

基于流星余迹通信系统的低密度校验码的分析设计^{*}

孙 蓉 刘景伟 王新梅

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 本文介绍了流星余迹信道及其特点、信道编码技术在流星余迹通信系统中的应用。通过分析说明低密度校验(LDPC)码在流星余迹通信系统中的应用,提出了 LDPC 码应用的几个原则。研究表明,在发射功率(信噪比)有限的情况下,流星余迹通信系统可以利用 LDPC 码的同时纠错、检错特性,使系统达到高的正确接收率。最后针对流星突发信道的信道参数变化的特点,设计了非规则的短长 LDPC 码,可以得到比规则 LDPC 码更加优越的性能。

关键词 流星余迹通信, LDPC 码, 非规则 LDPC 码

Applications of LDPC Codes in Meteor Burst Communications

SUN Rong LIU Jing-Wei WANG Xin-Mei

(State Key Lab of ISN, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract This paper introduces some characteristics of the meteor trail communication (meteor burst communication), mainly describes the channel coding used in the MBC system. The utility of LDPC codes in the system is analyzed and described in detail, some criterion of the utility are presented. It is proven that when the SNR is small, the use of LDPC codes in MBC system can improve the system performance for both the correcting ability and detecting ability of the LDPC codes. Based on the SNR time-varying property of the MBC channel, the irregular short-length LDPC codes are proposed and better performance is obtained.

Keywords Meteor trail communications, LDPC codes, Irregular LDPC codes

1 引言

流星余迹通信(MBC)利用流星电离余迹对 VHF 无线电波的反射和散射作用来进行通信,它是一种突发的通信方式^[1,2]。流星余迹通信方式特殊,它具有好的隐蔽性、强的抗干扰能力、低截获概率及抗毁性,尤其在高空核爆炸的电磁效应使其他通信手段(如高频通信)中断的情况下仍能生存,使其在应急通信中具有特殊的地位,成为一种受到物理或电子攻击时的有效通信保障手段。在我国,有很多专家对流星余迹通信正进行深入的研究。由于流星余迹信道的不连续性和信道参数的时变性,合理设计相应的通信系统,是流星余迹通信系统所要解决的问题。为了提高流星余迹通信系统的通信质量和单位时间吞吐率,信道编码在流星余迹通信中得到了一定的应用^[3,4]。

LDPC 码目前是信道编码理论中的热点^[7,8]。研究表明,近无限长的 LDPC 码具有普通分组码所不能比拟的优异的纠错特性。尽管 LDPC 码短码的性能不如长码那样突出,但将 LDPC 码的检错、纠错能力一并考虑,应用在流星余迹通信中,并且利用流星余迹信道的特点,构造特殊的 LDPC 码字,是非常有用的。

本文首先介绍了流星余迹信道及其特点,LDPC 码的基础知识;随后对 LDPC 码在流星余迹通信中的应用进行了分析与说明。研究表明,在发射功率(信噪比)有限的情况下,流星余迹通信可以利用 LDPC 码的同时纠错、检错特性,使系统达到高的正确接收率。最后,针对流星突发信道的信道参数变化的特点,提出了 LDPC 码应用的几个原则,并且提出了采用非规则的短的 LDPC 码,可以得到比规则 LDPC 码更加优越的性能。

2 流星余迹信道及其信道编码

2.1 流星余迹信道概述

每天,有数十亿计的小流星进入地球的大气层,通过与大气层的摩擦,它们迅速地燃烧、气化,从而沿着其运动的轨迹留下了一串电离化的微粒,我们称之为流星余迹。电离化的微粒可以反射、发射无线信号,因此适当的流星余迹可以用于发射机之间的长距离通信。然而,流星余迹的迅速弥散使得信号的强度随之衰减。一般情况下,一个流星余迹的生命周期很短,仅有零点几秒。因此,流星余迹通信又被称为流星突发通信。目前,流星余迹通信主要用于交通工具跟踪、环境监测等通信上。在军事上,流星余迹通信也有着很大的应用。

一个流星余迹所形成的信道是一种时变的、生命短暂的信道。根据流星余迹的电子线密度的分布,流星余迹可以分为欠密类余迹(underdense),其电子线密度小于 10^{14} electrons/m;过密类余迹(overdense),其电子线密度大于 10^{14} electrons/m。由于进入大气层的流星数目与电子线密度成反比,欠密类余迹出现的频率要大大高于过密类余迹,因此在研究中我们都采用欠密类余迹作为信道模型。一般来说,欠密类余迹具有接收信号功率随着时间的增加呈指数下降趋势的特点。对于欠密类流星余迹,在数字通信中,经过采样,第 k 个接收比特所对应的信道的信噪比表示为

$$SNR(k) = SNR(kT) = SNR_0 \exp\left(-\frac{kT}{\tau}\right) \quad (1)$$

其中, SNR_0 是最大信噪比,即信道初始的信噪比。 T 是每一个比特所持续的时间。 τ 是与决定衰减速度的一个时间常数,一般情况下 $\tau=0.2$ 。

2.2 在流星余迹通信系统中应用信道编码技术

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60532060,60572149)资助项目。孙 蓉 博士研究生,讲师;刘景伟 博士研究生;王新梅 教授,博士研究生导师。

信道编码在流星余迹通信中的应用起初是一个比较矛盾的问题。信道编码的使用增加了一定长度的信息的传输时间(假设未编码的系统中传输信息需要 T 秒,则在码率为 $R(R < 1)$ 的编码的系统中需要延长 $T(1-R)/R$ 秒),这在信噪比随着时间的增加呈指数衰减的欠密类余迹信道中是一个缺点。但研究表明,使用信道编码所带来的优点要超过它所带来的较长传输时间的缺点,它可以在信噪比较低的情况下提高系统的性能。

在流星余迹通信中采用的信道编码技术可以分为两类:一类是固定码率的编码,一类是变码率的编码。在信噪比是随时间变化的流星余迹信道,变码率的编码方式可以充分利用信道信息。主要方法有 Pursley 和 Sandberg^[6] 在 1989 年

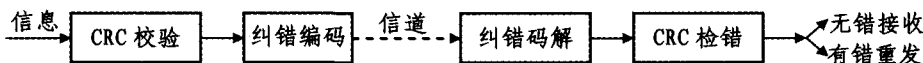


图1 纠错码与CRC校验码结合

由于流星余迹信道的时变特性,信道交织器在其编码模块中也得到了应用,见图2。信道交织器的使用可以增加码

字纠正突发错误的能力。

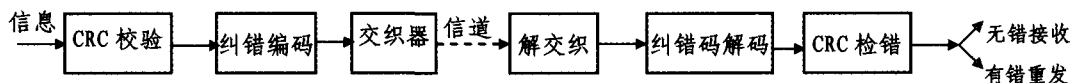


图2 流星余迹通信中的编码模块

3 基于MBC的LDPC码

3.1 LDPC码

低密度校验码(LDPC码)由 Gallager 于 1962 年提出^[7],并在近几年内重新发现和推广,成为信息论、编码界研究的热点问题。LDPC码是一类线性分组码,其一致校验矩阵 H 矩阵中仅有极少量的非 0 元素。根据 H 矩阵中每行(列)非零元素的个数的分布,LDPC码可以分为规则的与非规则的LDPC码^[8]。由变量节点和校验节点以及它们之间联接的边所组成的二部图可以很好地表示LDPC码。研究表明,LDPC码具有很好的纠错性能,LDPC长码的性能可以超过Turbo码;同时,采用概率译码的LDPC码具有良好的检错性能,因此LDPC码成为强噪声信道上无差错通信的选择之一。

LDPC码的译码采用置信传播译码算法^[8],是一种迭代译码算法。令 $m_{vc}^{(l)}$ 是在第 l 次迭代中变量节点 v 发送至校验节点 c 的消息; $m_{cv}^{(l)}$ 则是相应的校验节点 c 发送至变量节点 v 的消息。在算法开始, $m_{vc}^{(0)}$ 是根据变量节点 v 的观测值所得到的对数似然比,它的取值与校验节点 c 无关,用 m_v 表示。对于BPSK调制,有

$$m_v = \log \frac{p(x_v=1|y_v)}{p(x_v=-1|y_v)} \quad (2)$$

于是,根据置信传播算法,我们有相应的如下迭代公式:

$$m_{vc}^{(l)} = \begin{cases} m_v, & \text{if } l=0 \\ m_v + \sum_{c' \in C_v \setminus \{c\}} m_{c'v}^{(l-1)}, & \text{if } l \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$m_{cv}^{(l)} = \ln \frac{1 + \prod_{v' \in V_c \setminus \{v\}} \tanh(m_{c'v}^{(l)}/2)}{1 - \prod_{v' \in V_c \setminus \{v\}} \tanh(m_{c'v}^{(l)}/2)} \quad (4)$$

C_v 是与变量节点 v 相联接的校验节点的集合; V_c 是与校验节点 c 相联接的变量节点的集合。

3.2 流星余迹通信中使用LDPC码

在流星余迹信道中,信息的传输是分为很多短的片段进行传输的,并且传输在时间上不是连续的。由于这种传输特点,在流星余迹通信中所应用的码的长度应该有所限制,即一

提出的可变码率的“一包多码”(multiple codes per packet)体制、Jacobsmeier 在 1989 年^[6]提出的将网格编码调制与根据信道变化的 M 维 PSK 星座图结合的体制。这两种方法利用了信道的特点,但是编、译码都比较麻烦,大大增加了系统的复杂度和成本。在本文中,我们主要讨论固定码率的编码的应用。

流星余迹通信信道具有快速衰减的特点,ARQ(Automatic Repeat-Request)的使用是非常必要的^[4]。将ARQ与纠错编码结合,接收信息经过纠错后通过检错,判断有无错误。若存在错误,则要求发送方重新发送。这种体制我们一般通过CRC校验与纠错编码一起使用来完成,见图1。

个流星余迹信道在其生命期间所能传输的比特数目是有限的,一般来说为几百到几千个比特。

不考虑将一个码字分成若干片断在流星余迹通信中传输的情况(这样可采用长码,但是系统复杂,时延长,而且不同的余迹的特性之间的差异会引起很多问题),用于流星余迹通信中的LDPC码应该是长度有限的短的LDPC码。短的LDPC码在纠错性能上不如Turbo码,但由于LDPC码的优异的检错特性,它的使用使得系统的构造简单。我们可以省略图1的CRC校验的部分,也就是仅仅使用LDPC码,就同时可以完成纠错、检错功能。由于流星余迹信道随时间衰落特性,在使用一般编码时,需要利用信道交织器(图2)来避免接收序列的后面的比特出错几率增大,造成译码困难,即将错误平均地分配于接收序列中。LDPC码由于自身的自交织的特点,不需要使用交织器,见图3。

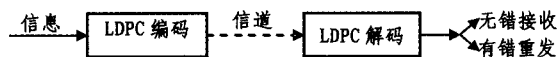


图3 在流星余迹通信中利用LDPC码

表1 流星余迹通信中的几种信道编码体制

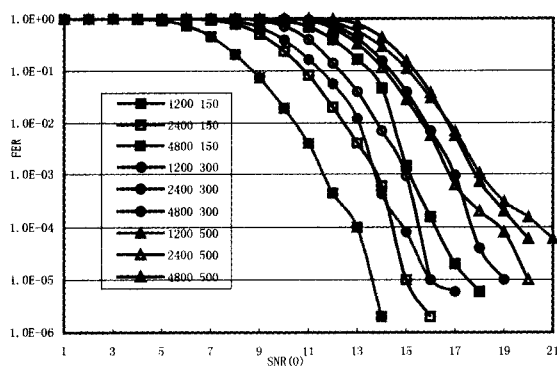
1. 无 FEC	未编码的信息 + CRC 校验
2. 有 FEC	a. CRC 校验 + FEC, 例如 CRC 校验 + Turbo 编码
	b. LDPC 编码

使用LDPC码,我们可以不需要CRC校验和信道交织、解交织器,同时达到纠错、检错的效果。可以看出,在流星余迹通信系统中使用LDPC码,能够使得通信系统结构大大简化。

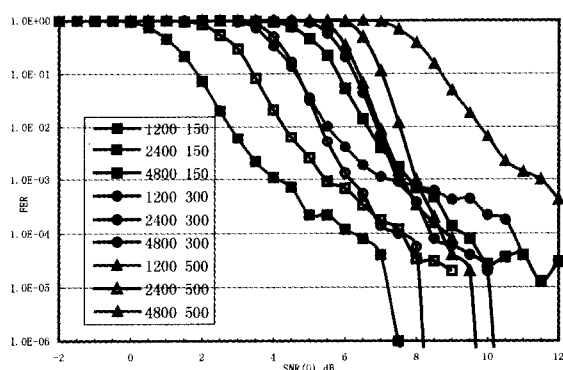
3.3 LDPC码在流星余迹通信中的性能分析

我们对流星余迹通信系统的几种编码体制进行了模拟。信道模型根据公式(1)建立。当信号脉冲功率确定后,信号脉冲出现的时间及其持续的时间决定了信号能量,信噪比可以相应确定。值得注意的是,信号持续时间与传输频率呈反比关系,即单脉冲信号的能量将会随着脉冲频率的增加而降低。

在模拟中,我们所采用的信号的脉冲频率为:1200pulse/s, 2400pulse/s,4800pulse/s。当信号脉冲功率为固定值时,若对于传输频率为1200pulse/s的信号, $SNR(0)=0\text{dB}$,则对于传输频率为2400pulse/s的信号, $SNR(0)=-3\text{dB}$ 。因此,在



(a) 无编码



(b) LDPC 编码

图4 流星余迹通信在未使用纠错编码(a)与使用LDPC码(b)的误码率

图4是流星余迹通信未使用纠错编码与使用LDPC码的误码率性能图。图释中的数值分别表示脉冲速率和单个信道所传信息比特数。从图4(a)可以看出,在流星余迹通信中仅仅利用CRC校验,要求非常大的初始信噪比(最大信噪比)。在最大信噪比小于7~8dB的情况下,帧错误概率很高(信息正确接收率很低);在最大信噪比低于5dB的情况下,正确接收帧的概率几乎为0。在低信噪比的情况下,尽管采用有错重发的传输体制,但由于正确接收概率太低,重发几乎是徒劳的,因此系统的吞吐量也很低。在这种情况下,我们需要采用前向纠错编码体制来获得高的性能。

在前一部分,我们已经指出,普通的系统是由CRC校验和纠错编码级联完成的,但系统较为复杂。LDPC码以其在低信噪比的情况下的优异的纠错、检错性能,成为我们的选择。图4(b)表示的是码率为1/2的(3,6)规则LDPC码在同样的流星余迹信道中的误码率性能图。从图中可以看出,LDPC码在低信噪比时,可以同时纠错、检错,提高帧正确接收概率,从而提高信息正确接收概率。对于LDPC码,有这么几个问题应该考虑:

①由于LDPC码的自交织特性,LDPC码在流星余迹通信中可以采用一个信道发送一个LDPC码字的方法,从而使得码字的长度达到最大化。这样,性能也会有所增加。

②在LDPC码的传输时,由于信道逐渐衰减,因此应该将信息位置于码字的前端进行传输,可以稍微提高比特错误概率(BER)的性能。

③由于流星余迹信道的不连续特性,在接收端译码时,我们可以利用信道消失的间隙,多次迭代,在下一个信道出现之前完成译码和检错,在发送端、接收端达到基本同步的同时,获得较大的编码增益。

④通过合理地构造校验矩阵,LDPC码的不可检测错误非常低,几乎没有。

4 基于MBC的非规则LDPC码的设计

在流星余迹通信中,对于LDPC码的使用,我们建议应用较短的码。当使用LDPC码的短码时(码长小于1000),规则LDPC码的性能优于规则LDPC码的性能。但流星余迹信道的信号脉冲功率具有随时间衰退的特性,在噪声功率谱密度

脉冲发射功率一定的情况下,对于信号功率随时间衰减的欠密类流星余迹,要求尽量在信道初始发送信号,但不能一味地增加脉冲频率。

确定的情况下,在信道起初,信噪比很高,但随着时间的推移,信噪比越来越小。也就是说,接收比特的可靠性随着时间的推移逐渐减小。我们有必要将这种特性应用到编码或者译码中。可编码率编码是一种解决问题的办法,但会增加系统的复杂度和损耗。因此固定码率编码一直是主导的候选者。怎样将信道特性结合到固定码率的系统,是一个值得思考的问题。

在LDPC码的置信传播译码算法中,最先计算的是变量节点基于接收值的对数似然比 m_v 。可以说 m_v 和码的结构是影响译码的两个主要因素。在流星余迹通信系统中, m_v 的可靠性将随着变量节点的序号的增加(序号越大,传送得越晚)而降低。根据这一特点,我们可以设计一种LDPC码,使得具有高可靠性的变量节点在译码中多做贡献,从而提高整个码字的抗干扰能力。具有这种特性的码应该是非规则LDPC码。其一致校验矩阵如(5)~(7)式所示:

$$\mathbf{H}=[\mathbf{H}_1|\mathbf{H}_2|\cdots|\mathbf{H}_k] \quad (5)$$

$$d_1 > d_2 > \cdots > d_k \geq 2 \quad (6)$$

$$d_r = \frac{\sum_{i=1}^k d_{ik} \cdot n_i}{n - m} \quad (7)$$

其中 d_k 表示 $\mathbf{H}_k$ 的列度数; n_i 表示 $\mathbf{H}_i$ 的列数, d_r 是行度数, n 是码长,即 $\mathbf{H}$ 的列数, $n = \sum_{i=1}^k n_i$, m 是码字的信息位长度。在这里所用的简单的非规则一致校验矩阵中,我们要求 $n_1 = n_2 = \cdots = n_k$ 。相应地,用 $(n, [d_1, d_2, \cdots, d_k], d_r)$ 表示对应的LDPC码。

图5(a)是(300, [5, 3], 8)码(标记为:“I frequency info-length”)与长度为300的(6,3)规则LDPC码(标记为:“R frequency info-length”)的误码率性能比较图;(b)是(600, [5, 3], 8)码与码长为600的(6,3)规则码的误码率性能比较图。

从图5中可以看出,在信噪比较低的时候,所提出非规则LDPC码的性能劣于规则LDPC码;但在信噪比足够大的情况下,非规则LDPC码的性能较规则LDPC码有所改善。

结论 流星余迹通信的研究已经持续了多年。随着Turbo码的提出和LDPC码的重新发现,关于流星余迹通信的编码问题也进入了一个新的时期。模拟表明,LDPC码可以作为流星余迹通信的候选码,能够得到高的编码增益,并且可以减少系统中的信道交织模块。特殊的非规则LDPC码可以利用欠密类流星余迹信道的特性,改善纠错性能。

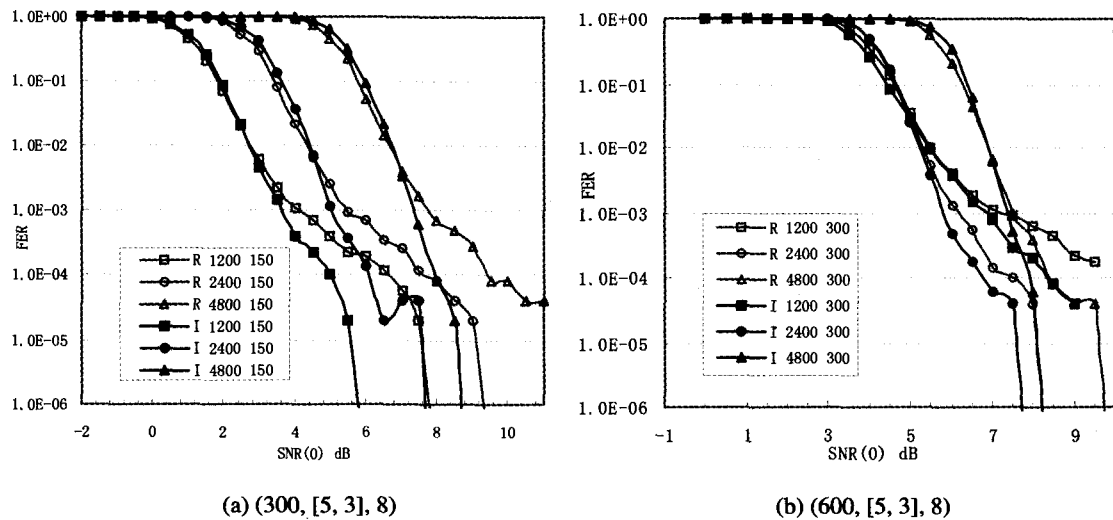


图5 规则(3,6)LDPC码与所提出的非规则LDPC码的误帧率性能比较图

目前,我们正采用密度进化理论^[9,10]对有关非规则LDPC码在流星余迹信道中性能优于规则LDPC码的性能的原因进行深入的研究。

参考文献

- 1 Fukuda A. Meteor burst communications. Tokyo: Corona Publishing Co Ltd, 1997
- 2 Schilling D L. Meteor burst communications—Theory and practice. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993
- 3 Miller S L, Milstein L B. Error correction coding for meteor burst channel. IEEE Trans Comm, 1990, 38: 1520~1529
- 4 Brayer K, Natarajan S. An investigation of ARQ and hybrid FEC-ARQ on an experimental high latitude meteor burst channel. IEEE Trans. Comm, 1989, 37: 1239~1242
- 5 Pursley M B, Sandberg S D. Variable rate coding for meteor burst communications. IEEE Trans. Comm, 1989, 37: 1105~1112
- 6 Jacobsmeier J M. Adaptive trellis-coded modulation for bandwidth-limited meteor burst channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 10(3): 550~561
- 7 Gallager R G. Low Density Parity-Check Codes. Cambridge, MA: MIT Press, 1963
- 8 MacKay D J C. Good error correcting codes based on very sparse matrices. IEEE Trans Info Theory, 1999, 45: 399~431
- 9 Bannatan A, Burshtein D. On the application of LDPC codes to arbitrary discrete-memoryless channels. IEEE Trans on Information Theory, 2004, 50(3): 417~438
- 10 Kasai K, Shibuya T, Sakaniwa K. Detailed representation of irregular LDPC code ensembles and density evolution. ISIT'2003. 121

(上接第73页)

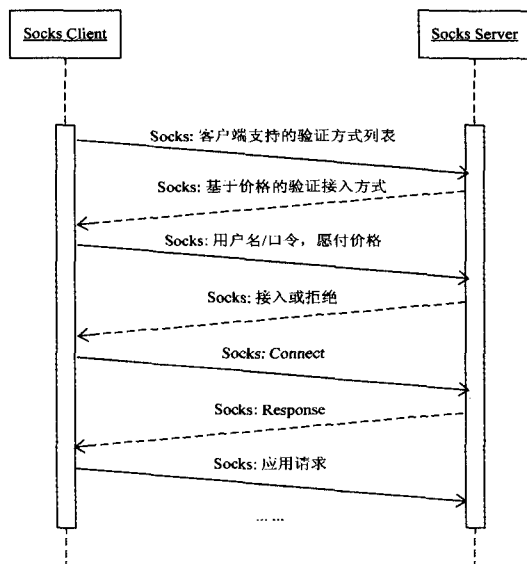


图1 基于Socks协议的价格协商和认证过程

(3)若当前网络处于拥塞状况,接入的用户连接数已经达到网络可接纳的值(II类阻塞),则返回:

0x03 接入的用户连接数已经达到网络可接纳的值

(4)若上述各项检查均已通过,则返回:

0x00 验证通过,进入下一步协议交互

上述支持价格传递和协商的Socks协议交互过程,可用于实现本文提出的基于价格的TCP接入控制,其时序图描述

如图1。

结束语 本文面向TCP连接类应用,探讨了基于价格的接入控制思想,并针对连接请求确定到达和随机到达两种情况,从理论上探讨了最优接入价格的计算方法。结合实际网络中用户需求动态变化且难以准确预估的特点,提出了根据资源利用率和连接阻塞率,动态调整连接价格的算法思想,并分析了价格调整对已接入连接的影响。在此基础上,给出了基于Socks代理协议的价格协商和接入控制实现方法。这种基于价格的接入控制思想,对有会话控制协议(如SIP、RSTP)支持的多媒体服务的接入控制具有同样的借鉴意义。

参考文献

- 1 Allman M, Paxson V, Stevens W. TCP Congestion Control. RFC2581, April 1999
- 2 Floyd S, Fall K. Promoting the Use of End-to-End Congestion Control in the Internet. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(4): 458~472
- 3 Shu J, Varaiya P. Pricing network services. IEEE INFOCOM'03, 2003, 22(1): 1221~1230
- 4 Schenk R. <http://ingrimayne.saintjoe.edu/econ/TOC.html>, 1998
- 5 Mackie-Mason J, Murphy J, Murphy L. The Role of Responsive Pricing in the Internet. In: McKnight L W, Bailey J P, eds. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1997
- 6 Keon N, Anandalingam G. Optimal Pricing for Multiple Services in Telecommunications Networks Offering Quality-of-Service Guarantees. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 66~80
- 7 Shih J, Katz R, Joseph A. Pricing experiments for a computer-telephony-service usage allocation. IEEE GLOBECOM'01, Nov. 2001. 2450~2454
- 8 Leech M, Ganis M, Lee Y, et al. SOCKS Protocol Version 5. IETF RFC1928, March 1996