到达速率不能保

到稿日期:2015-12-27 返修日期:2016-04-06 本文受国家自然科学基金(61562006,61262003),广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380181,2015GXNSFBA139249,2013GXNSFGA019006)资助。

彭颖(1980—),女,博士生,讲师,主要研究方向为移动网络能耗优化,E-mail:violetpy@gxu.edu.cn;王高才(1976—),男,博士,教授,博士生导师,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,E-mail:gcwang@gxu.edu.cn(通信作者);王淦(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为网络优化。

持恒定,如间歇性传递文件、网络不稳定等。因此,本文研究数据具有传输延时要求且到达速率可变的数据传输能效问题。

本文第2节回顾相关研究工作;第3节描述系统模型和能耗优化问题;第4节阐述基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略;第5节给出仿真结果及分析;最后总结全文,并对进一步工作进行展望。

2 相关研究

近年来,利用信道质量随机变化的特征来提高网络性能的课题得到广泛研究。在移动网络中,即时分配网络资源给信道质量好的设备,充分利用良好信道质量时刻来传输数据,不仅提高了能量利用效率^[3-6],而且增大了网络吞吐量^[7,8]。

文献[3]利用最优停止理论获得同构网络环境中多个设备竞争相同信道时各侦测时刻的最优传输速率阈值,节省了能量,但其没有考虑数据传输延时。文献[4]以在最大传输延时采用最大传输功率为基础,利用最优停止理论推导最大延时之前各选择时刻的最优传输功率阈值,最小化能耗期望值和单位时间的平均能耗值。作者假定发送终端一直具有足够的待传输数据,但实际的待传输数据量可能多于或少于当前信道质量保持时间内可传输的数据量。文献[5]利用最优停止理论推导数据在传输延时要求下各侦测时刻的最优传输速率阈值,发送终端根据该速率阈值选择最优传输时刻以最小化传输单位数据的平均能耗。文献[6]利用瞬时信道状况好的中继来传递信息,减少信息在整个路由中的能耗。文献[7]利用最优停止理论来获得多设备竞争单信道的最优传输时刻,提高了网络吞吐量。文献[8]则研究多设备竞争选择多信道场景下的吞吐量的提高。

上述研究利用最优停止理论选择最优信道质量时刻。最优停止理论基于连续观察到的随机变量,选择在合适时刻采取特定行为来最小化期望成本或最大化期望报酬^[10]。无线信道质量随机变化,其值可实时监测获得。为了最小化数据传输平均能耗,发送终端不断观察信道质量,结合待传输数据量,决定当前时刻是否发送数据,该决定的作出依赖于未来是否存在更好的速率期望值。发送终端基于序列观察的信道质量来选择最优停止观察和传输数据时刻,以最小化平均能耗,最优停止理论是获得最优停止时刻的有效方法。因此,本文利用最优停止理论分析基于数据到达速率的数据传输能耗问题,获得平均能耗最小化和延时保证的传输策略。

本文的主要贡献包括:1)利用无线信道质量随机变化的特征,研究数据具有传输延时要求且到达速率可变的能耗优化问题,给出基于数据到达速率的传输单位数据平均能耗模型和平均能耗最小化模型;2)利用最优停止理论分析不同数据到达速率对平均能耗的影响,获得不同数据到达速率下各侦测时刻的最优传输速率阈值,形成基于数据到达速率的能耗优化策略;3)通过理论分析和模拟实验,验证了提出的策略在保证数据延时下的能耗优化效果。

3 系统模型与问题描述

3.1 系统模型

假定单位时间到达的数据包数量服从 $f_B(b)$ 的概率分

布,每个数据包容量为 α 。假设移动终端通过载波侦听多路访问/冲突避免机制访问信道。无线信道质量随机变化,质量保持时间为 τ 。发送终端每隔周期 τ 侦测一次信道,侦测持续时间远小于 τ ,侦测能耗为 E_D 。发送终端侦测 $n(n=1,2,\dots)$ 次信道后传输数据,传输时间 t_n 依赖待传输数据量 C_n ,且不超过信道保持时间 τ ,则 $t_n = \min\{C_n/R_n, \tau\}$,传输数据量 $Q_n = \min\{C_n, R_n\tau\}$ 。 R_n 是第 n 次侦测到的传输速率, $\min\{\}$ 表示取较小值函数。发送终端的传输功率为 P ,传输能耗为 $P \cdot t_n$,其值大于 E_D 。侦测 n 次信道后传输一次数据的过程称为一轮数据传输,其能耗 E_n 为 $nE_D + P \cdot t_n$,则传输单位数据的平均能耗 $Z_n = E_n/Q_n$ 。若观察 N 次信道后传输数据获得最小平均能耗 Z_N ,则 N 为最优停止时间。发送终端至少侦测一次信道,最优停止时间 $N \geq 1$ 。待传输数据的最大传输延时为 D_m 。定义 $M = \lfloor D_m/\tau \rfloor$,则有 $1 \leq N \leq M$ 。 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

3.2 问题描述

上述数据传输重复 J 轮,获得的最优停止时间序列为 $\{N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_J\}$,相应的能耗和传输数据量序列分别为 $\{E_{N_1}, E_{N_2}, \dots, E_{N_j}, \dots, E_{N_J}\}$ 和 $\{Q_{N_1}, Q_{N_2}, \dots, Q_{N_j}, \dots, Q_{N_J}\}$ 。其中, $N_j (1 \leq N_j \leq M)$ 是第 j 轮的最优停止时间, E_{N_j} 和 Q_{N_j} 是第 j 轮最优停止时间为 N_j 时的能耗和传输数据量。 J 轮的总能耗和总传输数据量分别是 $\sum_{j=1}^J E_{N_j}$ 和 $\sum_{j=1}^J Q_{N_j}$ 。定义传输单位数据的平均能耗为能耗效率 ζ ,则 $\zeta = \sum_{j=1}^J E_{N_j} / \sum_{j=1}^J Q_{N_j}$ 。根据大数定律,能耗效率 ζ 收敛于 $E[E_N]/E[Q_N]$, $E[\cdot]$ 表示期望值。我们的目标是找到最优停止时间 N^* ,获得最优能耗效率 ζ^* ,即传输单位数据的最小平均能耗。其中:

$$\zeta^* = \inf_{N \in \mathbb{N}} \frac{E[E_N]}{E[Q_N]} = \inf_{N \in \mathbb{N}} \frac{E[NE_D + Pt_N]}{E[Q_N]},$$

$$N = \{N; 1 \leq N \leq M\} \quad (1)$$

4 基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略

4.1 平均能耗最小化的最优停止问题

首先,将式(1)的平均能耗最小化问题转化为成本函数:

$$Y_n(\zeta) = E_n - \zeta Q_n = nE_D + Pt_n - \zeta Q_n \quad (2)$$

于是,关于 ζ 的最小化 $E[Y_n]$ 的最优停止问题形成为:

$$V(\zeta) = \inf_{N \in \mathbb{N}} E[Y_n(\zeta)] = \inf_{N \in \mathbb{N}} E[nE_D + Pt_n - \zeta Q_n] \quad (3)$$

该最优停止问题表明,发送终端需要找到最优停止时间 $N^*(\zeta)$ 以最小化期望成本 $E[Y_n(\zeta)]$ 。于是有:

$$N^*(\zeta) = \arg \inf_{N \in \mathbb{N}} (E[NE_D + Pt_N] - E[\zeta Q_N]) \quad (4)$$

讨论1 能耗效率 ζ 满足 $P/(\lambda\alpha) > \zeta > E_D/(\lambda\alpha\tau)$ 。其中, λ 表示单位时间内到达的数据包数量的期望值。

发送终端在时间 N 停止并发送数据,若传输数据量 Q_N 等于待传输数据量 C_N ,则 $(NE_D + Pt_N)/C_N$ 为最小的能耗效率 ζ 。所以,停止时间 N 的能耗效率 ζ 满足 $\zeta \geq (NE_D + Pt_N)/C_N$ 。假定单位时间到达的数据包数量的期望值为 λ ,则 C_N 的期望值为 $\lambda\alpha(N\tau + t_N)$ 。则有 $\zeta \geq (NE_D + Pt_N)/(\lambda\alpha(N\tau + t_N))$ 。

又因为 $t_N \leq \tau$, 所以有 $\zeta \geq (NE_D + Pt_N)/(\lambda\alpha(N\tau + \tau))$ 。

因为传输能耗 Pt_N 大于侦测能耗 E_D , 所以 $\zeta > E_D/(\lambda\alpha\tau)$ 。

$P\tau/(\lambda\alpha\tau)$ 是时间 τ 内的传输能耗 $P\tau$ 与待传输数据期望值 $\lambda\alpha\tau$ 的比值。若 $\zeta \geq P\tau/(\lambda\alpha\tau)$, 则发送终端不进行信道侦测, 直接传输数据将获得更小的能耗效率 ζ 值。因此有 $\zeta < P/(\lambda\alpha)$ 。

4.2 最优停止问题存在最优停止规则

命题1 式(3)存在最优停止规则 $N^*(\zeta)$, 使得 $E[Y_{N^*(\zeta)}(\zeta)] = V(\zeta)$ 。

证明: 根据文献[10], 如果满足下列两个条件:

$$A1) E[\inf_n Y_n] > -\infty$$

$$A2) \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{n \rightarrow \infty} Y_n \geq Y_\infty \text{ a. s.}$$

则最优停止规则存在。

由于 $n \geq 1, t_n > 0$, 因此式(3)的 Y_n 为 $Y_n = nE_D + Pt_n - \zeta Q_n > -\zeta Q_n$ 。

因为单位时间内到达发送终端的数据包数量服从 $f_B(b)$ 的概率分布, 且 $n \leq M$, 所以待传输数据量 $C_n < \infty$ 。

$Q_n = \min\{C_n, R_n\tau\}$, 所以 $Q_n < \infty$ 。且 $\zeta < P/(\lambda\alpha)$, 所以 $-\zeta Q_n > -\infty$ 。

故 $Y_n = nE_D + Pt_n - \zeta Q_n > -\infty$ 成立。因此, 条件 A1) 满足。

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 存在 $nE_D \rightarrow \infty$ 和 $C_n \rightarrow \infty$ 。

$Q_n = \min\{C_n, R_n\tau\}$, 且 $R_n < \infty$, 所以 $Q_n < \infty$ 。因此, $\lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{n \rightarrow \infty} Y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{n \rightarrow \infty} (nE_D + Pt_n - \zeta Q_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{n \rightarrow \infty} (nE_D) = \infty$, 显然 $Y_\infty = \infty$ 。因此, 条件 A2) 满足。证毕。

4.3 最优停止问题的最优近视停止规则

最优停止问题的近视(myopic)停止规则表明, 若停止在时间 n 的成本不高于在时间 $n+1$ 的期望成本, 则决策者在时间 n 停止并采取特定行为, 这是 k 步预测(k -stage look-ahead)停止规则的最简形式。 $N^*(\zeta) = \min\{M > n \geq 1; Y_n(\zeta) \leq E[Y_{n+1}(\zeta) | F_n]\}$ 是问题式(3)的近视停止规则。 F_n 表征在时间 n 已经获得 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 和 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 的值。发送终端持续观察到时间 n , 发现成本 $Y_n(\zeta)$ 不大于期望成本 $E[Y_{n+1}(\zeta) | F_n]$, 则停止观察并发送数据, 反之继续观察信道质量。

命题2 当 $N^*(\zeta) = \min\{M > n \geq 1; Y_n(\zeta) \leq E[Y_{n+1}(\zeta) | F_n]\}$ 近视停止规则满足 $C_n \geq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$ 或 $\bar{R}\delta - \lambda\alpha\tau \leq C_n < \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq C_n \bar{R}/(C_n + \lambda\alpha\tau - \bar{R}\delta)$ 时, 该规则最优。 $\bar{R}$ 是传输速率期望值, $\delta = (\zeta\lambda\alpha\tau - E_D)/P$ 。

证明: 根据文献[10], 有限范围的单调停止规则问题的近视停止规则最优。观察时间 $n \leq M$, 所以停止规则问题式(3)是在有限范围的。问题单调表明, 若停止规则 $N^*(\zeta)$ 要求停止在 n , 但没有停止, 则该规则会要求停止在 $n+1, n+2, \dots$, 不管未来每一步的观察结果。接下来, 证明问题(3)的单调性。

定义 $\Phi(\zeta) = E[Y_{n+1}(\zeta) | F_n] - Y_n(\zeta)$ 。则有:

$$\Phi(\zeta) = E[(n+1)E_D + Pt_{n+1} - \zeta Q_{n+1} | F_n] - (nE_D + Pt_n - \zeta Q_n)$$

$$= E_D - \zeta(E[Q_{n+1} | F_n] - Q_n) + P(E[t_{n+1} | F_n] - t_n)$$

根据第3.1节对传输数据量 Q_n 的定义可得:

$$E[Q_{n+1} | F_n] = \min\{E[C_{n+1} | F_n], E[R_{n+1}\tau | F_n]\}$$

由于单位时间内到达发送终端的数据包数量的期望值为 λ , 因此 $E[C_{n+1} | F_n] = E[C_n | F_n] + \lambda\alpha\tau = C_n + \lambda\alpha\tau$ 。

若信道的传输速率期望值为 $\bar{R}$, 则 $E[R_{n+1}\tau | F_n] = \bar{R}\tau$ 。

定义不等式 Ine1 和 Ine2 分别为 $C_n + \lambda\alpha\tau \geq \bar{R}\tau$ 和 $C_n + \lambda\alpha\tau < \bar{R}\tau$; 定义不等式 Ine3 和 Ine4 分别为 $C_n \geq R_n\tau$ 和 $C_n < R_n\tau$ 。于是, 得到:

(1) 若 Ine1 和 Ine3 成立, 则 $\Phi(\zeta) = E_D - \zeta(\bar{R}\tau - R_n\tau)$ 。

若 $R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$, 则 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。

因为 $\zeta > E_D/(\lambda\alpha\tau)$, 所以 $\bar{R}\tau - E_D/(\zeta) > \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau$ 。因此有: 当 $C_n \geq \bar{R}\tau - E_D/(\zeta), R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$ 时, 存在 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。

(2) 若 Ine1 和 Ine4 成立, 则 $\Phi(\zeta) = E_D - \zeta(\bar{R}\tau - R_n\tau) + P(\tau - t_n)$ 。

若 $R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$, 则 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。因此有: 当 $C_n \geq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$ 时, 存在 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。

(3) 若 Ine2 和 Ine3 成立, 则 $\Phi(\zeta) = E_D - \zeta(C_n + \bar{X}B\tau - R_n\tau) + P(E[t_{n+1} | F_n] - \tau)$ 。

因为 $C_n \geq R_n\tau, E[t_{n+1} | F_n] \leq \tau$, 所以 $\Phi(\zeta) \leq E_D - \zeta\lambda\alpha\tau$ 。而且有 $\zeta > E_D/(\lambda\alpha\tau)$ 。因此有: 当 $C_n \leq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, C_n \geq R_n\tau$ 时, 存在 $\Phi(\zeta) \leq 0$ 。

(4) 若 Ine2 和 Ine4 成立, 则 $\Phi(\zeta) = E_D - \zeta\alpha\tau + P(E[t_{n+1} | F_n] - t_n)$ 。

若 $E[t_{n+1} | F_n] - t_n \geq (\zeta\alpha\tau - E_D)/P$, 则 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。

令 $\delta = (\zeta\alpha\tau - E_D)/P$, 则 $(C_n + \lambda\alpha\tau)/\bar{R} - C_n/R_n \geq \delta$ 。

若 $C_n + \lambda\alpha\tau - \bar{R}\delta \geq 0$, 则当 $R_n \geq C_n \bar{R}/(C_n + \lambda\alpha\tau - \bar{R}\delta)$, $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。因此有: 当 $\bar{R}\delta - \lambda\alpha\tau \leq C_n \leq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq C_n \bar{R}/(C_n + \lambda\alpha\tau - \bar{R}\delta)$ 时, 存在 $\Phi(\zeta) \geq 0$ 。

综上, 当 $C_n \geq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$; 或当 $\bar{R}\delta - \lambda\alpha\tau \leq C_n \leq \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau, R_n \geq C_n \bar{R}/(C_n + \lambda\alpha\tau - \bar{R}\delta)$ 时, 停止规则问题式(3)是单调的。其中, $\delta = (\zeta\lambda\alpha\tau - E_D)/P$ 。因此, 该近视停止规则是最优的。证毕。

4.4 基于数据到达速率的最优停止策略

发送终端侦测到 M 时必须停止侦测并传输数据, 所以, 时间 M 的传输速率阈值为 0。问题式(3)的传输速率阈值为:

$$R_{\theta, n}(\zeta) = \begin{cases} R_{\theta, n}^1(\zeta), & n=1, \dots, M-1, C_n^1(\zeta) \leq C_n < C_n^2(\zeta) \\ R_{\theta, n}^2(\zeta), & n=1, \dots, M-1, C_n \geq C_n^2(\zeta) \\ 0, & n=M, C_n > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{\theta, n}^1(\zeta) = C_n \bar{R}/(C_n + \lambda\alpha\tau - \delta \bar{R}), R_{\theta, n}^2(\zeta) = \bar{R} - E_D/(\zeta\tau)$$

$$C_n^1(\zeta) = \bar{R}\delta - \lambda\alpha\tau, C_n^2(\zeta) = \bar{R}\tau - \lambda\alpha\tau$$

$$\delta = (\zeta\lambda\alpha\tau - E_D)/P$$

最优停止问题式(3)的最优停止规则为:

$$N^*(\zeta^*) = \min\{M \geq n \geq 1, R_n \geq R_{\theta, n}(\zeta^*)\} \quad (6)$$

其中, $R_{\theta, n}(\zeta^*)$ 在式(5)中定义。计算 $R_{\theta, n}(\zeta^*)$ 时必须先获

得最优能耗效率 ζ^* 的值。最优停止问题式(3)存在的最优等式为:

$$E[\min(P_{tN} + NE_D - \zeta^* Q_N, V^*(\zeta^*))] = V^*(\zeta^*) \quad (7)$$

当 $V^*(\zeta^*) = 0$ 时,最优等式(7)存在最优解。因此有:

$$\zeta^* = \frac{PE[t_N] + E[N]E_D}{E[Q_N]} \quad (8)$$

给定单位时间内到达的数据包数量 B 的概率 $f_B(b)$ 和累积分布函数 $F_B(b)$,到 $n \cdot \tau$ 时为止到达的数据包数量小于等于 z 的概率为:

$$P_{B,n}(z) = \sum_{i=0}^z P_{B,n-1}(z-i) \cdot \tau f_B(i/\tau) \quad (9)$$

式(9)中 $n=1$ 时的概率为 $P_{B,1}(z) = \tau F_B(z/\tau)$ 。

给定信道增益随机变量 G 的累积分布函数 $F_G(g)$,推导出传输速率 R 的累积分布函数 $F_R(r)$ 。则停止在时间 n 的概率为:

$$\begin{aligned} \theta_n &= \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \omega_i(\zeta^*)) \cdot \omega_n(\zeta^*) \\ \omega_i(\zeta^*) &= (P_{X,i}(B_{th,i}^2(\zeta^*)) - P_{X,i}(B_{th,i}^1(\zeta^*))) \cdot (1 - F_R(R_{th,i}^1(\zeta^*))) + (1 - P_{X,i}(B_{th,i}^2(\zeta^*))) \cdot (1 - F_R(R_{th,i}^2(\zeta^*))) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $B_{th,i}^1(\zeta^*) = \lceil C_{th,i}^1(\zeta^*)/\alpha \rceil$, $B_{th,i}^2(\zeta^*) = \lceil C_{th,i}^2(\zeta^*)/\alpha \rceil$, 分别代表数据包的数量阈值。 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

因此,停止时间 N 的期望值为:

$$E[N] = \sum_{n=1}^M n \cdot \theta_n \quad (11)$$

R_N 是停止时间 N 的传输速率,则 R_N 的累积分布函数为:

$$F_{R_N}(r) = \Pr[R_{N,n} \leq r | \text{停止在 } n] = \begin{cases} \frac{F_R(r) - F_R(R_{th,n}(\zeta^*))}{1 - F_R(R_{th,n}(\zeta^*))}, & r \geq R_{th,n}(\zeta^*) \\ 0, & r < R_{th,n}(\zeta^*) \end{cases} \quad (12)$$

其中, B_N 是停止时间 N 的待传输数据包数量,则 B_N 的累积分布函数为:

$$F_{B_N}(b) = \Pr[B_{N,n} \leq b | \text{停止在 } n] = \begin{cases} \frac{P_{B,n}(b) - P_{B,n}(B_{th,n}^1(\zeta^*))}{1 - P_{B,n}(B_{th,n}^1(\zeta^*))}, & x \geq B_{th,n}^1(\zeta^*) \\ 0, & x < B_{th,n}^1(\zeta^*) \end{cases} \quad (13)$$

因此,停止在时间 N 时的传输时间 t_N 的期望值为:

$$\begin{aligned} E[t_N] &= \sum_{n=1}^M E[t_{N,n} | \text{停止在 } n] \cdot \theta_n \\ &= \sum_{n=1}^M \left(\frac{\bar{t}_n(\zeta^*)}{1 - P_{B,n}(B_{th,n}^1(\zeta^*))} \right) \cdot \theta_n \\ \bar{t}_n(\zeta^*) &= \int_{B_{th,n}^1(\zeta^*)}^{B_{th,n}^2(\zeta^*)} \rho_n^1(b, \zeta^*) dP_{B,n}(b) + \int_{B_{th,n}^2(\zeta^*)}^{\infty} \rho_n^2(b, \zeta^*) dP_{B,n}(b) \\ \rho_n^1(b, \zeta^*) &= \frac{\int_{R_{th,n}^1(\zeta^*)}^{b^{\alpha/\tau}} \tau dF_R(r) + \int_{b^{\alpha/\tau}}^{R_{\max}} b\alpha/r dF_R(r)}{1 - F_R(R_{th,n}^1(\zeta^*))} \\ \rho_n^2(b, \zeta^*) &= \frac{\int_{R_{th,n}^2(\zeta^*)}^{b^{\alpha/\tau}} \tau dF_R(r) + \int_{b^{\alpha/\tau}}^{R_{\max}} b\alpha/r dF_R(r)}{1 - F_R(R_{th,n}^2(\zeta^*))} \end{aligned} \quad (14)$$

停止在时间 N 时的传输数据量 Q_N 的期望值为:

$$\begin{aligned} E[Q_N] &= \sum_{n=1}^M E[Q_{N,n} | \text{停止在 } n] \cdot \theta_n \\ &= \sum_{n=1}^M \left(\frac{\bar{Q}_n(\zeta^*)}{1 - P_{B,n}(B_{th,n}^1(\zeta^*))} \right) \cdot \theta_n \\ \bar{Q}_n(\zeta^*) &= \int_{B_{th,n}^1(\zeta^*)}^{B_{th,n}^2(\zeta^*)} \varphi_n^1(b, \zeta^*) dP_{B,n}(b) + \int_{B_{th,n}^2(\zeta^*)}^{\infty} \varphi_n^2(b, \zeta^*) dP_{B,n}(b) \\ \varphi_n^1(x, \zeta^*) &= \frac{\int_{B_{th,n}^1(\zeta^*)}^{b^{\alpha/\tau}} r\tau dF_R(r) + \int_{b^{\alpha/\tau}}^{R_{\max}} b\alpha dF_R(r)}{1 - F_R(R_{th,n}^1(\zeta^*))} \\ \varphi_n^2(x, \zeta^*) &= \frac{\int_{B_{th,n}^2(\zeta^*)}^{b^{\alpha/\tau}} r\tau dF_R(r) + \int_{b^{\alpha/\tau}}^{R_{\max}} b\alpha dF_R(r)}{1 - F_R(R_{th,n}^2(\zeta^*))} \end{aligned} \quad (15)$$

最终,通过求解式(8)获得 ζ^* 。 ζ^* 的详细求解过程如下。

Step 1 开始,初始 ζ_0 , 执行 Step 2;

Step 2 根据式(5)求解 $R_{th,n}(\zeta_0)$;

Step 3 根据式(10)求解 θ_n ;

Step 4 根据式(11)、式(14)和式(15)求 $E[N]$, $E[t_N]$ 和 $E[Q_N]$;

Step 5 根据式(8)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 Step 2; 否则, $\zeta^* = \zeta_{\text{new}}$, 结束。

给定 ζ_0 , 通过牛顿迭代法求解 ζ^* , 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。根据 ζ^* , 获得式(6)的最优传输速率阈值 $R_{th,n}(\zeta^*)$ 。该阈值与单位时间到达的数据包数量期望值 λ 、侦测能耗 E_D 、侦测周期 τ 和最大传输延时 D_m 的参数值相关。若一个或多个参数值发生改变,则根据上述过程重新计算 ζ^* 和 $R_{th,n}(\zeta^*)$ 的值; 否则保持不变。

最优传输速率阈值 $R_{th,n}(\zeta^*)$ 给出了不同数据到达速率下的停止侦测和传输数据的速率阈值,也是传输单位数据平均能耗最小的速率阈值,从而选择传输数据的最优能效时刻。发送终端每隔周期 τ 侦测一次信道,当侦测到时间 n 的传输速率不小于最优速率阈值 $R_{th,n}(\zeta^*)$ 时,发送终端停止侦测并传输数据; 否则继续侦测信道。若侦测到最大延时 $M \cdot \tau$, 发送终端必须传输数据。发送终端按照该策略进行信道侦测和数据传输,从而减小传输单位数据的平均能耗,增大数据传递率。

5 仿真结果与分析

本节利用 Matlab 工具进行仿真实验,比较和分析本文的基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略(Energy Consumption Optimization Strategy, ECOS)与其他 7 种数据传输策略^[5]在单位时间到达的数据包数量期望值 λ 、侦测能耗 E_D 、侦测周期 τ 和最大传输延时 D_m 的值变化时的平均能耗、平均传递率和平均调度周期。信道衰落模型为 Rayleigh 和 Rician 分布^[5]。本文对比的策略^[5]是: 1) 确定性传输策略(Deterministic Transmission Strategy, DTS); 2) 随机传输策略(Random Transmission Strategy, RTS); 3) 概率传输策略(Probabilistic Transmission Strategy, PTS); 4) 平均速率传输策略(Average Rate Transmission Strategy, ARTS); 5) 基于秘书问题的最优传输策略(Optimal Transmission Strategy based on Secretary Problem, OTSSP); 6) 能量有效的机会传输调度(Energy-Efficient Opportunistic Transmission Scheduler, E²OTS), 包括 E²OTS-I 和 E²OTS-II。仿真实验参数值如表 1 所列。

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
α	数据包的大小(bits)	512×8

5.1 平均能耗

平均能耗是总能耗(总传输能耗和总侦测能耗的累加和)与总传输数据量的比值,表征发送单位数据(bit)所消耗的能量(J)。该值越小,则能量利用率越高,节能效果越好。Rayleigh 和 Rician 分布下各策略的平均能耗如图 1 所示。

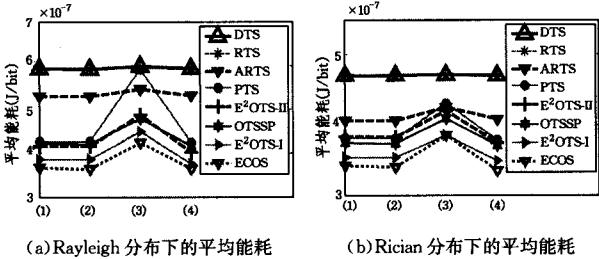


图 1 4 种参数变化时的平均能耗

图 1 中,(1)表示 $\lambda=6\sim 50, E_D=10^{-8}\text{ J}, \tau=1\text{ s}, D_m=10\text{ s}$; (2)表示 $\lambda=20, E_D=1\sim 99\times 10^{-8}\text{ J}, \tau=1\text{ s}, D_m=10\text{ s}$; (3)表示 $\lambda=20, E_D=10^{-8}\text{ J}, \tau=1\sim 3\text{ s}, D_m=10\text{ s}$; (4)表示 $\lambda=20, E_D=10^{-8}\text{ J}, \tau=1\text{ s}, D_m=4\sim 20\text{ s}$ 。图 2 和图 3 的参数说明与图 1 相同。由图 1 可得,本文的 ECOS 具有最小平均能耗,即 ECOS 的节能效果最优。ECOS 通过最优停止理论,获取各侦测时刻的最优传输速率阈值,促进发送终端选取最优能效时间来发送数据,提高能量效率。因为 DTS 和 RTS 选择传输时刻时不考虑节能,所以其平均能耗最高。PTS, ARTS 和 OTSSP 选择传输速率大的传输时刻,获得较小的平均能耗,然而,其将待传输数据量与传输速率脱离,不能选取最优的能效时间,其平均能耗远大于本文的 ECOS,也大于 $E^2\text{OTS}$ 。 $E^2\text{OTS}$ 用更小的功率发送数据,节省了能耗,但该策略没有将传输功率与待传输数据量结合考虑,因此平均能耗值高于 ECOS。其中, $E^2\text{OTS-II}$ 的平均能耗值高于 $E^2\text{OTS-I}$,这是由于 $E^2\text{OTS-II}$ 的优化目标是最小化单位时间能耗。

5.2 平均传递率

平均传递率是接收终端接收的总数据量(bits)与到达发送终端的总数据量(bits)的比值。该值越大,则被传输的数据量越多,因超出延时被丢弃的数据量越少。Rayleigh 和 Rician 分布下各策略的平均传递率如图 2 所示。

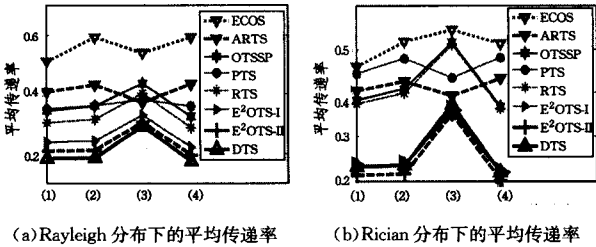


图 2 4 种参数变化时的平均传递率

从图 2 中可知,ECOS 的平均传递率最大,即 ECOS 发送

的数据量最多,丢弃的数据量较少。ECOS 获得每个侦测时间的最优累积待传输数据量阈值,该阈值提高了平均传递率。DTS 在最大传输延时传输数据,此时的传输速率与信道质量分布相关,大量累积数据因传输速率有限而不能被传输,最后因超出延时被丢弃,平均传递率最小。ARTS 以过去的传输速率平均值为参考来决定发送时间,所以发送时间与信道分布相关,其发送时间较早,累积数据量较少,数据被发送的概率较大,平均传递率较高。PTS 和 RTS 的平均传递率高于 DTS,其值依赖传输速率分布,与信道分布相关。OTSSP 侦测信道的时间至少大于 37% 的 $D_m^{[5]}$,累积数据量较多,一部分数据因超出延时被丢弃。 $E^2\text{OTS-I}$ 和 $E^2\text{OTS-II}$ 不考虑传递数据量,其传递率低。

5.3 平均调度周期

平均调度周期是总侦测时长与传输数据总次数的比值。该值越大,则发送终端侦测的平均时间越长。Rayleigh 和 Rician 分布下各策略的平均调度周期如图 3 所示。

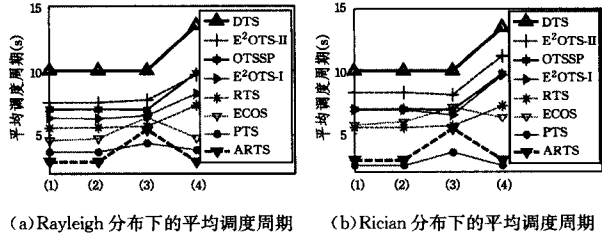


图 3 4 种参数变化时的平均调度周期

从图 3 中可得,ECOS 与 RTS 的平均调度周期接近,但大于 PTS 和 ARTS 的平均调度周期,小于 DTS, OTSSP, $E^2\text{OTS-I}$ 和 $E^2\text{OTS-II}$ 的平均调度周期。DTS 的平均调度周期最长,等于 D_m 。RTS 的平均调度周期依赖 D_m 内所有停止时间的期望值。PTS 和 ARTS 的停止时间的分布与信道质量分布直接相关。OTSSP 的平均调度周期大于 37% 的 D_m 。 $E^2\text{OTS}$ 的平均调度周期依赖各侦测时刻的最优功率阈值,其平均调度周期较长。发送终端的平均调度周期越长,平均累积的数据量越多,数据因超出延时被丢弃的概率越大。ECOS 以传输数据量为前提,严格选择最优传输速率的时刻来发送数据,降低了平均能耗,提高了平均传递率。

综上所述,本文提出的基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略实现了减小平均能耗的优化目标,在提高能量利用效率的基础上提高了传递率,降低了数据丢失率,在保证网络性能的同时优化了网络能效。

结束语 由于无线信道质量是随机变化的,当传输功率固定时,信道质量越好,传输速率越高,在相同时间内传输的数据越多。因此,在信道质量良好时传输数据能提高能量利用效率和增大传输数据量。然而,待传输数据的数量依赖于数据到达速率和累积时长。所以,发送终端以待传输数据量为前提,不断侦测信道的传输速率,选择最优时刻传输数据,实现在保证传输延时的前提下的平均能耗最小化目标。最优停止理论为最优停止侦测和传输数据时刻的获得提供了方法。本文首先构建数据传输平均能耗最小化问题,并将其转化为停止规则问题;然后证明该问题存在最优停止规则和近视停止规则;最后证明近视规则是最优的停止规则,为最优停

止问题提供可行解,获得各侦测时刻的最优传输速率阈值,实现基于数据到达速率的能耗优化策略。仿真实验表明,该策略最小化传输单位数据平均能耗,增大了传递率,达到了优化能耗的目标。

更进一步,提高较大延时下的数据传输能效和传递率是今后的研究方向。

参考文献

- [1] LIN Chuang, TIAN Yuan, YAO Min. 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] GARCIA-SAAVEDRA A, SERRANO P, BANCHS A. Energy-efficient optimization for distributed opportunistic scheduling [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 1083-1086.
- [4] 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.
- [5] PENG Ying, WANG Gao-cai, HUANG Shu-qiang, et al. An energy consumption optimization strategy 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.
- [6] AMIN O, LAMPE L. Opportunistic energy efficient cooperative communication [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(5): 412-415.
- [7] ZHENG Dong, GE Wei-Yan, ZHANG Jun-Shan. 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.
- [8] MAO Wen-guang, WU Shan-shan, WANG Xu-dong. QoS-oriented distributed opportunistic scheduling for wireless networks with hybrid links [C] // Proceedings of the 2013 Globecom. Atlanta, USA, 2013: 4524-4529.
- [9] Haykin S, 等. 通信系统 [M]. 宋铁成, 徐平平, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] FERGUSON T S. Optimal Stopping and Applications [DB/OL]. 2006 [2015]. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>.
- (上接第 108 页)
- [11] LI Bao-gang, LIU Yuan-an, LIU Kai-ming, et al. On-demand cooperative spectrum sensing and channel allocation in cognitive wireless networks [J]. Journal on Communications, 2011, 32(11): 104-110. (in Chinese)
李保罡, 刘元安, 刘凯明, 等. 认知无线网络按需协同感知和信道分配[J]. 通信学报, 2011, 32(11): 104-110.
- [12] Xiaojun L, Rasool S. A Distributed Joint Channel-Assignment, Scheduling and Routing Algorithm for Multi-Channel Ad-hoc Wireless Networks [C] // INFOCOM 2007 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA, 2007: 1118-1126.
- [13] WANG Hai-tao, ZHANG Xue-ping. Clustering Algorithms of Mobile Ad hoc Network [J]. Data Communications, 2003(4): 32-35. (in Chinese)
王海涛, 张学平. Ad hoc 网络中的分簇算法[J]. 数据通信, 2003(4): 32-35.
- [14] LIU Wei, ZHAO Yu, CHEN Rui. The Zero-one Integer Programming Based Optimization Model and Channel Assignment Algorithm in Ad Hoc Network [J]. Computer Engineering, 2016, 42(5): 93-101. (in Chinese)
刘蔚, 赵宇, 陈锐. 基于 0-1 规划的网络优化模型及其在信道分配中的应用[J]. 计算机工程, 2016, 42(5): 93-101.
- [15] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C] // Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cologne, Germany: ACM, 2005: 73-87.
- [16] NEELY M J, MODIANO E, ROHRS C E. Dynamic power allocation and routing for time-varying wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 89-103.
- [17] TASSIULAS L, EPHEMIDES A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(12): 1936-1948.
- [18] XU Jing, LIU Wei, YANG Zong-kai, et al. Resource Optimization for Uncertain Traffic in Multi-radio Wireless Networks [J]. Computer Science, 2012, 39(3): 33-38. (in Chinese)
徐晶, 刘威, 杨宗凯, 等. 针对不确定流量的多收发机无线网络资源优化研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(3): 33-38.
- [19] WU X, SRIKANT R, PERKINS J R. Scheduling Efficiency of Distributed Greedy Scheduling Algorithms in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(6): 595-605.
- [20] NAVEED A, KANHERE S S. Cluster-based channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C] // IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, 2009 (LCN). 2009: 53-60.