

文章编号:1001-9081(2006)09-2202-04

基于凸优化和遗传算法的分层多播自适应优化

王绪国

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

(xuguo-wang@163.com)

摘要:针对无线网络上视频多播效用优化问题,提出了一种新的结合自适应调制编码的分层多播自适应优化方法。具体做法是将视频的各层对应传输于不同的自适应调制编码模式,并对各视频层分配合适的带宽,如果效用函数为凸函数,则系统效用的优化问题转换成凸优化问题,若效用函数无凸性限制,并考虑实际因素,即视频分层编码的层数限制以及有限的、可选择的各层速率之后,新的系统优化问题则通过遗传算法求解。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词:分层多播; 自适应编码与调制; 凸优化; 遗传算法

中图分类号: TP393.07 **文献标识码:**A

Adaptive layered multicasting based on convex optimization and genetic algorithm

WANG Xu-guo

(School of Information Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Aiming at the utility optimization for wireless video multicast, a new adaptive layered multicast method with AMC(Adaptive Modulation and Coding) was presented. The video layers were transmitted over different AMC modes and allocated appropriate bandwidth. When the utility function was convex, the utility maximization could be converted into a convex optimization problem. When the utility function was not convex constraint, and several practical issues like limited layer numbers and operational layer rates were taken into account, GA(Genetic Algorithm) was proposed to maximize the total utility. The simulation results show that the proposed method is effective.

Key words: layered multicast; AMC(Adaptive Modulation and Coding); convex optimization; GA(Genetic Algorithm)

0 引言

随着通信技术与计算机网络的发展,人们对高质量的音视频宽带业务提出了更多的需求。分层多播已被认为是在因特网上进行视频多播的一个解决方案,它是针对多播组成员接收能力的异构性及占用带宽不同而提出的^[1,2]。近年来分层视频多播在无线多媒体应用中也得到了研究^[3]。现代无线系统 CDMA2000、WCDMA 和 IEEE 802.11 标准中,自适应调制与编码(AMC)是增加系统容量和抵抗信道衰落的重要技术^[4]。结合分层式视频多播与 AMC, 文献[5]提出了一种新的自适应多播传输模型,它将视频数据根据其重要程度分为多层,然后分别以不同速率即采用不同的 AMC 模式来传输各视频层。然而,文献[4]以接收数据量来评价用户效用,并不符合视频接收的特点,也大大简化了这个优化问题,结果表明能够支持最大的数据传输速率和用户数量之乘积的 AMC 模式将被用来传输所有数据。

本文研究了无线网络上基于分层编码与自适应编码调制传输的视频多播效用优化问题。与文献[5]所不同的是,本文采用通用的效用函数作为优化指标。如果效用函数为凸函数,则系统效用的优化问题可以转换成凸优化问题。若效用函数无凸性限制,并考虑了一些实际因素如视频分层编码的层数限制和有限的、可选择的各层速率之后,则需采用遗传算法(GA)求解系统优化问题,适当的分配视频各层编码率和选择各层对应的 AMC 传输模式。

1 系统模型与凸优化求解

1.1 CDMA2000 HDR 系统的自适应传输

HDR(High Data Rate)是一项可实现高速数据通信的技术^[6],在 CDMA2000 HDR 系统中,区别于音频载波的 RF 载波被用于传输高码率数据。在实际应用中,传输参数被量化与组合到成为各个 AMC 模式,根据基站到用户之间的信道质量自适应地选择一个模式传输数据。表 1 列出了本文后续仿真中将要用到的 HDR 系统中的传输模式,如表所示每个模式是调制方式与编码率的组合。每个模式都有不同的传输数据率和最低信噪比要求,可以在不同信道链路质量的情况下分别使用,从而达到性能优化的效果。

表 1 HDR 系统传输模式选择

模式编号	数据率/kbps	SNR	调制方式
1	38.4	-12.5	QPSK
2	102.6	-8.5	QPSK
3	614.4	-1.0	QPSK
4	1228.8	3.0	QPSK
5	2457.6	9.5	16QAM

1.2 结合分层编码和 AMC 传输模式的系统模型

在累积式分层视频多播系统^[7]中,原始视频数据依据重要程度进行分层编码。最重要的一层称为基本层,包含了最基本的视频内容,而增强层则包含了可以用来改善视频质量的数据。用户根据自己的能力来接收视频各层,而不是由最慢接收端接收速率来决定发送方的发送速率的,从而解决了

对具有较大处理能力和较高网络带宽的接收端的不公平的问题。随着现代视频编码技术的发展,视频编码的分层结构更加灵活,采用这些视频编码器,各层视频占用带宽和分层数量都可以在极短时间内动态变化。

本文所提出的系统模型如图1所示,它结合了累积式分层编码和AMC传输。模型中,基站服务器采用累积式分层编码将原始视频数据编码为N层,其中第1层为基本层,AMC可选模式数量等于N(在本文表1中为5种模式)。各层速率用向量G来表示: $G = [G_1 \ G_2 \ \cdots \ G_N]$, $G_i \leq G_{i+1}$ 。

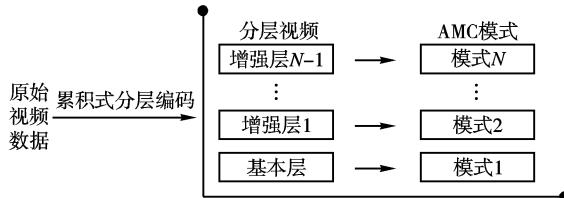


图1 结合累积式分层编码和AMC传输模式的系统模型

多播信道的下行链路中,分层数据流传输于相应的AMC模式,即包含重要信息的基本层在最低传输速率的AMC模式中传输,而增强层则传输于传输速率相对较高的AMC模式。在接收端,用户根据信道质量和设备处理能力来接收数据。如果仅接收基本层,解码器只能解码出最低视频质量。随着越多的层数被接收,用户得到的视频质量越精细。

为了将分层式视频编码与自适应传输问题转换为系统总效用的优化问题,首先需要定义效用函数,效用函数是用户可用无线网络带宽(如接收数据速率)和反映用户接收质量满意度的效用之间的映射。在本文中,采用文献[8]中效用函数定义如下:

$$U(R) = F_{\max} - F(R) = \varpi(1 - e^{-\lambda R}) \quad (1)$$

其中,R是接收数据速率,单位为kbps,同时 $\varpi > 0, \lambda > 0$,可以看出函数 $U(R)$ 为凸函数。以 R_i (kbps)表示AMC模式*i*上的传输速率,假设一个视频会话占用带宽为1,并以 p_i 为分配到视频第*i*层的带宽比例,则带宽限制以及各层速率 $\{G_j\}$ 和带宽比例 $\{p_i\}$ 之间的关系如下:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (2)$$

$$G_j = \sum_{i=1}^j p_i R_i \quad (3)$$

至此,对于系统模型和用户的效用函数,为了达到系统总效用最大化的目标,就要对这一段视频会话中的各层带宽分配 p_i 进行优化。用 M_i 表示仅能以AMC模式*i*的传输速率为最大接收能力的用户数量,则此优化问题可以表示成:

$$\max \sum_{j=1}^N M_j \times U(G_j) \quad (4)$$

约束条件:

$$C1: \sum_{i=1}^N p_i = 1$$

$$C2: p_i \geq 0$$

1.3 凸优化问题的求解

综合式(1)(2)(3),问题(4)可以转换成为:

$$\max \sum_{j=1}^N M_j \varpi \left[1 - \exp \left(-\lambda \sum_{i=1}^j p_i R_i \right) \right] \quad (5)$$

约束条件:

$$C1: \sum_{i=1}^N p_i = 1$$

$$C2: p_i \geq 0$$

因为 $[1 - \exp(-\lambda \sum_{i=1}^j p_i R_i)]$ 是一个关于 $\{p_i\}$ 的凸函数,

因此上述优化问题是一个典型的凸优化问题^[9],可以通过Karush-Kuhn-Tucker(KKT)优化条件^[9]来求得解析解,也可以通过内点方法迭代得到数值解,这里不作赘述。

2 实际因素的考虑和遗传算法应用

2.1 实际因素的考虑和新问题的优化表达式

重点介绍几个实际因素的考虑,并以此对上节介绍的系统模型作进一步完善。首先,应该注意到,对任何一个视频会话来说,视频层数是有限的,并且每层视频的可选择码率是有限的。假设这N层视频层的累积式分层编码码率将从一个包含K个元素的集合中选取。这个可操作的累积式视频码率的集合为 $\{r_1, r_2, r_3, \dots, r_k\}$ (单位是kbps),视频层的前N-1层码率将从此集合中选取,最后一层将用完所有剩下的带宽,因此其累积码率可以通过前N-1层码率和第N层所占用带宽来计算。

其次,对所有用户采用一种效用函数并且要保证函数的凸性并不实际,每个用户都有各自不同的处理和显示视频内容的能力,所以需要采用如文献[3]所述的通用效用函数。假设定义两种对接收信号有不同期望的用户——高级用户和普通用户:普通用户满足于较低的接收码率,而高级用户则要求更高视频质量并愿意付出更多代价。对两种用户采用不同的参数 ϖ_H, ϖ_L 和 λ_H, λ_L ,以 $U_L(R)$ 和 $U_H(R)$ 分别为普通用户和高级用户的效用函数,得到不同于式(1)的表达式如下:

$$U_H(R) = \max \{\varpi_H(1 - e^{-\lambda_H R}), \varpi_L(1 - e^{-\lambda_L R})\} \quad (6)$$

$$U_L(R) = \varpi_L(1 - e^{-\lambda_L R}) \quad (7)$$

从式(6)中可以看出 $U_H(R)$ 在一般情况下并不是凸函数,因此不能用一般的解凸优化的算法处理。假设 c_1, c_2, \dots, c_N 分别表示第1、2、…、N层的累积码率, x_1, x_2, \dots, x_N 为所选取的对应于N层视频层的AMC模式的传输速率。 c_1, c_2, \dots, c_{N-1} 将从累积码率序列 $\{r_1, r_2, r_3, \dots, r_k\}$ 中选取, c_N 则根据下式来计算:

$$\text{当且仅当 } \left(\frac{c_1}{x_1} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{c_{i+1} - c_i}{x_{i+1}} \right) \leq 1 \text{ 时,} \\ c_N = x_N \left(1 - \frac{c_1}{x_1} - \sum_{i=1}^{N-2} \frac{c_{i+1} - c_i}{x_{i+1}} \right) + c_{N-1} \quad (8)$$

因此模型的优化问题可归纳为:

$$\max \left[\begin{array}{l} \sum_{j \in |j| x_1 \leq r_j \leq x_2} \{n_j \times U_H(c_1) + m_j \times U_L(c_1)\} \\ + \sum_{j \in |j| x_2 \leq r_j \leq x_3} \{n_j \times U_H(c_2) + m_j \times U_L(c_2)\} \\ \cdots + \sum_{j \in |j| x_i \leq r_j \leq x_{i+1}} \{n_j \times U_H(c_i) + m_j \times U_L(c_i)\} \\ \cdots + \sum_{j \in |j| x_N \leq r_j} \{n_j \times U_H(c_N) + m_j \times U_L(c_N)\} \end{array} \right] \quad (9)$$

约束条件:

$$C1: c_i \in \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_k\} \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \text{ 且 } c_i \leq c_{i+1}$$

$$C2: x_i \in \{R_j\}_{j=1}^N \text{ 且 } x_i \leq x_{i+1}$$

$$C3: \left(\frac{c_1}{x_1} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{c_{i+1} - c_i}{x_{i+1}} \right) \leq 1$$

其中 n_j 和 m_j 分别对应能接受到不大于*j*层的高级和普通用户

数量。

对比式(5)可以看出两种模型的表达式差别很大。在新的优化问题中,视频码率不能连续变化,并且效用函数除设定了特殊的参数之外并不是凸函数。系统总效用的最大化要通过适当分配视频层码率 $\{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ 和分别选择适合的AMC传输模式来达到,如果采用穷举搜索法,求解的计算量将会高达 $O(K^2 N^3)$ 。因此,本文采用遗传算法来解式(9)所代表的优化问题。

2.2 遗传算法求解

遗传算法^[10]是一种启发式随机搜索算法,它以达尔文的生物进化论作为依据,模拟自然界的生物进化过程,通过优胜劣汰,最终获得最优结果的算法。与传统优化方法相比,遗传算法具有很强的稳健性和很高的效率,可以以较大的概率得到全局最优解。其基本算法流程为:

- (1) 初始化种群;
- (2) 计算种群上每个个体的适应度;
- (3) 按由个体适应度值所决定的某个规则选择将进入下一代的个体;
- (4) 按概率 P_c 进行交叉操作;
- (5) 按概率 P_m 进行变异操作;
- (6) 若没有满足某种停止条件,则转入(2),否则进入下一步;
- (7) 输出种群中适应度值最优的染色体作为问题的满意解或最优解。

2.2.1 编码和赋值

在本文的遗传算法应用中,为简单起见,假设视频层为3层,累积式视频码率集合为 $\{0, 64, 128, 256, 384, 512\}$ (kbps),由式(9)和遗传算法求解方法,应该以包含5个基因 $[x_1, x_2, x_3, c_1, c_2]$ 的种群为例进行模仿生物染色体(chromosome)编码,每个染色体对应着一个基因值的组合。随机产生的染色体可能为非法的和无效的。定义不满足式(9)中约束条件C1和C2的染色体为非法染色体。对非法染色体,调整 x_1, x_2, x_3 和 c_1, c_2 的排列使之满足 $x_1 \leq x_2 \leq x_3, c_1 \leq c_2$ 。对于打破了带宽限制(即约束条件C3)的无效染色体,则采用文献[10]中的惩罚(penalty)方法。

首先定义各染色体 $chromo_i$ 的适应度函数 $E(chromo_i)$,即用于评价个体在群体中的适应程度之值^[10]:

$$E(chromo_i) = Util(chromo_i) \times P(chromo_i) \quad (10)$$

其中 $U_T(chromo_i)$ 称个体效用值, $P(chromo_i)$ 是惩罚函数。

$U_T(chromo_i)$ 通过下式进行计算:

$$c_3 = \begin{cases} x_3 \left(1 - \frac{c_1}{x_1} - \frac{c_2 - c_1}{x_2}\right) + c_2, & \frac{c_1}{x_1} + \frac{c_2 - c_1}{x_2} \leq 1 \\ c_2, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

相应的惩罚函数则为:

$$P(chromo_i) = \begin{cases} 1, & \left(\frac{c_1}{x_1} + \frac{c_2 - c_1}{x_2}\right) \leq 1 \\ 3 - 2\left(\frac{c_1}{x_1} + \frac{c_2 - c_1}{x_2}\right), & 1 < \left(\frac{c_1}{x_1} + \frac{c_2 - c_1}{x_2}\right) \leq 1.5 \\ 0, & 1.5 < \left(\frac{c_1}{x_1} + \frac{c_2 - c_1}{x_2}\right) \end{cases} \quad (12)$$

2.2.2 初始化和自然选择

首先定义整数 Z 作为染色体的个数,并随机生成包含 Z 个染色体的初始种群,计算其适应度函数 $E(chromo_i)$ 。然后对新生成的每一代种群都以上述方式处理其中的非法与无效染色体。在自然选择阶段中,对于路程最优的那些基因组进行复制,对于差的基因组进行删除,根据个体的适应度值采用“轮盘选择法”选择^[10],每次旋转“轮盘”都为新的种群选择一个染色体,每个个体的选择概率和其适应度值成比例。为了保证具有较高适应度的个体不会在自然选择中丢失,采用直接保留4个具有最佳适应度的个体(杰出个体)到下一代的方式。

2.2.3 交叉与变异过程

交叉操作(crossover)是通过交换父代个体中基因进而产生新的子代个体的方法。为确定交叉操作的父代,首先设定交叉概率 p_c ,从1到重复以下过程:从[0,1]中产生一个随机数 r ,如果 $r < P_c$,则选择该染色体个体作为一个父代。将所选的父代两两组队,随机产生一个位置进行交叉。在本文中,采用随机节点交叉方法^[10]。变异(mutate)是对染色体某些位置的基因值依照基因变异概率作变动。它先设定一个变异概率 P_m ,在 $r < P_m$ 的标准下选择多个染色体作为父代,然后在其染色体的某个位置改变基因取值。

2.2.4 中止条件判断

算法终止的条件是:产生的一组解中的各个解都相同,或是这组解中有一个解满足小于设定值的条件。当满足终止条件时,结束遗传操作;否则,继续计算适应度函数并做其后的自然选择运算。当遗传算法循环结束时,具有最大适应度值的有效染色体将给出问题式(9)的优化解。

3 仿真实验

3.1 仿真环境

假定仿真环境为5小区CDMA2000 HDR,基站处于小区中央。小区规划采用两层蜂窝小区,基站传输功率为10dBW,载波传输带宽1.228MHz。用户平均分布在小区里,中央小区的表现是测试的重点。用户虽然同处于一个小区共享无线信道资源,但是每个用户的信道质量各有不同。对每个用户来说,信道增益用对数正态衰落衡量。用户 k 的链路增益 g_k :

$$g_k = \frac{s_k}{d_k^\alpha} \quad (13)$$

其中 s_k 是信道增益, d_k 表示用户到基站之间的距离, α 是路径损耗参数,本文仿真中对数正态衰落 $\sigma = -8$ dB, $\alpha = 3$ 。因此用户 k 的信噪比 γ_k 可以通过下式计算:

$$\gamma_k = \frac{g_k * P_{\max}}{I_k} \quad (14)$$

其中 P_{\max} 表示基站的最大传输功率, I 是其他小区对用户产生的接收干扰及白噪声之和。一个用户采用何种编码调制传输模式可由表1来决定。

3.2 凸优化仿真结果

通过计算机仿真可以比较问题式(5)的凸优化结果和仅用一种编码调制模式进行分层视频多播的非自适应传输结果。仿真中参数 ϖ 为128, λ 为0.004。图2显示了系统平均

效用与小区用户数量变化之间的关系。可以看出采用了本文所提出的自适应分层编码多播方式明显优于单层与单模式的传输方法。另一个系统评价标准则为接收不到视频服务的用户比例。图3也显示了当每小区用户数量为30时的平均效用和无法接收服务的用户比例之间的关系。采用本文所提AMC自适应传输方式可以在实验条件下达到一种最佳的性能折中效果。

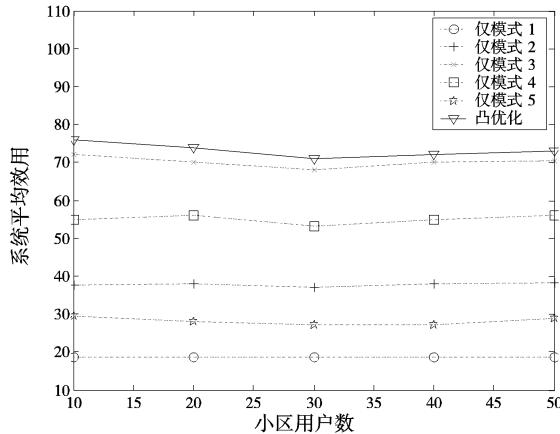


图2 自适应与非自适应多播方式在不同用户数量时的系统平均效用曲线(凸优化)

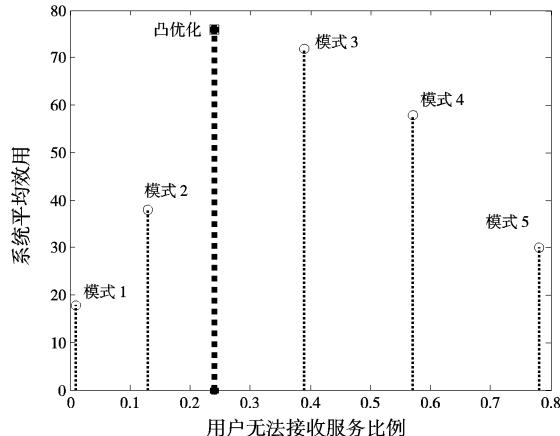


图3 用户无法接受服务比例和系统效用关系对比(凸优化)

3.3 遗传算法仿真结果

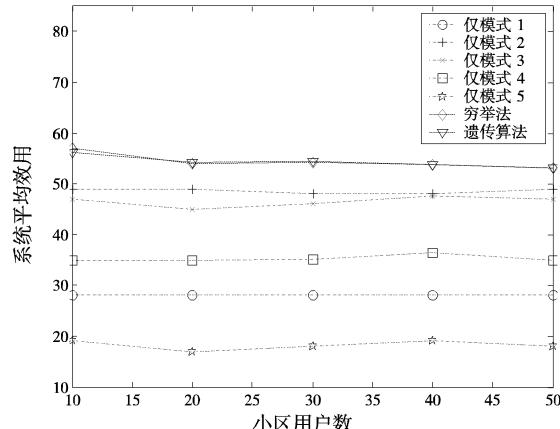


图4 自适应与非自适应多播方式在不同用户数量时的系统平均效用曲线(遗传算法)

作为问题式(9)的优化,交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 分别取为 0.85 和 0.20,历代数量为 80,群体大小为 20,杰出个体数量取 4。对(6)和(7)中的效用函数, ϖ_H 为 128, ϖ_L 为 64,

λ_H 为 0.004, λ_L 为 0.02。图4显示了系统平均效用与小区用户数量变化之间的关系。可以看出穷举法与遗传算法得到的结果十分接近。图5表示了当每小区用户数量为 30 时的系统平均效用和无法接收服务的用户比例之间的关系,同样的,问题(9)的优化也是实验条件下一种最佳的性能折中效果,由本文所提出的自适应多播传输方式达到。

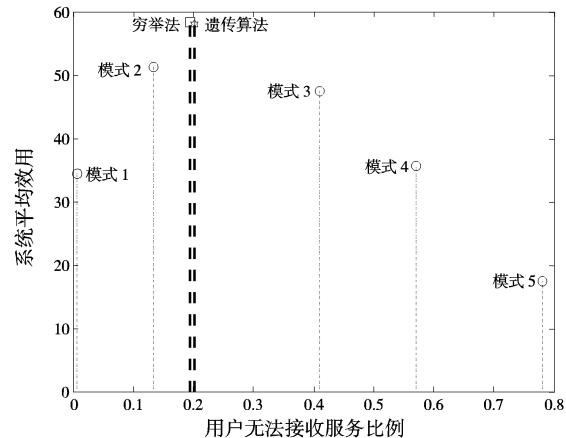


图5 用户无法接受服务比例和系统效用关系对比(遗传算法)

4 结语

本文研究了自适应编码调制的视频多播优化问题,提出了结合分层视频编码和AMC自适应传输技术的多播模型。在讨论如何分配多层码率和选择对应的AMC传输模式时,若不考虑视频编码分层层数以及效用函数为凸函数,系统效用优化可以转换为凸优化问题来解决;当结合实际的因素考虑其中时,新的优化问题用遗传算法解决。两种情况都在包含5小区的CDMA2000 HDR无线系统仿真环境中得到验证,证明了本文提出的方法是确实有效的。

参考文献:

- [1] XUE LI, AMMAR M, PAUL S. Video multicast over the internet [J]. IEEE Network Magazine, 1999, 13(4): 46 – 60.
- [2] LIU JC, LI B, ZHANG YQ. An end-to-end adaptation protocol for layered video multicast using optimal rate allocation [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2004, 6(2): 87 – 102.
- [3] LIU JC, LI B, CHLAMTAC I. On optimal layering and bandwidth allocation for multisession video broadcasting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 656 – 667.
- [4] GOLDSMITH A, CHUA SG. Adaptive coded modulation for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communication, 1998, 46(5): 595 – 602.
- [5] HWANG CS, KIM YS. An adaptive modulation method for multicast communications of hierarchical data in wireless networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C], 2002. 896 – 900.
- [6] 赵绍刚,李岳梦.CDMA2000系统中的广播和多播业务[J].数字通信世界,2005,(8): 55 – 59.
- [7] WU DP, HOU YT, ZHANG YQ. Scalable video coding and transport over broadband wireless networks[J]. Proceedings of IEEE Digital Object Identifier, 2001, 89(1): 6 – 20.
- [8] LIU JC, CHEUNG KM, LI B, et al. On the optimal rate allocation for layered video multicast[J]. Proceedings of Computer Communications and Networks, 2001, (10): 412 – 417.
- [9] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. London: Cambridge University Press, 2004.
- [10] GEN M, CHENG RW. Genetic Algorithms & Engineering Design [M]. John Wiley & Sons INC., 1996.