

基于遗传算法的室内光无线通信功率分布优化方案

徐 春*

(新疆财经大学 计算机科学与工程学院, 乌鲁木齐 830012)

(* 通信作者电子邮箱 xu-yc@163.com)

摘 要:室内光无线通信(OWC)具备频谱资源丰富、功耗低、抗电磁干扰等诸多优势,因而越来越为业界所关注。然而,由于多径传输效应的存在,即使在同一室内房间,同一接收端在不同的接受位置依旧难以获得一致的令人满意的高质量信号。针对这一问题,提出了一种基于遗传算法的动态优化方案,以期降低接受信号功率的波动程度。相应的,给出了基于商用光探测器(视场角为 50°)的仿真实验。具体的仿真结果显示该优化方案可以将波动范围(相较于接收到的光信号功率的最大值)从优化之前的50.3%降低至34.6%,同时优化操作对照明功能的影响是可以忽略不计的。

关键词:光无线通信;遗传算法;优化;绿色照明;信号覆盖

中图分类号: TN911.74 **文献标志码:** A

Genetic algorithm based power distribution optimization scheme for indoor optical wireless communication

XU Chun*

(College of Computer Science and Engineering, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi Xinjiang 830012, China)

Abstract: As indoor Optical Wireless Communications (OWC) is characterized by enormous spectrum source, lower power need, immunity to interference caused by other Radio Frequency (RF) wireless devices, it has attracted an increasing attention in the field. However, due to multipath transmission, it is hard to obtain satisfactory uniform signal quality at the receiving terminal even for locations within the same room. A genetic algorithm based optimization scheme was proposed as a candidate approach for OWC to reduce the variability of the received power. And the simulation results based upon the use of a commercially available detector with the field of view of 50° degree show that the dynamic range of received power can be reduced to 34.6% against the peak optical power from 50.3% while the impact on illumination function is negligible.

Key words: Optical Wireless Communication (OWC); genetic algorithm; optimization; green lighting; signal coverage

0 引言

目前,传统的无线频段已经过于拥挤且需要很高的功耗以满足不断增长的数据业务。这预示着未来传统无线技术及60 GHz技术将无法持续增长的无线数据需求(如 Mobile TV 及 CMMB)。另一方面,新型的光无线接入技术具备带宽资源丰富、保密性强、传输潜能巨大等诸多优点,因而受到了许多的关注和研究支持^[1-10]。针对光无线通信的许多研究已经相继问世,如何有效地克服多径信道传输对通信表现的不利影响,依旧是光无线系统设计层面一个极富挑战的问题^[11-14]。由于相应的信道特性不仅取决于房间的具体尺寸、室内与光线发生反射作用的表面反射特征,而且受到室内物体的影响,这一系列因素使得同一光无线移动接受终端在不同的室内接受位置可能显示出明显的表现差异。

在已有的研究中^[1],已针对接收端光信号功率分布的不理想状况给出了量化分析,作为已有工作的延伸,本文提出了一种基于遗传算法的优化方案对发送端光功率进行控制进而最终在室内不同接受位置获得一致的表现特性。

1 室内光无线系统模型

1.1 常规漫射模型

为了计算入射到探测器上的全部光信号功率(含经过反

射路径部分),将室内环境分成众多尺寸很小的表面反射元素,其中每一个反射元素可以认为具有理想的朗伯反射特性。考虑到多次反射对接收端的影响已经相当微小,本文只考虑三次以内反射对接收端的贡献。具体的系统分析场景为一个空的长方体状房间,相应的长宽高尺寸分别是8 m,4 m,3 m。房间内四周墙壁、天花板及地面的反射系数分别是0.8,0.8和0.3,如图1所示。

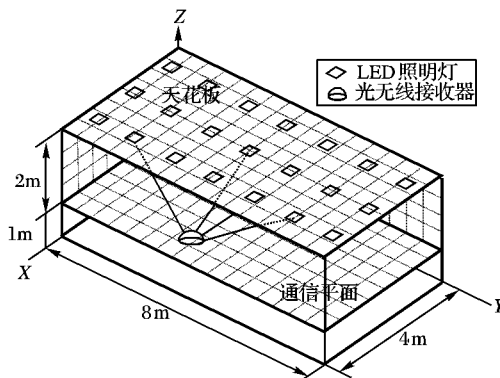


图1 天花板处安装21组LED灯的室内光无线通信场景

1.2 接收信号功率

在上述场景配置中, $I = 21$ 组照明灯被均匀地布置于天花板上,如图1所示。其中,每组灯由49(7×7)个LED组成,

每组灯中LED间距是4 cm。依据文献[1]所述,单一LED的辐射功率分布可由朗伯辐射特性很好地近似,也就是说辐射强度与发射角度满足余弦关系。此外,本文沿用已有的实测结果,LED的半功率角为 $\Phi_{1/2} = 54 \text{ deg}$,中心辐射强度分别为 $I(0) = 32.69 \text{ cd}$,单一LED的发射功率为 $P_i = 174 \text{ mW}$ [1]。本文将房间内距地面1 m的平面作为多个接收器均匀分布的通信平面,接收位置的总数是 $J = 1568$ 。在接收端,接收器的视场角 50 deg ,接收器的有效探测面积为 $A = 1 \text{ cm}^2$ 。

每个接收器所接收到的具体信号功率可由直射信道增益 $H_d(0)$ 以及反射信道增益 $H_{\text{ref}}(0)$ 如式(1)算出:

$$P_r(R_j) = \sum_{i=1}^I \left\{ P_i H_d(0; S_i, R_j) + \int_{A_{\text{sur}}} P_i H_{\text{ref}}(0; S_i, R_j) \right\} \quad (1)$$

其中: S_i 代表第*i*组LED灯, R_j 是第*j*个接收器而 A_{sur} 是所有反射表面的面积总和。对应地,在 S_i 和 R_j 之间的信道直流增益可由式(2)得到:

$$H_d(0; S_i, R_j) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (2)$$

其中: φ 是辐射出射角, ψ 是辐射入射角, m 是光源 S_i 的朗伯指数, A 是光探测器的有效探测表面积, D_d 是 S_i 同 R_j 之间的距离, $T_s(\psi)$ 是光滤波器的接受增益且 Ψ_c 每个接收器的视场角代表。此外, $g(\psi)$ 为光集中器的增益,具体当 $0 \leq \psi \leq \Psi_c$ 该增益可以表示为 $g(\psi) = n^2 / \sin^2(\Psi_c)$,而其他情况下 $g(\psi) = 0$ 。

为进一步计算通过反射路径获得的直流增益,本文将实验房间所有内表面分割为大小相同的微分元素。每个元素的面积为 dA 且反射系数是 ρ 。所有这些微分元素都可以看作一般的朗伯源,它们将入射到自身的光信号沿自身法线方向遵从朗伯模式向外进行漫反射。由于本文将考虑三次以内的反射情况,所以这一经过反射路径的直流信道增益可依据式 $H_{\text{ref}}(0; S_i, R_j) = \sum_{k=1}^3 \left(\sum_{l=1}^N H^{(k-1)}(0; S_i, \delta_l) H^{(0)}(0; \delta_l, R_j) \right)$ 给出。其中: N 为微分元素的总数, k 为反射次数。而 $H^{(0)}(0; \delta_l, R_j)$ 的具体表达式可通过参考式(2)进一步得到。此外, $H^{(k-1)}(0; S_i, \delta_l)$ 的对应表达式可以通过式(3)迭代进一步得到:

$$H^{(k-1)}(0; S_i, \delta_l) = \sum_{m=1}^N H^{(k-2)}(0; S_i, \delta_m) H^{(0)}(0; \delta_m, \delta_l) \quad (3)$$

其中 δ_l 同 δ_m 分别代表两个独立的反射面微分元素。

1.3 照明特性

室内光无线系统的另一个重要性能参量是实际房间内工作面上的水平光照度。当不添加反射作用带来的影响时,水平面的照度可由式 $E_h = I(0) \cos^m(\varphi) \cos(\psi) / R^2$ 具体获得,其中: φ 为出射角, ψ 为入射角, R 为光源与接收器表面之间的距离 [1]。 m 为朗伯指数,可依据式 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ 确定。

为了能够评估反射作用对最终亮度分布带来的影响,每个反射元素被看作一个二次光源。这样一来,每个元素的光通

量可以通过式 $F = \rho_e E_{\text{inc}} A_e$ 计算得到,其中: ρ_e 为反射元素的反射指数, A_e 为反射微分元素的面积。进一步就可以将工作面上整体水平光照度表示为:

$$E = E_h + \sum_{i=1}^N I_i \cos(\varphi_i) \cos(\psi_i) / r_i^2 \quad (4)$$

其中: φ_i 为第*i*个反射微分元素的出射角, ψ_i 为该反射微分元素的人射角, r_i 为该微分元素和照射表面间的距离, $I_i = (m_e + 1) F / 2\pi$ 为该反射微分元素的最大光照强度。本文将所有的反射微分元素视为朗伯漫射源,具体的朗伯指数是 $m_e = 1$ [1]。

2 本文提出的优化方案

2.1 优化因子

复杂的室内光无线信道,对应于通信面上不同的接收位置会出现差异很大的接受表现,在很多领域应用智能技术已经被证明能够有效地缓解此类限制。假设所有的LED灯由独立的因子 $0 < k_i \leq 1$ (称为优化算子)来量化控制。这样接收器所捕获的瞬时信号光功率可以写为:

$$P_r(R_j) = \sum_{i=1}^I \left\{ k_i P_i H_d(0; S_i, R_j) + \int_{A_{\text{sur}}} k_i P_i H_{\text{ref}}(0; S_i, R_j) \right\} \quad (5)$$

这样,就存在一种可能即获得一组算子 $k_1 k_2 \dots k_I$ 使得*J*个接收器能够获得相同或者极为接近的光功率如: $P_r(R_1) \approx P_r(R_2) \approx P_r(R_3) \approx \dots \approx P_r(R_J)$ 。优化因子同具体LED灯之间的对应关系可由图2(a)给出。不难发现优化因子中 k_7 同 k_{14} , k_8 同 k_{15} 在物理位置上是非常接近的,但是在图2(b)上图的染色体中却是相距较远。作为替代方案,图2(b)给出了一种改进的染色体结构,以缓解这一情况,具体的改变在于将优化因子 $k_8, k_9 \dots k_{14}$ 按照降序排列来构成基因型结构。

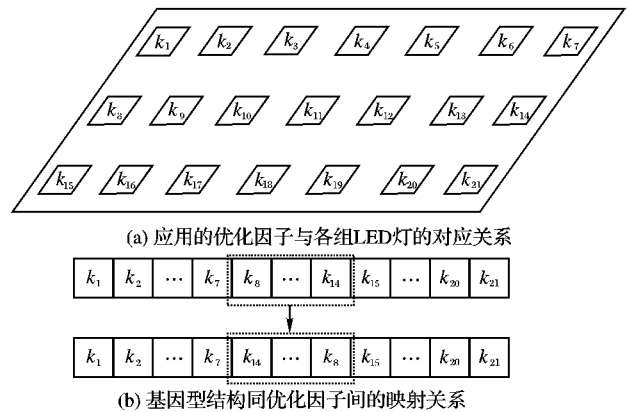


图2 优化因子关系图

2.2 目标函数

上述染色体结构设定了优化因子同基因序列之间的关系,而目标函数或称适应度函数则用于连接优化目标同表现型之间的关系。本文提出的基于遗传算法优化方案的目标函数为:

$$O(\alpha_n) = \left(100 - 100 \left(\frac{\max P_r(R_j) - \min P_r(R_j)}{\max P_r(R_j)} \right) \right) \% \quad (6)$$

其中 $\max P_r(R_j)$ 同 $\min P_r(R_j)$ 分别为应用任意组优化个体后通信面上接收信号功率的最大值及最小值。这种设定可以使种群中提供一致性最好的信号功率分布的个体将获得最大

机会进行选择和重组操作并进入下一代种群。

2.3 优化算子及算法的终止

为降低算法的复杂度并保障收敛速率,本文采用成熟的优化算子来构造优化方案。具体包括轮盘赌选择算子、双点交叉算子及变异算子来实现该算法^[15],同时设定种群规模为200。在优化搜索过程中,个体中的每一基因位置的交叉概率为 $p_c = 0.7$,变异概率为 $p_m = 0.05$ 。基于遗传算法自身的快速收敛特性,本文设定算法在确定种群中同目标函数最为匹配的个体之前,这一优化搜索过程被允许5000代。具体的算法流程由图3给出。遗传算法固有的随机特性使得每一次优化仿真的结果会有轻微的差异。为使本文的结果更具有一般性且便于读者再现,后面的仿真量化结果都是重复10次仿真操作后的平均结果。

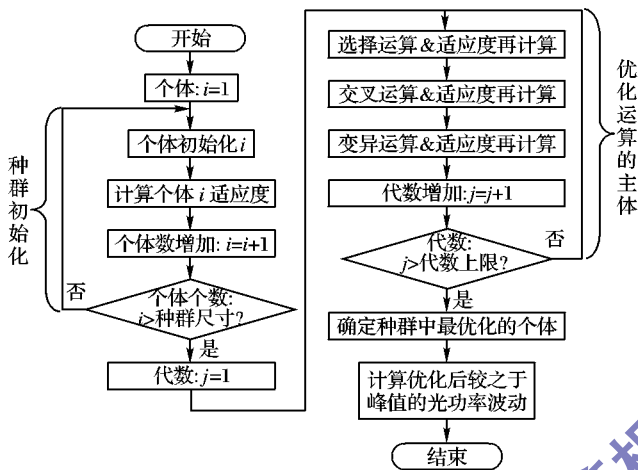


图3 完整的算法流程

3 表现评估

基于以上建立的室内场景及室内光无线系统,本章对所提出算法的表现进行了仿真评估。图4中给出了在每一个接收器位置所接受的信号功率,其中最大值为434.7 μW ,平均值为354.7 μW ,最小值为218.5 μW ,波动范围是218.5 μW 至434.7 μW ,对应的等同于波动幅度216.2 μW 或者相较于峰值50.3%的相对波动。这种情况下光照度波动是1643.8 lx至2930.6 lx,其中最大值为2930.6 lx,平均值为2527.9 lx,最小值为1643.8 lx,如图5所示。

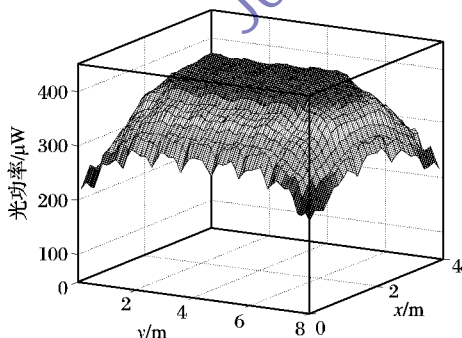


图4 未经优化的接收端通信面上的信号功率分布

施用提出定向遗传算法后,功率波动范围为122.0 μW 至186.9 μW ,对应等同于波动幅度64.9 μW 或者相较于峰值34%的相对波动,其中最大值为186.9 μW ,平均值为152.3 μW ,最小值为122.0 μW ,如图6所示。经优化作用影响下,水平照度波动是801 lx至1127.3 lx,其中最大值为1127.3 lx,平均值为1109.3 lx,最小值为801 lx,如图7所示。从图7中不难发现,通信平面上的所有接受位置仍能获得充足的光照,满足300 lx至1500 lx的ISO标准。在图8中,进

一步给出了种群平均偏移量(即各代中的平均解)以及最小偏移量(即各代中的最优解)的收敛曲线,可以直观地看出最终解相较于未优化情况下偏移量的改进程度,还显示了遗传算法的快速收敛特性,到1000代左右已经能搜索到满意解,到2000代处已能够很好地接近最终解(即种群最终确定的最优解)。

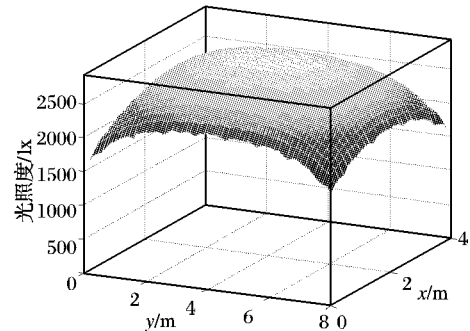


图5 未经优化的光照度分布情况

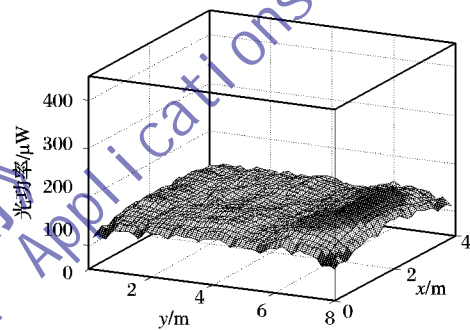


图6 经优化后的接收端通信面上的信号功率分布

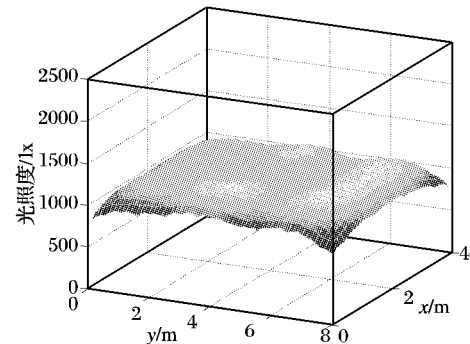


图7 经优化作用的光照度分布情况

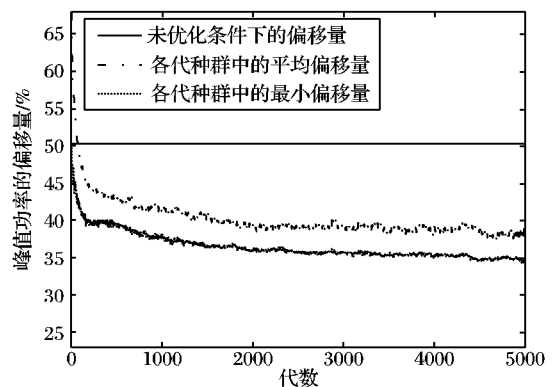


图8 算法进行优化运算的收敛曲线

4 结语

室内光无线通信被寄希望于实现室内范围的无线覆盖。由于多径传输信道及LED光源的方向性,在通信接受面上依旧难以获得一致的信号功率覆盖。本文提出了一种基于遗传

算法的定向优化方案来优化接受信号功率分布,仿真结果显示该算法能有效地降低功率波动范围,并且对室内光无线系统的照明功能影响是可以忽略不计的。由此可见,该方案适合室内光无线通信的改进需求,具有很好地优化表现和快速收敛特性。

参考文献:

- [1] WANG Z, YU C, ZHONG W, *et al.* Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM visible light communications [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13418–13427.
- [2] O'BREAN D C, FAULKNER G. Home access networks using optical wireless transmission [EB/OL]. [2011-07-01]. <http://202.194.20.8/proc/pimrc2008/content/papers/1569121263.pdf>.
- [3] SARKER S, DIXIT S, MUKHERJEE B. Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): A review of relevant challenges [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3329–3340.
- [4] VUCIC J, KOTTKE C, NERRETER S, *et al.* 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(24): 3512–3518.
- [5] GREEN R J. Secure communications: The infrared alternative [C]//*Proceedings of IEEE ICTON Mediterranean Winter Conference 2007*. [S.l.]: IEEE, 2007: 1–4.
- [6] CARRUTHERS J B. Propagation modeling for indoor optical wireless communications using fast multi-receiver channel estimation [J]. *IEEE Proceedings*, 2003, 150(10): 473–481.
- [7] DELGADO F, QUINTANA I, RUFO J, *et al.* Design and implementation of an Ethernet-VLC interface for broadcasting transmission

[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(12): 1089–1091.

- [8] BERRY J R, KAHN J M, KRAUSE W J. Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1993, 11(3): 367–379.
- [9] GRUBOR J, RANDEL S, LANGER K D, *et al.* Broadband information using LED-based interior lighting [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(24): 3883–3892.
- [10] TANAKA Y. Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights [J]. *IEICE Transactions on Communication*, 2003, E86-B(8): 2440–2454.
- [11] NTOGARIG, KAMALAKIS T, SPHICOPOULOS T. Performance analysis of non-directed equalized optical wireless systems [C]//*Proceedings of 2008 IEEE Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. [S.l.]: IEEE, 2008: 156–160.
- [12] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(3): 1127–1134.
- [13] KOMINE T, LEE J H, HARUYAMA S, *et al.* Adaptive equalization for indoor visible-light wireless communication systems [C]//*IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(6): 294–298.
- [14] HASHEMI S K. Orthogonal frequency division multiplexing for indoor optical wireless communications using visible light LEDs [C]//*Proceedings of 2008 IEEE Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. [S.l.]: IEEE, 2008: 174–178.
- [15] BACK T, HAMMEL U, SCHWEFEL P. Evolutionary computation: Comments on the history and current state [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 3–17.

(上接第934页)

的结果将会重定向到一个日志文件中以便提取相关的有用信息。在95%的置信区间下,实验结果如表2所示。

表2 可用带宽测量结果对比

Tool	Estimation error/%	Estimations/min	Overhead/%
Spruce	7.65 ± 0.98	5.487 ± 0.058	1.42 ± 0.03
Wspruce	7.69 ± 0.41	11.651 ± 0.134	1.89 ± 0.03

当紧张链路中平均有3 Mbps的背景流量泊松分布时,通过对比发现,在相同的链路开销下,Wspruce测量工具估算速度更快,达到相同的估算速度的话,开销也更低。

5 结语

隐马尔可夫模型是一个十分重要的模型,有着广泛的应用。本文针对传统可用带宽测量方法 Spruce 存在收敛慢、开销大的问题,提出了一种基于隐马尔可夫模型的可用带宽改进算法。通过利用这一模型的序列预测特性,从而加速收敛速度,降低测量开销。实验结果说明改进后的方法在收敛速度和测量开销方面有较大的改善,有效地提高了测量算法的实用性。

参考文献:

- [1] 刘星成,何莉,余顺争.网络可用带宽的高精度测量算法[J].*电子学报*, 2007, 35(1): 68–72.
- [2] HU NINGNING, STEENKISTE P. Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(6): 879–894.
- [3] 黄国伟,吴功宜,徐敬东.基于排队分析的端到端路径可用带宽的测量[J].*计算机研究与发展*, 2007, 44(1): 85–91.

- [4] 周辉,李丹,王永吉.可用带宽度量系统中的若干基本问题研究[J].*软件学报*, 2008, 19(5): 1234–1255.
- [5] 田双鹏,庞建民,王辉,等.基于PGM模型的可用带宽度量算法评估[J].*计算机工程*, 2010, 36(17): 105–108.
- [6] GALES M J F, STEVE Y. The application of hidden Markov models in speech recognition [J]. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 2007, 16(3): 195–304.
- [7] 杜世平.改进的带驻留时间隐 Markov 模型的前向-后向算法[J].*纯粹数学与应用数学*, 2008, 24(3): 580–584.
- [8] 赵晓平,侯荣涛.基于 Viterbi 算法的 Gabor 阶比跟踪技术[J].*机械工程学报*, 2009, 45(11): 247–252.
- [9] 张增银,元昌安,胡建军,等.基于 GEP 和 Baum-Welch 算法训练 HMM 模型的研究[J].*计算机工程与设计*, 2010, 31(9): 2027–2029, 2069.
- [10] STRAUSS J, KATABI D, KAASHOEK F. A measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools [C]//*IMC'03: Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*. New York: ACM, 2003: 39–44.
- [11] 黄国伟,吴功宜,徐敬东.基于排队分析的端到端路径可用带宽的测量[J].*计算机研究与发展*, 2007, 44(1): 85–91.
- [12] 岳峰. TCPDUMP 简介 [J]. *电脑学习*, 2004, 13(2): 12–13.
- [13] 裴玉欢,窦文华.面向实时应用的可用带宽自适应测量方法[J].*计算机应用研究*, 2008, 25(8): 2509–2511.
- [14] 韩宾,黄玉清,梁靓.可用带宽测量算法的改进[J].*通信技术*, 2009, 42(4): 90–92.
- [15] HEI X J, DANNY T, BRAHIM B. Available bandwidth measurement using Poisson probing on the Internet [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Performance, Computing and Communications*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2004: 207–214.