无线信道中基于时延约束下的一种调度策略

彭烈新[1][2]　　朱光喜[1][2]　　蔡德钧[1]
[1](华中科技大学电信系　武汉　430074)
[2](武汉国家光电实验室　武汉　430074)

摘　要：该文研究无线信道中基于时延约束下功率最小化的调度策略。文章首先将该优化问题转化为非约束 Markov 动态决策过程，随后用动态规划的方法获得了最优解。由于动态规划是基于整个决策阶段而不是在单个阶段做出最后决策，因而复杂度较高，实时性较差。有鉴于此，该文提出了一种简便策略，该策略只根据当前信道状态和队列长度做出决策，实时性好，算法简单，而且能使队列具有平稳分布的特征，保证了系统的稳定性。仿真结果显示该策略的性能接近最优策略。

关键词：资源分配；MDP；时延；Lyapunov 稳定性

中图分类号：TN92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2008)04-0788-04

A Scheduling Strategy for Wireless Channel under Delay Constraint

Peng Lie-xin[1][2]　　Zhu Guang-xi[1][2]　　Cai De-jun[1]
[1](*Dept. of Electronics & Information Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan* 430074, *China*)
[2](*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: In this paper, the scheduling strategy of minimizing power under delay constraint is proposed in wireless channel. The problem is first formulated as an unconstrained Markov Decision Process（MDP）and solved by dynamic programming. But its final decision which is made over all processes instead of individual one make it with high convexity and bad real time property. So a simple strategy which is based on the current channel state and queue length is given for its good real time property and simple arithmetic. And by this strategy the steady-state distribution of the queue exists, which makes the queue stable. Finally, the simulation results show the performance of the simple strategy is approximate to the optimal one.

Key words: Resource allocation; MDP; Delay; Lyapunov stability

1　引言

新一代无线通信系统要求为用户提供服务质量(Quality Of Service，QoS)保证，数据时延是其中最重要的参数之一。为满足用户对时延的要求，当用户数据到达数据缓冲器时(如图 1)，立即发送缓冲区中的全部数据具有最小时延。然而，这种发送方式在时变衰落信道条件下意味着更高的功率代价[1]，在无线通信系统中是无法容忍的，因为大部分无线通信节点的电池容量极其有限，对发送功率的限制非常严格，在 Ad hoc 网络和无线传感网络中，增加功率消耗意味着网络生存寿命的缩短。可见，单纯保证用户时延，不考虑功率消耗的数据发送方式是不可取的。从节省功率的角度考虑，只在用户信道条件最好时发送数据最省功率，但这种传输方式将造成无限长的时延，用户的 Qos 无法保证。因而传输策略必须综合考虑用户消耗的功率和数据时延，取二者的折中，才能以较小的功率代价满足用户的 Qos 要求，实现数据的最优化调度。

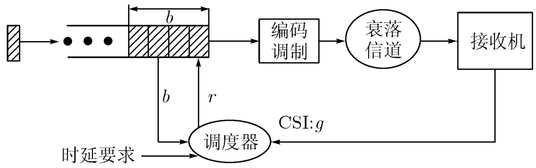

图 1 系统模型

针对无线衰落信道中功率和时延的折中问题，Berry 和 Gallager[2]结合物理层的信道信息和链路层的队列状态信息，研究了最优功率分配策略和时延的关系，实现了链路层和物理层的跨层优化。Goyal 和 Kumar 则用 Markov 动态决策过程(Markov Decision Process, MDP)证明了功率和时延最优解的存在，从而完善了该优化问题的理论基础[3]。王恒提出了一种基于信道增益门槛值的简便策略[4]，在该策略下，当信道增益高于设定的门槛值时，以某一固定速率发送数据，否则不发送。该策略简单实用，但门槛值和发送速率两个参数相互作用，不容易取得最佳值。

本文研究无线信道中基于时延约束下功率最小化的调度策略(如无特别说明，文中的功率和时延均指其平均值)。

2006-10-17 收到，2007-01-31 改回
国家自然科学基金(60496315)和国家高技术研究发展计划(2003AA12331005)资助课题

文章首先将该优化问题转化为非约束 Markov 动态决策过程，随后用动态规划的方法获得了最优解。由于动态规划是基于整个决策阶段而不是在单个阶段做出最后决策，因而实时性较差。同时该方法实质上也是一种搜索算法，具有较高的复杂度，不适合实时性要求高的无线通信系统。有鉴于此，文章提出了一种具有单参数的简便调度策略，该策略只根据当前的信道状态和队列长度做出决策，具有很好的实时性。同时该策略具有使队列平稳分布的特征，该特征保证了系统的稳定性。仿真结果显示该策略的性能接近最优策略。

2　最优化问题的提出

考虑一个离散时间的单用户系统(如图 1)，从上层来的数据流在每个时隙末到达数据缓冲区，设在 n 时刻抵达缓冲区的数据流是一随机变量 $a(n)$，在不同时刻相互独立，但服从同一分布，其分布函数用 $F(a)$ 表示，数据流到达的平均速率为 λ。信道是具有加性高斯白噪声的块衰落信道，其增益 $g(n)$ 在一个时隙里保持不变，在不同时隙间独立变化，且服从同一分布，其分布函数用 $G(n)$ 表示。假定在 n 时刻决策前，$g(n)$ 已经准确得到，则用户根据信道增益和队列长度信息，按给定的调度策略，以速率 r 从缓冲区取出数据，分配相应的功率 W，完成本次数据传输。假定用户在第 n 时刻发送给某一站点的信号为 $x(n)$，则该站点接收的信号 $y(n)$ 为 $y(n)=\sqrt{g(n)}x(n)+z(n)$。其中 $z(n)$ 是均值为 0，方差为 0.5 的复高斯白噪声，其发送速率为 $r=N\log(1+gW)$，N 是一个时隙使用的信道符号，需要的功率为 $W(g,r)=(2^{r/N}-1)/g$。设数据缓冲器具有足够的长度，使得数据溢出的概率可忽略不计，则得到队列长度 q 的动态方程：

$$q(n+1)=q(n)+a(n)-r(n) \tag{1}$$

这里 $r(n)\le q(n)$。

系统的优化目标是在平均时延约束下使系统的平均功率最小。根据 little 定理 $D\lambda=Q$ (D 表示系统时延，λ 是业务流的平均速率，Q 是队列平均长度)，时延最小准则可转化为队列平均长度最小准则，由此得到该优化问题的数学表达式：

$$\min \limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}E\left[\sum_{i=0}^{n-1}W(i)\right] \tag{2a}$$

其约束条件为

$$\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}E\left[\sum_{i=0}^{n-1}\frac{q(i)}{\lambda}\right]\le\overline{D} \tag{2b}$$

其中 $\overline{D}$ 为用户平均时延上限，$E[x]$ 为求 x 的数学期望。

3　MDP 模型及最优解

上节最优化策略的求解实际上是一类随机序贯决策问题，研究这类问题的最有效方法是马尔可夫决策过程(MDP)，它是指根据某一准则在一系列相继的或连续的时刻(称之为决策时刻)点上做出相应决策的过程。定义 $s(n):=(g(n),q(n))$ 为系统状态，其状态空间集为 $S=:R^+\times R^+$，R^+ 表示正实数空间，发送速率 r 组成决策空间 $r\in[0,q]$。因为信道建模为独立衰落信道，根据队列的动态方程式(1)，容易得到状态的转移概率为

$$\begin{aligned}P_{ij}(r^i)&=P(s(n+1)=s^j\mid s(n)=s^i,r(n)=r^i)\\&=P(g(n+1)=g^j)*P(q(n+1)=q^j\mid q(n)=q^i,r(n)=r^i)\\&=P(g^j)*P_a(q^j-q^i+r^i)\end{aligned} \tag{3}$$

其中 $P_a(q^j-q^i+r^i)=\int\limits_{q^j-q^i+r^i}\mathrm{d}F(a)$ 表示队列长度为 $q^j-q^i+r^i$ 的概率，s^i，s^j 属于状态空间，r^i 属于决策空间，q^i，q^j 和 g^j 也属于状态空间。

设 π 是 n 时刻的一个策略，Π 是所有这些策略的集合，系统以前的状态集为 $\{S_0,S_1,\cdots,S_n\}$，行动集 $\{r_1,r_2,\cdots,r_{n-1}\}$ 按此策略采取行动。重新定义功率代价函数和时延代价函数为

$$W_s^\pi=\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}E_s^\pi\sum_{i=0}^{n-1}W(i) \tag{4a}$$

$$D_s^\pi=\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}E_s^\pi\sum_{i=0}^{n-1}\frac{q(i)}{\lambda} \tag{4b}$$

任给一平均时延 $\overline{D}>0$，定义 $\Pi_{\overline{D}}$ 是所有满足时延限制 $D_s^\pi\le\overline{D}$ 的策略 π 的集合，那么式(2)定义的优化问题可表示为 $\min W_s^\pi,\pi\in\Pi_{\overline{D}}$，引入拉格朗日乘子 $\beta>0$，则有

$$J_\beta^\pi(s)=\limsup_{n\to\infty}\frac{1}{n}E_s^\pi\sum_{i=0}^{n-1}\left(W(i)+\beta\frac{q(i)}{\lambda}\right) \tag{5}$$

其中拉格朗日乘子 β 是权重系数，其表示平均时延相对平均功率的重要程度。下述定理说明通过选择合适的权重系数 β，式(5)的非限定性优化问题的最优解也是原来限定性优化问题的最优解。

定理 1　对某一权重系数 β，π^* 是最优化问题：$\min J_s^\pi$，$\pi\in\Pi$ 的策略，在此策略下，如果 $D_s^{\pi^*}=\overline{D}$，那么策略 π^* 也是原来限定性问题的最优策略[5]。

因此，原限定性优化问题可转化为非限定性 MDP 优化问题，对后者的求解大大简化了计算，并可求出不同时延约束下的最小功率，从而有利于功率和时延关系的分析。

对非限定性 MDP 优化问题的求解，即为求不同权重系数 β 下最小化式(5)的最优策略集。对于某一 β 值，令 W^{π^*} 和 D^{π^*} 分别表示最优策略 π^* 下对应的功率和时延，则 W^{π^*} 是当时延小于等于 D^{π^*} 时的最小功率。定义 $W^*(D)$ 是最优策略 π^* 下时延小于等于 D^{π^*} 时的最小功率，则有 $W^*(D)=W^{\pi^*}$，$W^*(D)$ 即为时延-功率函数。改变 β，就可得到不同的 (W^{π^*},D^{π^*}) 点。如果 D^{π^*} 满足式(2b)的约束条件即 $D^{\pi^*}\le\overline{D}$，则 W^{π^*} 即为原优化问题的最小功率，策略 π^* 为其最优策略。

用上述方法求最优解的前提条件是必须找到所有的 $W^*(D)$ 值，才能保证原问题的最优解一定落在由不同的 (W^{π^*},D^{π^*}) 点组成的集合中。显然，若 $W^*(D)$ 是关于 D 的凸函数，则上述条件得到满足。由此，我们引入如下定理。

定理 2 最优策略下时延-功率函数 $W^*(D)$ 是关于 D 的一个非增的凸函数[2]。

该定理表明：通过选定合适的 β 值可得到时延-功率函数关系。若仅求解式(2)的优化问题，通过选择少数几个 β 值即可完成，对于给定的 β 值，式(5)最小化可通过动态规划求解。

4 简便策略及其队列稳定性分析

用动态规划法虽能求得最优解，但在实际的通信系统中却并不实用，因为：(1)基于整个决策阶段而不是在单个阶段做出最后决策，因而实时性差；(2)中间结果占用大量存储空间；(3)信道状态的统计特性往往并不能事先得知；(4)动态规划法是一种搜索算法，具有较高的复杂度。显然动态规划只能作离线系统的最优算法来使用。考虑到最优调度策略依赖当前队列长度和信道状态的事实，本文提出以下调度策略：

$$r(q,g)=\mathrm{Min}(q,[q\log(1+cg)]) \tag{6}$$

这里[ ]表示对括号中的数值按四舍五入方式取整数，c 是系数，较大的 c 值意味着较大的传输速率，较小的时延和较大的功率，反之也成立。由于队列状态、信道状态分别与时延、功率直接相关，因而 c 的取值也反映了该调度策略下时延和功率的关系。

该调度策略没有限制缓冲区的长度，但这并不意味着队列可以无限膨胀，作为一个调度策略必须保证队列的稳定性，下面引入 Lyapunov 稳定性定理[6]：

定理 3 对给定的 Lyapunov 函数 $L(q)$，如果存在正整数 M 和参数 $\partial>0$ 使得：

(1) $E[L(q(n+1))\,|\,q(n)]<\infty$, $q(n)\le M$,

(2) $E[L(q(n+1))-L(q(n))\,|\,q(n)]\le-\partial,\ q(n)>M$,

(3)只要 $q(n)\le M$，则存在一个非零概率 P 和整数 m 使得 $q(n+m)=0$ 成立。

则 q 存在平稳分布，该队列是稳定的。

为证明在简便策略下队列的稳定性，先建立如下命题：

命题 1 对于到达速率 $\lambda<\infty$ 的队列系统，如果服务速率 $r=\theta q$ (其中 θ 是随机变量或随机变量的函数，且 $E[\theta]>\varepsilon$，ε 是任一正数)，则队列状态满足平稳分布，队列是稳定的。

证明 设 Lyapunov 函数 $L(q)=q$，因为到达的业务流均值 $\lambda<\infty$，则定理 3 第(1)个条件得到满足。对第(3)个条件，只要存在某一时刻，使得到达的业务流为 0，则条件(3)满足，显然该条件是成立的。对 $\theta\ge1$ 的情况，根据调度策略，$r(q,g)=q$，条件(2)立刻得到满足。下面证明 $\theta<1$ 的情况：

$$\begin{aligned}E[L(q(n+1))-L(q(n))\,|\,q(n)]&=E[a(n)-r(n)\,|\,q(n)]\\&=E\big[a(n)-\theta q(n)\,|\,q(n)\big]<-\partial\end{aligned} \tag{7}$$

由式(7)得到 $E[\theta]>(\lambda+\partial)/q(n)$，因为 $q(n)>M$，则 $(\lambda+\partial)/q(n)<(\lambda+\partial)/M$，只要能保证 $E[\theta]>(\lambda+\partial)/M$，则式(7)成立。取 $M>(\lambda+\partial)/\varepsilon$，因为 $E[\theta]>\varepsilon$，则 $E[\theta]>(\lambda+\partial)/M$ 成立，条件(2)得到满足，命题 1 得证。对于建议的简便策略，只要 $c=\arg\limits_{c}(E[[\log(1+cg(t))]]>\varepsilon)$，就满足了命题 1 的条件，从而证明了队列的稳定性。

5 仿真实验

为验证简便策略的性能，本文在业务流和信道增益相同的条件下，对最优策略和简便策略进行了 4 组仿真，每个时隙信道使用符号 $N=1$，时隙长度取 $T=1\mathrm{s}$。第 1、2 组仿真的业务流选择参数为 0.5 比特/时隙的泊松流，信道是参数为 0.05 的瑞利信道和 4 状态(0.02，0.04，0.06，0.08)的等概信道(如图 2)。第 3，4 组的业务流是参数为 1 比特/时隙的泊松流，信道增益与前两组相同(如图 3)。对最优策略，通过设置不同的权重系数 β，可得到时延-功率曲线。对简便策略，设置不同的 c 值，同样可得到时延-功率曲线。

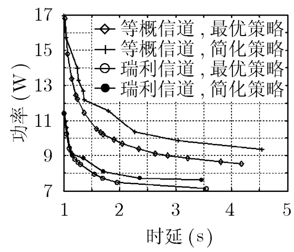

图 2 到达速率为 0.5 比特/时隙的时延-功率曲线

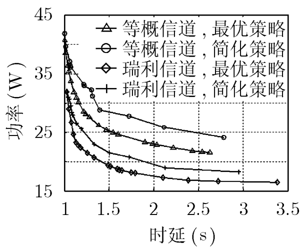

图 3 到达速率为 1 比特/时隙的时延-功率曲线

从图 2 中看出，最优策略下的时延-功率曲线具有凸函数的特性，从而验证了定理 2 的结论；简化策略下的时延-功率曲线具有与最优策略下的时延-功率曲线相同的趋势。在时延较小时，简便策略和最优策略对应的功率相差较小。因为在小时延的情况下，数据必须尽快发送，两者优化的空间都很小，最优策略的好处不能得到发挥。在最小时延 1 的情况下，两种策略下的功率消耗完全一样，这种情况对应着时限容量下的功率，优化策略完全失去作用。但随着时延的增加，两种策略下的功率消耗的差距逐渐增大。因为增加时延，最优策略可等待好的信道条件下发送数据，因而节省了功率，而简化策略并未利用历史信息，只根据当前的信道状态和队列长度决定发送速率，因而不能达到性能最优，但因为简便策略下的速率是当前信道增益的增函数，因而也具有节省功率的作用。随着时延的进一步增加，最优策略下的功率消耗逐渐趋于一稳定值，该稳定值对应信道平均容量下的平均功率，最优策略等效于注水功率分配策略，在这种情况下，两种策略下的功率差值也趋于一稳定值。从图中也看出，瑞利信道比等概信道更节省功率，因为仿真所使用的等概信道状态数较少，无论对于最优策略还是简化策略，其优化的空间都较小，所以消耗的功率相对较大。

图 3 所使用的信道与图 2 一样，但到达数据流的速率增加一倍，其功率呈指数增长，与香农公式吻合。两种策略的功率差值也比图 2 中的大，但其差值的百分比都在 20%以下。

仿真结果表明，在几种信道模型和数据速率条件下，简便策略与最优策略性能相近，虽然功率最多多消耗 20%，但使复杂度大大降低，实时性更好，因而具有实际的应用价值。

6 结束语

本文研究无线信道中基于时延约束下功率最小化的调度策略。文章首先将该优化问题转化为非约束 Markov 动态决策过程，随后用动态规划的方法获得了最优解。由于动态规划是基于整个决策阶段而不是在单个阶段做出最后决策，因而实时性较差，不适合实时性要求高的应用。同时该方法事实上也是一种搜索算法，具有较高的复杂度，不适合在实际系统中使用。有鉴于此，文章提出了一种简便调度策略，该策略只根据当前的信道状态和队列长度做出决策，具有很好的实时性。该策略还能使队列具有平稳分布的特征，该特征保证了系统的稳定性。仿真结果显示：与最优策略相比，该策略在相同时延条件下，功率最多损失 20%，作为回报，却使复杂度大大降低，实时性更好，因而具有实际的应用价值。

参 考 文 献

[1] Goldsmith A J and Varaiya P. Capacity of fading channels with channel side information. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1997, 43(6): 1986–1992.

[2] Berry R A and Gallager R G. Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(5): 1135–1149.

[3] Goyal M, Kumar A, and Sharma V. Power constrained and delay optimal policies for scheduling transmission over a fading channel. INFOCOM, San Francisco, USA, 2003(1): 311–320.

[4] Wang H and Mandayam N B. A simple packet-transmission scheme for wireless data over fading channels. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(7): 1055–1059.

[5] Ma D J, Makowski A M, and Shwartz A. Estimation and optimal control for constrained Markov chains. IEEE Conf. on Decision and Control, Athens, Greece, 1986, 2: 994–999.

[6] Kumar P R and Meyn S P. Duality and linear programs for stabilityand performance analysis of queueing networks and scheduling policies. *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, 1996, 41(1): 4–17.

彭烈新： 男，1968 年生，博士生，研究方向为无线网络中的资源分配和跨层优化.

朱光喜： 男，1945 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为宽带无线与多媒体通信.

蔡德钧： 男，1938 年生，教授，研究方向为信息论、图像数据压缩及多媒体通信.