

无线传输中基于马尔可夫决策的高能效策略

林晓辉, 谭 宇, 张俊玲, 杨 超, 刘 静

(深圳大学信息工程学院, 现代通信与信号处理实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要: 在无线网络中, 终端的能量通常都是有限的。为了延长终端的寿命, 需要更加高效地使用其有限的能量资源。在假设恒定传输功率的情景下, 通过将终端的传输问题建模成为马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP), 提出了一种高能效传输策略。仿真结果表明, 与以往的门限传输策略相比较, 在满足通信性能要求的前提下, 所提出的传输策略可有效地减少能量耗费, 延长终端的寿命。

关键词: 无线网络; 高能效传输策略; 马尔可夫决策过程; 恒定功率

中图分类号: TN 929.52

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.07.33

MDP-based energy efficient policy for wireless transmission

LIN Xiao-hui, TAN Yu, ZHANG Jun-ling, YANG Chao, LIU Jing

(Shenzhen Key Lab of Advanced Communication and Information processing, Faculty of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In wireless networks, terminals are usually energy-constrained. To extend the lifetime of the wireless terminals, the limited energy must be utilized in an efficient manner. Under the assumption of constant power transmission, by modeling the transmission problem as a Markov decision process, an energy-efficient transmission policy (EETP) is proposed for the terminals. Simulation results shows that compared with threshold transmission policy (TTP), the proposed policy can reduce the energy consumption and significantly extend the terminal's lifetime significantly.

Keywords: wireless Network; energy efficient transmission policy; Markov decision process; constant transmission power

0 引 言

随着各种无线多媒体业务的普及, 终端所要处理的数据量也随之大幅增加, 因此带来的通信及计算能耗也会急剧上升, 而电池工艺近些年来并未取得突破性的发展, 这对未来移动通信系统的终端能耗管理提出了更高的要求。因此, 高能效的无线通信系统的设计成为当前的一个研究热点。当前无线通信系统的高能效设计思想通常是通过耗费最少的能量来满足实际应用的服务质量(quality of service, QoS)要求。

文献[1]研究了系统在有延迟限制的情况下, 如何通过适当地控制发射功率以获得不同的传输速率, 使得系统在满足延迟要求的情况下能量耗费最少。文献[2]研究了发射端数据传输的功耗问题, 发现每比特信息的传输能耗与调制等级成正比, 并且通过研究能耗与延迟之间的关系, 提

出了调制缩放的概念, 并给出了一种基于调制缩放的能量感知数据包调度算法。文献[3]根据先前的研究成果, 提出了一种动态调制缩放(dynamic modulation scaling, DMS)技术, 其不仅考虑了数据包的达到规律, 并且考虑了数据包大小的不同, 通过设定缩放因子, 同时根据队列中数据包的情况动态调整调制等级, 使得系统在满足延迟要求的同时达到能耗最低。文献[4-5]研究了如何根据缓存队列的状态来控制发射功率, 其将系统的优化建模成了一个拉格朗日求解, 并且得到了最优的功率控制策略。在文献[6]中, 研究者通过对无线网络业务特性以及数据流量特性的分析, 将部分通信模块置于睡眠或者关闭状态, 有效地减少了空闲时间的能量浪费。文献[7]通过研究人类语音流的特性, 提出了一种混合式的休眠模式, 仿真结果表明提出的混合型休眠模式可以有效的减少能量的耗费, 延长终端的工作寿命。在文献[8]中, 作者提出了一种分布式的马尔科夫决策算法,

收稿日期:2013-03-06; 修回日期:2014-04-21; 网络优先出版日期:2014-04-17。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20140417.1557.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61171071, 60602066); 深圳市科技计划项目资助(JC201005250035A, JC201005280404A, JC201005250047A, JCYJ20120613115037732, JC201005250085A, GJHS20120621143440025)资助课题

通过利用数据的时空统计特性来优化无线系统的吞吐量和数据时延。以往的研究多数均假设终端的发射功率是可调整的,通过自适应技术和动态功率调整来实现终端的节能省电。但由于在快速时变环境下,功率控制的算法复杂度非常高,需要大量的信息交互,且算法往往不易收敛。因此,在本文中,我们假设在快速衰落信道环境下,终端传输功率是恒定的,通过链路自适应技术来传输数据,同时考虑如何通过马尔可夫决策来实现终端的高能效传输。本文的主要创新点如下。

(1) 使用信道和缓存器(Buffer)状态的联合来表征系统状态,给出了系统状态转移概率和稳态分布的计算方法及系统性能的分析方法。

(2) 考虑到能耗和服务质量的平衡,并设计了花费函数,通过在函数中设置可调因子以调节服务质量。同时将传输问题建模成为马尔可夫决策过程中的无限阶段折扣模型来进行最优传输策略的求解。

(3) 将算法扩充到多用户环境,通过对无线资源的划分,给出了不同用户高能效传输策略的最优参数选择。

1 系统模型

1.1 无线网络结构

本文主要研究的是上行链路的高能效传输问题。典型的网络结构如图 1 所示,终端通过无线信道向基站传输数据,各终端均有一个缓存器以存储上层应用产生的数据包,缓存的大小有限,工作于先进先出模式。

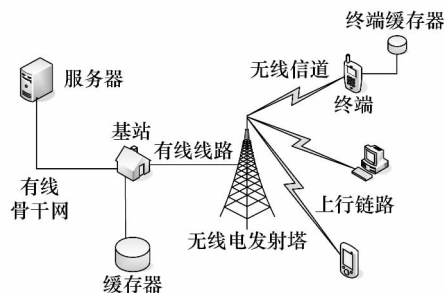


图 1 无线网络结构图

1.2 无终端传输系统模型

在物理层,数据的单位是帧(Frame),每帧中包含固定数目的码元(N_s),如果已知码元速率固定为 R_s ,则帧长 $Tf = N_s/R_s$, Tf 也是本文的时间单位。在数据链路层,每个数据包(Packet)包含的比特数目固定为 N_b ,其中包括了包头信息,负载信息以及冗余的校验比特信息。经过不同模式的调制编码后,数据包中的信息被映射到物理层中不同数目的码元中。假设在传输模式 n 下,每个码元所能携带信息的比特数为 R_n ,则每个数据包经过调制编码后所需要的码元数目为 N_b/R_n ,而每帧的码元数目是固定的,在不同的调制编码方式下,物理层中每帧最大可以传输的数据包的数目是不同的。若假设导频信息和控制部分需要 N_c 个码元,则每帧可以传输的数据包的数目为 $(N_s - N_c) * R_n/N_b$ 。在

本文中,假设发射端的发射功率是恒定的,在不同的传输模式下,发送一个数据包所需要的时间是不同的,所以能耗也是不同的。应该尽可能在信道状态好的时候进行数据的传输以减少能耗。

传输系统的模型如图 2 所示。上层应用产生的数据包首先存储在终端的缓存器队列中。接收端在接收到数据后对信道的状态进行测量,然后通过反馈信道将信道状态信息(channel state information, CSI)反馈给发射端,发射端根据得到信息选择合适的调制编码方式(传输模式)应用于当前数据的传输。

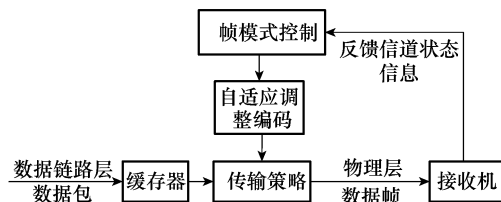


图 2 传输系统模型

1.3 自适应系统和马尔可夫信道

1.3.1 自适应调制编码

本文所采用的自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC)设计^[9],其参数如表 1 所示。前面假设帧的长度 Tf 和码元速率 R_s 均为固定值,每个数据包中所含有的比特数 N_b 也为固定值,根据上表中给出的不同传输模式下码元所携带的信息比特数,可以推导出在不同传输模式下每帧所能传输的数据包的数目之比为 1:2:4:8,而发射功率为恒定值,所以在不同的传输模式下,传输一个数据包所要耗费的能量之比为 8:4:2:1。因此数据包的传送应该尽可能地使用较高阶的传输模式下,也即尽量在信道状态好的条件下传输数据。

表 1 自适应调制编码传输模式

参量	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
调制方式	QPSK	8PSK	32QAM	512QAM
编码率	1/2	2/3	4/5	8/9
比特/码元	1	2	4	8
门限/dB	5.016	10.035	13.826	17.381

2.3.2 马尔可夫信道模型

在无线移动通信中,由于存在着多径效应以及多普勒频移,信号的幅值及相位会发生动态的变化。通常使用接收信号信噪比来对信道的状态进行描述。本文假设无线信道为非频率选择性衰落信道。为便于描述无线信道的时变特性,可将信道建模成一个有限状态的马尔可夫信道^[10-12]。在表 1 中给出了不同传输模式的门限值,根据这些门限值,可以将信道划分成为不同的状态,由此可以将无线信道建模成为一个有限状态马尔可夫信道。

根据接收信号的信噪比,可以将信道分成不同的状态。用 $S = \{S_0, S_1, \dots, S_{N-1}\}$ 来代表有限状态的集合, $0 = A_0 < A_1 < \dots < A_N = \infty$ 表示接收信号信噪比的门限值,若接收信号

的信噪比位于 (A_k, A_{k+1}) 之间, 则称无线信道处于状态 S_k ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$)。本文假设无线信道为慢衰落, 信道状态在 Tf 时长内保持不变, 并且状态的转移仅发生在相邻的两个状态之间。使用 $P_{i,j}$ 来表示状态转移概率, 则有: 根据文献[10-13]中给出的方法, 可以得到信道的状态转移概率矩阵 P_c 。

3 有限长队列分析

在本文中, 采用文献[7]的方法对系统进行分析。在无线终端有一个 Buffer 缓存器, 其工作于先进先出模式, 可以将 Buffer 缓存看成是一个队列, Buffer 缓存的大小为 k , 当 Buffer 缓存数据已满时, 到达的数据包将会被丢弃。对 Buffer 缓存进行队列分析, 队列分析模型如下图 3 所示。

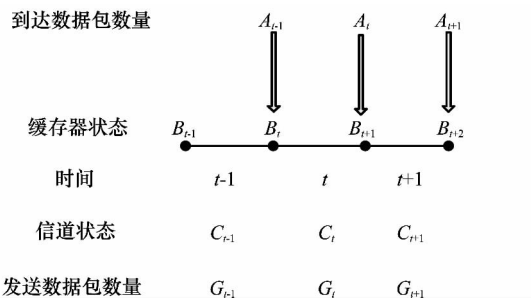


图3 队列分析模型

上图中时间单位为 Tf , 在本文中假设每单位时间到达 Buffer 缓存的数据包数目为

$$A_t = a \text{ for all } t \quad (1)$$

假设 a 服从泊松到达分布。Buffer 缓存容量为 k , 图 3 中 B_t 使用来代表 t 时刻储存在 Buffer 缓存中的数据包的数目, B_t 也称为 Buffer 缓存状态, 所以可以如下表示

$$B_t \in B, B = \{0, 1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

式中, B 代表可能的 Buffer 缓存状态的集合。

在前面小节中通过对通信系统和信道状态的描述可以知道在不同的信道状态下, 一帧所能发送的数据包的数目是不同的, 我们使用 C_t 来代表不同时刻信道最大传送数据包能力为

$$C_t \in C, C = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_N\} \quad (3)$$

在表 1 中, 共有 4 种传输模式, 即将信道划分成 5 个状态, 所以式(3)中信道状态集合 $C = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$ 。

下面分析在不同单位时间系统发送数据包的能力, 本文使用 Buffer 缓存状态与信道状态的联合作为系统状态, 即在不同单位时间系统状态可以表示为 (C_t, B_t) 。系统在 t 时刻可以发送数据包数目与系统状态紧密相关。上图中使用 G_t 代表不同时刻系统发送数据包数目, 可以表示为

$$G_t \in G, G = \{0, 1, \dots, \min(C_t, B_t)\} \quad (4)$$

式中, G 代表可选择的发包数目的集合。

在任意时刻 t , 根据 Buffer 缓存状态 B_t , 信道状态 C_t , 系统所发送的数据包数目 G_t 以及包到达情况, 可以如下计

算下一时刻 Buffer 缓存状态 B_{t+1} :

$$B_{t+1} = B_t - G_t + A_t \quad (5)$$

由式(5)可以如下计算队列状态的转移概率为

$$P_b(B_{t+1} | (C_t, B_t), G_t) = \begin{cases} 1, & G_t \in G \& B_{t+1} = B_t + A_t - G_t \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

G_t 的选择是由传输策略决定的, 并且传输策略是平稳的, 即在不同的时刻传输策略集相同。本文使用 g 来代表传输策略, g 的维数同系统状态数目相同, 其指明了在不同的系统状态下发送数据包数目, 也即 g 是一个从状态空间到发包数目的映射函数, 在每个时刻得到系统状态 (C_t, B_t) 后, 可以根据 g 确定当前时刻的发包数目。所以在传输策略 g 已知的情况下, 通过观察系统状态得到 G_t 后, 可以使用式(6)计算出队列的状态转移概率, 得到队列的演化过程。

通过队列分析, 可以得到在传输策略 g 下队列的状态转移概率 P_b , 但为了更好地了解整个系统的性能, 还需要得到系统状态的转移概率以及系统状态的稳态分布, 由于信道状态的变化过程与队列状态的变化过程是相互独立的, 所以在传输策略 g 下系统的状态转移概率可以通过计算得

$$P((C_{t+1}, B_{t+1}) | (C_t, B_t)) = P_c(C_{t+1} | C_t) P_b(B_{t+1} | B_t, g(C_t, B_t)) \quad (7)$$

式中, P_c 为信道状态转移概率; P_b 为 Buffer 缓存状态转移概率由式(6)给出; g 为所选用的传输策略。

由于 C_{t+1} 仅与 C_t 有关, 而在已知传输策略 g 后, B_{t+1} 也仅与 B_t 和 C_t 有关, 也就是说, 系统下一时刻的状态 (C_{t+1}, B_{t+1}) 仅与当前时刻的状态 (C_t, B_t) 有关, 所以在传输策略已知的情况下, 系统状态的演变过程也可以看作成为一个扩展的马尔可夫链, 可以证明扩展的马尔可夫链 (C_t, B_t) 存在稳态分布并且是唯一的^[10], 记传输策略 g 下系统各个状态的稳态分布为

$$\pi_g(c, b) \quad (c, b) \in C \times B \quad (8)$$

记系统的状态转移概率矩阵为 p , 则稳态分布可以计算得

$$\pi = \pi p, \sum_{c \in C, b \in B} \pi_g(c, b) = 1 \quad (9)$$

通过系统状态的稳态分布, 可以求出在传输策略 g 下的系统的丢包率, 能耗等性能指标, 丢包率 P_d 可计算得

$$E[D] = \sum_{c \in C, b \in B} \max[0, a - K + (b - g(c, b))] \times \pi_g(c, b) \quad (10)$$

$$p_d = \frac{E[D]}{a} \quad (11)$$

式中, $E[D]$ 是代表不同状态下丢包数目的均值, 丢包率由式(11)计算得来; a 为单位时间到达的数据包数目。

通过丢包率可以求得包传输率 η 为

$$\eta = 1 - p_d \quad (12)$$

在传输策略 g 下每帧传输数据包所耗费能量的均值可得

$$\bar{E} = \sum_{(c,b) \in C \times B} \pi_g(c,b) \times E_c \times g(c,b) \quad (13)$$

式中, E_c 代表在信道状态 c 下传输一个数据包所要耗费的能量; $g(c,b)$ 是在系统状态 (c,b) 下传输数据包的数目。

系统在传输策略 g 下的性能指标就可以根据上面所分析的进行计算, 要想寻找在满足系统 QoS 要求下能耗最少的传输策略, 需计算所有传输策略下系统的性能指标, 然后从中寻找最优的策略。但不同的传输策略数目将会非常大, 其计算量也是极为可观的。为了解决这个问题, 本文将问题建模成一个马尔可夫决策过程问题来寻找最优的传输策略。

4 终端传输问题的 MDP 建模

根据前面的分析, 可以使用信道状态与缓存器状态的联合 (C_t, B_t) 作为系统状态, 每个时刻在得到系统状态后, 可以从策略空间 $G_t \in G = \{0, 1, \dots, \min(C_t, B_t)\}$ 中选择当前时刻的策略, 系统下一时刻所处的状态仅与当前时刻的状态和所采取的策略有关, 所以可以将终端的传输问题建模为马尔可夫决策过程。

决策时刻 T 即为单位时间的开始, 也即每隔时长 T_f 做一次决策, 状态空间 S 为所有系统状态 (c,b) 的集合, 策略空间 $A(i)$ 即在不同的状态下, 系统可以选择的发送数据包的数目 $G \in G = \{0, 1, 2, \dots, \min(c,b)\}$, 状态转移概率可以由式(7)给出。同时, 还需要设计一个合理的花费函数 $r(i,a)$ 以描述所研究的系统, 花费函数是系统在得到当前时刻状态后, 依据策略选择相应策略后所带来花费。传输策略的选择需考虑能耗及服务质量。本文设计的花费函数如下所示:

$$R((c,b), g(c,b)) = E_g(c,b) + \beta \frac{5^2}{K^2} (b - g(c,b))^2 \quad (14)$$

式(14)是无量纲的, 花费函数主要包含了 2 部分, 第 1 部分是在所采用的策略 g 下, 系统状态为 (c,b) 时发送数据包所耗费的能量; 第 2 部分是一个惩罚性的花费, 由于 Buffer 缓存的大小是有限的, 本文假设若 Buffer 缓存满时, 到达的数据包将被丢弃, 在 Buffer 中缓存数据包意味着延迟以及丢包的可能性, 缓存的数据包的数目越大对系统性能的影响越大, 所以使用式(14)第 2 部分的惩罚性花费来代替系统对性能的要求。花费函数中的 $\beta \in [0, 1]$ 是一个权重参数, 它代表了系统对性能的要求和能耗之间的一个权衡。

MDP 的目标是找到一个最优的传输策略 g^* , 使得系统所有阶段的花费之和达到最小, 可以表示成如下形式:

$$g^* = \arg \min_{g \in \Pi} V^g =$$

$$\arg \min_{g \in \Pi} E_{(c,b)}^g \left[\sum_{t=0}^{\infty} \lambda^t R((c_t, b_t), g(c_t, b_t)) \right] \quad (15)$$

式中, λ 为折扣因子, 代表了不同时刻花费的相对重要性; Π 代表所有可能策略的集合, 由于系统的演变过程是随机的, 所以需要对各个时刻可能出现的花费求均值。由式(15)计算得来的传输策略 g^* 便为某个 β 值下的最优传输策略, 也即系统在 g^* 的控制下, 可以耗费最少的能量来满足某种由 β 所指示的性能指标, 详细的性能指标可以在得到 g^* 后通过式(10)~式(13)进行计算分析。因此, 无线终端的传输问题建模成为了马尔可夫决策过程中的无限阶段折扣模型, 通过使用 MATLAB 中的马尔可夫决策过程工具箱提供的策略迭代算法^[14]可以获得不同性能指标要求 β 下的最优策略。

5 仿真分析

本文使用 MATLAB 和 Visual studio C++ 仿真工具进行分析。通过 MATLAB 的马尔可夫决策过程工具箱中提供的策略迭代算法可以得到不同性能指标下的最优传输策略, 然后使用 C 语言仿真对最优传输策略的性能指标进行分析。

仿真参数如下表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	数值
符号速率/(k/s)	200
数据包大小/bit	4 000
帧长度/ms	20
多普勒频移/Hz	2
Buffer 缓存大小/packet	5
包到达过程参数	1
平均接收信噪比/dB	β
终端电池初始能量	100 Joule

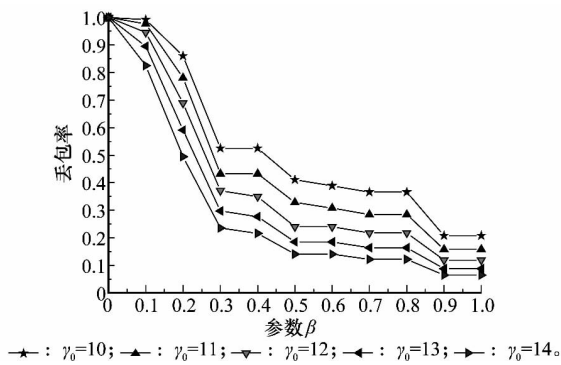
对于反应服务质量要求的参数 β , 从 0 以步长 0.1 增加到 1, 也即共有 11 个不同的花费函数, 通过策略迭代算法, 可以计算出在不同花费函数下的最优策略, 此策略在满足了由参数 β 所指示的服务质量的条件下, 达到了能量耗费最小。得到不同 β 下的最优传输策略后, 可以根据策略计算出系统状态转移概率, 进而计算出系统状态的稳态分布, 从而可以按照式(10)~式(13)进行各个最优策略的性能分析, 在得到各个最优策略的性能后, 可以从中选择适合实际应用的高能效传输策略。

5.1 丢包率

观察图 4 可以发现:

(1) 丢包率随着 β 的增大而减少, 说明 β 可以有效的控制系统的性能, 较大的 β 值意味着系统对服务质量要求较高, 从而拥有较小的丢包率。

(2) 随着平均信噪比的增大, 系统的性能有较大的提升, 这是因为平均信噪比增大, 意味着无线信道的环境变好, 系统拥有较高的服务质量。

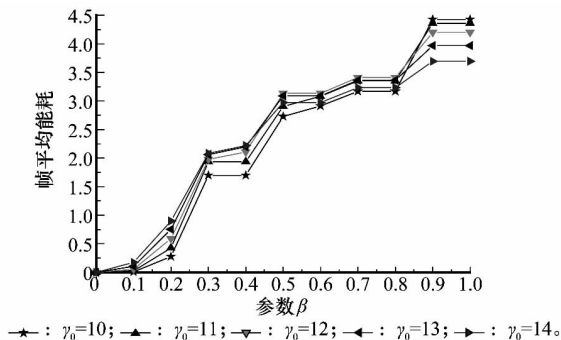
图4 丢包率与 β (平均信噪比 $\gamma_0 \in [10, 14]$)

5.2 每帧平均能耗

从图5,可观察到:

(1) 随着 β 的增大,每帧发送数据所耗费能量的均值增大,因为较大的 β 意味着系统对服务质量要求较高,需要更加频繁的发送数据包,即使在信道状态较差时也要进行数据包的发送;

(2) 在图5可以发现在 $\beta=0$ 到 $\beta=0.4$ 之间,随着平均信噪比的增大,能耗也增大,这是因为在 β 不是很大的时候,系统倾向于在信道状态较好时进行数据包的发送,而平均信噪比的增大使得信道处于较好状态的概率增大,从而发送数据包的概率增大而造成能耗的增加。而这种趋势从 $\beta=0.5$ 开始变化,最终变为随着平均信噪比 γ_0 的增大,每帧发送数据所耗费能量的均值减少,因为随着 β 的增大,在信道状态较差的时候也要进行数据包的发送,而平均信噪比 γ_0 的增大会使信道更多的处于较好的状态,从而可以更多的使用较高的传输模式进行传输以减少能耗。

图5 每帧平均能耗与 β (平均信噪比 $\gamma_0 \in [10, 14]$)

5.3 与门限传输策略的比较

在以往的研究中,文献[15]设计了一种适用于无线传感器网络的传输策略的选择方法,其在物理层也使用了信道自适应技术。控制系统仅在信噪比大于某个传输模式的门限值时才进行数据的传输,并且以最大能力进行传输,本文称之为门限传输策略(threshold transmission policy, TTP)。若按照本文采用的AMC设计有4种传输模式,则共有4种不同的传输策略,每种策略均按照系统最大传输能力进行传输,最终应用将从这4种策略中选择合适的传输策略。

而本文给出的高能效传输(energy efficient transmis-

sion policy, EETP)的生成方法可以从更多不同的策略中进行选择,从而扩大了适用范围,可进一步节省了能量的开销。通过对花费函数中 β 值的改变可以得到多个满足某种性能要求的最优传输策略,然后从中选择出最适合当前应用的策略作为系统的高能效传输策略。可以将4种门限传输策略与不同 β 下的EETP方法进行性能比较,仿真参数平均信噪比 $\gamma_0 = 15$ dB, Buffer缓存大小为5,结果如图6所示。

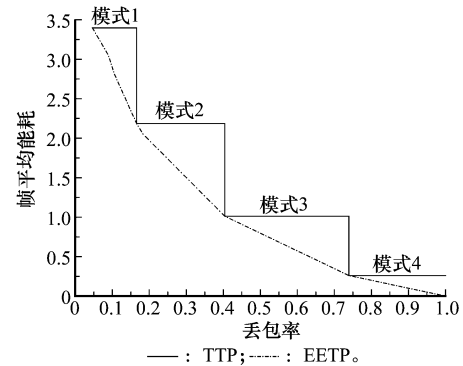


图6 与门限传输策略的比较

从图6中可以看出,由于本文提供了更多不同的传输策略,所以使用本文的高能效传输策略可以在满足系统性能要求的前提下,可以进一步的节省能量的耗费。本文的方法更符合使用尽可能少的能量满足系统的服务质量要求这一广泛使用的设计理念。假设使用1焦耳的单位能量,则使用这两种不同方法得到的传输策略时终端的寿命如图7所示。

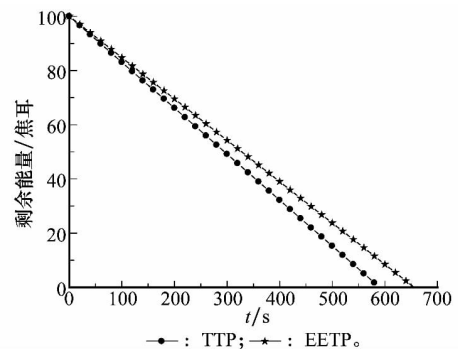


图7 TTP与EETP下传输策略终端寿命比较

可以看出,使用本文的方法所确定的传输策略与TTP相比较,在满足系统服务质量要求的前提下,本文的策略可延长终端寿命10%。

5.5 多用户场景下设计实例

当网络中存在多用户时,各个用户之间就会存在着干扰,从而就要考虑如何正确的区分不同的用户,给不同的用户分配有限的资源,从而防止碰撞的发生以减少不必要的能量耗费。采用时分复用(time division multiple access, TDMA)机制以满足以上要求,原因如下:

- (1) TDMA没有竞争机制的碰撞重传问题,而重传会造成能量极大的浪费;
- (2) 数据传输时不需要过多的控制信息;
- (3) 终端在空闲时槽能够进入睡眠状态已减少能量的耗费;

(4) 给每个用户分配固定的时隙使得数据传输有保证,适用于对实时性较高的业务,如语音、视频等。

所以本文介质访问层协议使用 TDMA,不同的用户在其分配的时隙上进行数据的收发。假设存在 4 个用户与基站进行通信,它们与基站的距离不相同,所以信号有着不同的衰减,假设 4 个用户的接收信号平均信噪比为 $\gamma_0^1=10$ dB, $\gamma_0^2=13$ dB, $\gamma_0^3=16$ dB, $\gamma_0^4=19$ dB。每帧中的时隙公平的分给 4 个用户,每个用户在自己所分配的时隙上进行数据的传输。首先求出每个用户不同 β 下的最优传输策略,然后对各个最优策略进行性能分析。4 个用户在不同 β 下最优传输策略的性能和能耗如图 8 和图 9 所示。

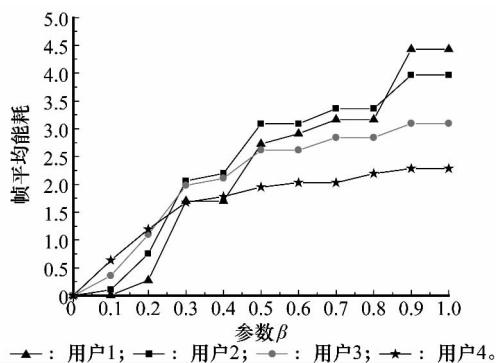


图 8 各个用户每帧能耗均值与 β

可以根据用户对丢包率及能耗的要求从选择出合适的 β ,此 β 值下的最优传输策略便为用户的高能效传输策略,可以在满足系统性能要求的前提下,耗费最少的能量。

6 总 结

本文主要研究了在时变信道,恒定发射功率的情况下,终端的高能效传输问题。使用信道状态和 Buffer 缓存状态的联合作为系统状态,给出了系统状态转移概率和稳态分布的计算方法以及系统性能的分析方法。

从能耗和服务质量两方面入手设计了一个合理的花费函数,将传输问题建模成为了马尔可夫决策过程,给出了高能效传输策略的确定方法。与以往的门限传输策略相比较,使用本文方法得到的高能效传输策略可以更进一步的节省能耗,延长终端的寿命。在多用户环境下,通过对无线资源的划分,本文所提出的方法依旧可行。

参考文献:

- [1] Uysal B E, Prabhakar B, Gamal A E. Energy-efficient packet transmission over a wireless link[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002, 10(4): 487-499.
- [2] Shurgers C, Aberthorne O, Srivastava M B. Modulation scaling for energy aware communication systems[C]// *Proc. of the International symposium on Low Power Electronics and Design*, 2001:96-99.
- [3] Shurgers C, Raghunathan V, Srivastava M B. Power management for energy-aware communication systems[J]. *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, 2003, 3(3): 431-447.
- [4] Bris A. Dynamic power control in a wireless static channel subject to a quality-of-service constraint[J]. *Operation Research*, 2005, 53(5): 842-851.
- [5] Bris A, Zachariadis K E. Dynamic power control in a fading downlink channel subject to an energy constraint[J]. *Queueing System*, 2007, 55(1): 41-69.
- [6] Lin Chuang, Tian Yuan, Yao Ming. Green networking and green evaluation: energy saving mechanism, model and evaluation[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 3(4): 593-612. (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, 3(4): 593-612.)
- [7] Lin X H, Liu L, Wang H, et al. On exploiting the on-off characteristics of human speech to conserve energy for the downlink VoIP in WiMAX systems[C]// *Proc. of the Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2011:337-342.
- [8] Parinen J, Hottinen A, Peltonen J. Optimizing spatial and temporal reuse in wireless networks by decentralized partially observable Markov decision processes[J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2003, 11(9): 1203-1213.
- [9] Lau V K N. Performance of variable rate bit interleaved coding for high bandwidth efficiency[C]// *Proc. of the Vehicular Technology Conference*, 2000:2054-2058.
- [10] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: cross-layer analysis and design[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(3):1142-1153.
- [11] Jad R, Liu K J, Marcus S. Jointly optimized bit-rate/delay control policy for wireless packet networks with fading channels[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, 50(3): 484-494.
- [12] Hog X, Shoraby K. A dynamic programming approach for optimal scheduling policy in wireless networks[C]// *Proc. of the Computer Communications and Networks*, 2002:530-536.
- [13] Wang H S, Moayeri N. Finite-state Markov channel-a useful model for radio communication channels[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1995, 44(1): 163-171.
- [14] Liu Ke. *Practical Markov Decision Process*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1-62. (刘克. 实用马尔可夫决策过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-62.)
- [15] Lin X H, Kwok Y K, Wang H. Cross-layer design for energy efficient communication in wireless sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2009, 9 (2): 251-268.

作者简介:

林晓辉(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为无线网络管理、通信技术。

E-mail: xhlin@szu.edu.cn

谭宇(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线网络资源管理。

E-mail: 413646826@qq.com

张俊玲(1988-),女,硕士,主要研究方向为无线网络资源管理。

E-mail: zhangjunling315@163.com

杨超(1987-),男,硕士,主要研究方向为移动计算与分布式系统。

E-mail: 524500729@qq.com

刘静(1981-),女,通信作者,讲师,博士,主要研究方向为网络通信技术。

E-mail: liujing@szu.edu.cn