

通信网络性能测试技术研究

杨 松^{1,2} 赵东鹤^{1,2} 席丽霞^{1,2} 张晓光^{1,2}

(¹北京邮电大学信息光子学及光通信国家重点实验室, 北京 100876)
²北京邮电大学信息光子学及光通信研究院, 北京 100876)

摘要 由于实际应用环境中有大量混合流量及产品的处理性能受到很多因素的制约,通信网络性能测试通常能满足实验室要求却无法feel满足实际应用中客户的需求。为了评价网络节点的实际处理能力,建立了性能指标测试模型,并给出了网络节点主要参数(吞吐量、混合包的转发能力、新建连接速率等)的测试评估分析及验证实验。

关键词 光通信;性能检测;性能测试;测试技术

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105006

Study on Performance Test of Communication Network

Yang Song^{1,2} Zhao Donghe^{1,2} Xi Lixia^{1,2} Zhang Xiaoguang^{1,2}

(¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
²Institute of Information Photonics and Optical Communication,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Due to lots of mixed traffic existing in the actual situation and the processing performance of the product limited by many factors, the performance test of communication network can generally meet the laboratory requirements, while fail to meet the actual requirements of customers. In order to evaluate the actual processing capability of the network node, a test model of performance is created. Moreover, analysis and the experimental verification of the test evaluation of the primary parameters, including throughput, mixed packet forwarding capacity, the rate of new connections, etc, of the network node are given.

Key words optical communications; performance monitor; performance testing; testing technology

OCIS codes 060.4250; 060.4510; 220.4840; 060.6719

1 引言

评估通信网络的性能指标测试标准有请求注解(RFC),如 3511 和 RFC2544 等。主要包括:吞吐量、时延、丢包率、新建连接数和并发连接数、拆除连接速率。其中吞吐量、延迟和丢包率是由 RFC2544 中所定义,是属于 2-3 层的测试,测试中所使用的是自定义协议(UDP)的数据类型^[1];而余下其他指标大多由 RFC3511 所定义,是属于 4-7 层的测试,测试中以传输控制协议(TCP)数据类型为主^[2]。

近年通信网络发展迅速,更加开放,OpenFlow 技术^[3]其思想是将计算机领域优点应用到通信网络:1)硬件:简单可用的公共硬件底层(x86 指令集);2)软件:无论是应用程序还是操作系统都可不依赖硬件独立发展创新。基于此类思想指导,OpenFlow 网络将是:底层数据网络(交换机、路由器等)是“哑的、简单的、最小的”,并定义一个对外开放的关于流表的公用应用程序界面(API),控制器是整个通信网络的核心,通过控制器上编程并调用

收稿日期: 2013-09-08; **收到修改稿日期**: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)

作者简介: 杨 松(1975—),男,博士研究生,主要从事网络资源调度分配、光性能检测、通信测试技术等方面的研究。

E-mail: y14681@sina.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn (通信联系人)

底层 API,可灵活实现网络创新演进。对应的通信网络性能测试技术发展也是如此,文献[4]围绕个人电脑(PC)及 Linux 上建立的开放路由器体系,基于 RFC2544,对其性能测试进行了研究。

文献[5]中概述了 RFC2544 的内容,介绍了 4 个性能测试参数,给出工程实施过程中遇到的技术难题解决方案。文献[6]中主要针对电力线载波通信设备,基于 RFC2544 进行测试技术研究。

上述文献的性能测试研究中,都忽略了实际应用环境的各种重要因数(如未考虑大量混合流量条件),而且研究的成果不能进一步直接指导实践。之前的性能测试理论及实验室进行的测试条件都比较单一,但实际通信网络的性能处理受到很多因素的制约,所以常出现测试性能满足实验室要求但实际应用却无法fe满足客户需求的情况。为了能够更准确评估通信网络的性能测试能力,结合实际情况并延续文献[7]对应用层感知网络的测试研究及其他相关文献[8—14],本文优化改进了通信网络的性能指标测试方法,并给出了测试评估分析及方案。

2 测试性能参数分析

2.1 吞吐量

网络吞吐量是指在一定条件下,网络节点某一特定帧长不丢包情况下的最大转发能力,评估单位大多采用 Mb/s,目前采用 SmartFlow 的二分退避算法测试。SmartFlow 测试时提供推荐的缺省帧序列:64,128,256,512,1024,1280,1518。测试网络节点吞吐量时,由于受流数量的限制,网络节点建立的会话数目有限,且会话一旦建立,后续报文只哈希查找会话(这时的哈希几乎没有冲突链)进行转发。因此可以说吞吐量是网络节点最好性能的反映,但无法用于实际应用场景的性能指导。改进创新评估法如下:

1)结合推荐配置确定产品的使用方式。各种网络节点以及所属不同系列产品都有其特定的市场定位,明确了市场定位,也就明确了设备的应用方式以及对应的常见应用配置。后续的测试均可在该指定配置下进行(配置不需要非常精确,但要能够确定常见的使用方式以及影响网络节点的性能配置种类即可)。

2)吞吐量评估单位改进。吞吐量增加每秒发送报文数目评估指标。网络节点每处理一个报文的时钟周期几乎是一定的,网络节点硬件性能平台也是固定的,因此在带宽不受限制的情况下每秒能处理

的报文个数几乎是一定的,采用每秒发送报文数目评估实际性能可以作为性能计算的依据。

3)增加每秒发送报文数目和中央处理器(CPU)指标的对应关系指标。网络节点测试吞吐量时,64 字节小包的每秒发送报文数目性能是网络节点的最高转发能力,当帧长增大时,可能受带宽限制而无法体现 CPU 真正的转发能力。同时,如果存在带宽受限制,CPU 使用率不同,也可通过 CPU 使用率和每秒发送报文数目指标折算成对应帧长最高的每秒发送报文数目性能。

4)增加吞吐量测试的帧序列。增加后序列为:64,128,256,512,768,896,1024,1280,1518,这样可以更细粒度地确定性能变化趋势。

5)增加 TCP 的每秒发送报文数目转发性能测试。RFC 规定吞吐量测试采用 UDP 报文,而网络节点在处理 UDP 和 TCP 报文时存在一些差异,TCP 报文的转发性能略差,因此确定 TCP 的转发性能使得网络的 TCP 处理性能评估有依据可循。

6)确定网络节点转发能力基线。在 CPU 使用率一定的情况下(一般采用 100%或者 80%),确定帧长每秒发送报文数目的变化关系 $F_{udp}(f, p)$, $F_{tcp}(f, p)$,其中 f 表示帧, p 表示每秒发送报文数目(PPS)。如果 $F_{udp}(f, p)$ 和 $F_{tcp}(f, p)$ 是常函数,则可以确定每秒发送报文数目性能为 $F_{udp}(a)$, $F_{tcp}(b)$,当 $F_{udp}(f, p)$, $F_{tcp}(f, p)$ 近似常函数时,可以采用(1)式近似确定转发能力。

$$\begin{cases} F_{udp}(a) = 1/N \sum_{i=1}^N F_{udp}(f_i, p_i), \\ F_{tcp}(b) = 1/N \sum_{i=1}^N F_{tcp}(f_i, p_i). \end{cases} \quad (1)$$

2.2 混合包的转发能力

网络中的流量是各种帧长混合包组成的,混合包的处理能力决定了设备在现网中的转发能力。NLANR(National Laboratory of Applied Network Research)对网络中的包长做调查发现,网络中的包长分布比例可以参考如下数据:64 字节 58.3%,594 字节 33.3%,1518 字节 8.4%。

单协议传输情况下的混合包评估:在测试过程中可以参考该比例用测试仪实际测试,同时采用理论计算结合的方式确定网络节点在各种混合帧长情况下的转发能力。在 2.1 节中描述了 CPU 一定的情况下(一般来说是 100%或者 80%)帧长每秒发送报文数目的关系: $F_{udp}(f, p)$, $F_{tcp}(f, p)$ 。

实际上,可以将每秒发送报文数目和 CPU 的

利用率近似的看成线性关系(可以实际测试验证,当不是线性时,可以确定每秒发送报文数目和 CPU 利用率的关系),即特定帧长的转发能力为

$$F_{\text{udp}}(f, p) * C_{\text{rate}}, F_{\text{tcp}}(f, p) * C_{\text{rate}}. \quad (2)$$

混合流量帧长比例确定且保证不丢包的情况下,可以确定转发各种帧长所占用 CPU 的比率 $C_{\text{frame}(\textit{i})\text{rate}} = R(S)$,其中 S 为混合流中各帧长的报文比率。确定各种帧长的 CPU 占有率之后,可以评估出混合帧长的转发能力:

$$M_{\text{pps}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{udp/tcp}}(f_i, p_i) * C_{\text{frame}(\textit{i})\text{rate}}. \quad (3)$$

设实际测试的处理能力为 A_{pps} ,修正量为 λ ,则 $A_{\text{pps}} = \lambda * M_{\text{pps}}$,从而可以计算出各种混合帧长情况下的每秒发送报文数目的转发能力,进而折算出 Mb/s 流量大小。下面的性能推算是基于 CPU 处理能力一定,单个报文处理占用的 CPU 的 tick 数基本稳定情况下的理论值。一般理论值实际上比真实值要高,因为实际中除了对报文转发的处理,还会有诸如中断信号、系统任务和转发任务的调度切换等占用 CPU 的 tick 数,同时不同的内存块分配速率也会有所不同,这些比例占用在特定的样本选型下,可以近似的趋于稳定。修正量 λ 的引入,目的就是消除上述偏差。它是由理论值计算出来后,抽样进行实际测试,然后校正实际值和理论值之间的偏差。这样就可以通过实验测试数据和修正值来估计现网场景的实际预测性能。

TCP 和 UDP 混合情况下的转发能力评估:有了上面单传输协议转发能力的计算基础,在各计算中增加 TCP 和 UDP 报文的比率关系即可推算出两者混合情况下的转发能力:

$$M_{\text{pps}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{udp}}(f_i, p_i) * C_{\text{udp-frame}(\textit{i})\text{rate}} + \dots + \sum_{i=1}^n F_{\text{tcp}}(f_i, p_i) * C_{\text{tcp-frame}(\textit{i})\text{rate}}, \quad (4)$$

在进行理论计算时,注意关注设备的带宽是否受到限制。对于以单 CPU 处理的网络节点,混合包(TCP/UDP)和单包处理的每秒发送报文数目是相同的,且近似为常量。

2.3 新建连接速率

RFC 规定新建连接数采用 HTTP(Hyper Text Transmission Protocol)1.0 测试,而实际应用中,浏览器均采用 HTTP1.1。在页面选择上,可以采用 1,1 k,16 k,64 kbyte 等测试,1 byte 页面测试在很大程度上反映了网络节点设备不断新建和拆除会话

的最大包处理能力,从目前测试情况来看,新建的速率也是网络节点的性能瓶颈。不同大小的页面选取测试新建后可以确定网络节点在不断新建和拆除会话表情况下的每秒发送报文数目的处理能力

$$F_{\text{tcp-con-rate}}(c, P, p_{\text{tcp}}) * C_{\text{rate}}, \quad (5)$$

(测试新建时大多占用率都为 100%),式中 P 表示页面大小, $P=1$ byte 时的 p_{tcp} 是网络节点在新建条件下的最高每秒发送报文数目的处理能力。通过选取网络中常见的页面大小来测试网络节点的新建速率,从而更加接近现网中的实际新建能力。在这些数据完成的情况下,将不断新建和拆除会话表情况下的处理能力和网络节点的转发能力相比,从而得出性能下降比例。

2.4 并发连接数

并发连接数在一定程度上不是网络节点的性能瓶颈。它主要考察网络节点查找会话表的能力。会话采用哈希算法查找,哈希冲突的多少直接决定了哈希查找的速度。一般来说,实际应用中会话越多,出现哈希冲突的概率也就越大。在测试网络节点时,可以分为会话较少情况下(比如测试新建连接速率可能只需十几万)和会话较多情况下(可以根据新建需要的会话数量决定事先注入剩余数量的会话表来对比测试会话多少对转发的影响,并将其关系进行提炼抽象出模型,例如: $\Delta = a \ln(bx)$, x 为会话数量)。该影响系数只在会话数量较大的情况下考虑,当会话数量本身就很少时,其影响程度可以根据实际情况决定是否忽略。

2.5 其他性能测试时的注意因数

设备配置对网络性能的影响程度。不同的网络节点配置会对网络性能产生影响,常见的影响网络性能的因素有:ASPF(Application Specific Packet Filter)的检测,攻击防范,P2P(Point to Point)检测,NAT(Network Address Translation)转换等(这些配置也可能在最初确定的典型应用配置中已经覆盖,若网络节点不具备此功能,就不用考虑该因子的影响程度)。要了解这些配置命令对网络节点性能的影响程度,必须清楚这些业务在网络中的实现方式以及影响性能的关键操作,比如 NAT 转换每个报文都要进行 IP 地址查找替换,P2P 检测要进行模式匹配和流量检测,攻击防范需要对报文进行识别判断等。确定了影响的关键步骤后,针对这些配置在没有开启和开启的情况下确定其影响因子 Δ_{sum} ,同时根据业务的处理流程分析,这些影响因子是叠加关系还是并行关系,从而确定开启一批开关

之后的性能影响量 Δ_{sum} , 并通过抽样实际测试的方式确定理论值和实际值的偏移量从而确定修正系数 ρ , 更新性能影响量为 $\rho\Delta_{\text{sum}}$, 从而可以评估出在有限配置情况下的性能情况。Flood 类攻击防范是在很大程度上受网络节点每秒发送报文数目的转发性能的影响。因此可以通过设定在一定攻击背景流量情况下测试 2.1~2.4 节中的指标, 从而确定 Flood 类攻击和转发每秒发送报文数目的关系 $F(p_{\text{attack}}, p_{\text{normal}})$, 从而确定不同攻击流量情况下的性能影响因子 Δ_{attack} 。单包类型的攻击防范直接受网络节点处理流程影响单包的 CPU 处理周期, 因此在测试性能时可以根据设备的实际应用来确定是否开启常用的单包攻击开关。

不同应用场景影响设备的评估。每款设备由于定位不同都有其特定的应用场景, 比如小型网关应用在网吧和小型办事处, 中小型网关用于小型企业和网吧等, 中型网关用于中小企业和其他专网等, 安全专用网关用于防攻击等。这些不同的应用决定了需要选择不同的评估指标来衡量, 比如中小型网关需要考虑带机量, 安全专用网关需要考虑防攻击能力和用户同时请求数量等。对于带机量这种类型的指标, 需要通过抓包的方式了解单用户的业务流量、新建连接数和并发数等, 可以在典型的应用场景中抓包分析或者模拟用户上网来分析大概流量情况, 在确定了单机流量的情况下, 带机量问题也就能够迎刃而解了。在确定了设备实际处理业务的能力后, 现网中不同的应用场景可以根据实际情况评估能够覆盖的用户量, 比如: 通过理论计算, XX 中小型网关能够同时带 500~600 台 PC, 那么一个 1000 人的企业是否可以应用该设备。这个问题可以由实际使用者决定并解决, 可以评估 1000 人同时在线的峰值比率, 也可以评估多少人会同时使用出口而消耗设备性能资源, 这样就可以确定是否可以在一个 1000 人的企业中使用。

不同通信网络设备的性能测试差异。每种不同类型的通信设备在指标上都会有所差别, 路由器比较流行的处理能力指标为每秒发送报文数目, 即每秒能够转发的包个数。这和路由器在网络中的角色以及处理方式是息息相关的。路由器在网络中只负责将报文快速转发, 它在收到一个报文后, 通过快速查找路由表确定转发出口, 不管报文的内容, 直接发送出去则处理完毕, 转发吞吐量是路由器性能的重要衡量指标。但另一方面, 路由器在进行安全过滤时, 则是逐包匹配, 这就导致它在安全规则较多的

情况下转发性能较低。防火墙和路由器都是网络设备, 两者除了基本的转发功能相同外, 实际却存在差异。目前的包过滤状态防火墙具备逐包检查的功能, 同时需要对会话进行状态检测, 防火墙会话处理机制和安全检查功能使得其性能相对路由器而言逊色很多。但可以看到的是, 如果防火墙作为路由器使用, 则在不开启安全规则、会话建立完成后只进行报文转发的情况下, 它的性能应该是和路由器相当的。因此在测试防火墙的性能时, 必须和防火墙的应用结合起来, 开启必要的规则去测试其相关的性能指标, 同时针对网络节点特殊的处理机制测试出其性能瓶颈, 并分析该瓶颈和其他性能指标结合、以及在实际应用中的影响程度。

3 性能测试模型推导及分析

3.1 帧长与每秒发送报文数关系

按照 2.5 节分析, 选取部分参数进行建模及分析。先进行吞吐量测试, 此项测试的目的可获得系统在理想情况下可以处理的最多报文数目。通过测试, 得到如表 1 所示数据。

表 1 吞吐量测试数据

Table 1 Test data of throughput

Frame length /byte	PPS /(frame/s)	M_{pps}
64	156400	105.1008
128	161661	191.4063
256	163114	360.1563
512	160619	683.5938
1024	119732	1000
1518	81274	1000

由表 1 可推出不同包长下系统可以处理的最大每秒发送报文数数目, 进而得到帧长和包转发率关系曲线, 如图 1 所示。函数关系为:

$$f_{\text{pps}}(x) = A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3, \quad (6)$$

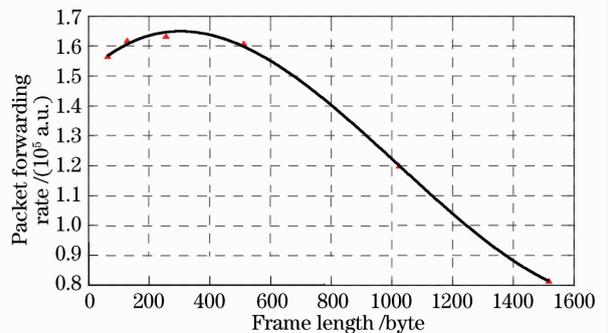


图 1 帧长与包转发率关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between frame length and packet forwarding rate

式中 $A_1 = 1.513 \times 10^5, A_2 = 95.52, A_3 = -0.1849, A_4 = 6.035 \times 10^{-5}$; x 代表报文大小; $f(x)$ 代表网络节点可以处理的最大报文数目, 为正数。理论上可以在任意帧长下得到节点可以处理的最大报文数, 但由于此时的节点配置最简单, 测试条件也宽松, 可得到理想状态下最大报文处理能力:

$$f_{pps}(x) = 1.513 \times 10^5 + 95.52x - 0.1849x^2 + 6.035 \times 10^{-5}x^3. \quad (7)$$

3.2 CPU 利用率与每秒发送报文数目的变化关系

找出网络节点 CPU 资源和每秒发送报文数目的变化规律模型, 并证明模型在各种条件下的合理性。网络节点在处理报文消耗的 CPU 资源有如下特点: 对 CPU 来说, 由于只处理帧头, 所以在不同帧长下, 相同的报文数目消耗的 CPU 资源应该相差不大; CPU 利用率应该和报文数目呈同比增长关系, 即处理的报文数目越多, 系统 CPU 利用率越高。通过实际测试, 不同帧长下, 相同报文数目消耗的 CPU 资源相差不大, 以帧长度为 64 字节和 1518 字节测试样例, 得出如图 2 所示 CPU 利用率与包转发率的变化关系曲线。由图 2 可得函数关系式如下:

$$f_1(x_{64}) = 3.08 + 0.0006633x_{64}, \quad (8)$$

$$f_2(x_{1518}) = 2.26 + 0.0006802x_{1518}. \quad (9)$$

从(8)、(9)式可以看出, 不同帧长下, 相同的报文数目消耗的 CPU 资源相差不大, 在误差允许范围内, CPU 资源和报文数目可以近似认为满足线性函数关系:

$$f_{cpu}(x) = k_1 + k_2x, \quad (10)$$

式中 x 表示报文数目; 结合图 2, 综合得到如图 3 所示系统 CPU 利用率与包转发率变化关系曲线。由图 3 可得到相关曲线函数:

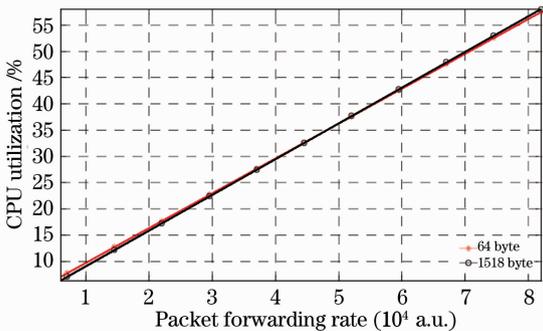


图 2 CPU 利用率与包转发率的变化关系曲线 (64 字节、1518 字节)

Fig. 2 Change curve of CPU utilization and packet forwarding rate (64 byte, 1518 byte)

$$f(x) = 5.472 + 0.0005974x, \quad (11)$$

式中 x 表示每秒发送报文数目, $f(x)$ 表示 CPU 利用率, x 的取值范围为 $[0, 156400]$; 首先当 $x=0$ 时, 即没有报文输入时, $f(x)=5.472$ 。实际测试时, 在没有报文输入, 网络节点墙的 CPU 利用率为 3%~5%, 函数推导值符合实际情况; 其次按照 CPU 利用率最高为 100%, 可以算出节点可以处理的每秒发送报文数目为 158232, 实际测试节点可以处理的报文数目为 156400, 可以算到此时对应的 CPU 利用率为 98.9%, 误差为 $\pm 1\%$, 满足工程误差要求。

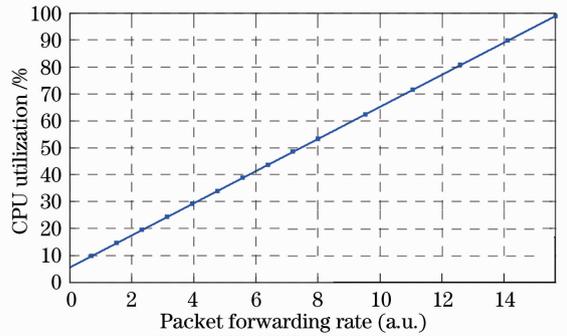


图 3 系统 CPU 利用率与包转发率变化关系曲线

Fig. 3 Change curve of CPU utilization and packet forwarding rate

4 实验验证

验证帧长与每秒发送报文数目变化关系如(7)式所示。通过将此步骤测试出来的每秒发送报文数与直接使用商用测试仪器的性能测试方法测出每秒发送报文数目进行比较即可。只要二者的计算结果在误差范围内, 就可认为验证成功。表 2 为实测数据及模型推导数据, 即不同帧长下每秒发送报文数目的比较。

表 2 实测数据及模型推导数据对比验证

Table 2 Comparison of measured data and model validation derived data

Frame length /byte	Calculation the PPS value by model	Instrument measured out PPS value
64	156671	156400
128	160623	161661
256	164648	163114
512	159835	160619
1024	120031	119732
1518	81331	81274

通过表 2, 运用(2)式计算得出的每秒发送报文数与传统测试方法测试得出的每秒发送报文数目在每个包长下相差都不足 1%, 在工程上属于允许的范围之内。

5 结 论

通过上述分析方法,可以将设备的处理性能理论值评估出来。设备的处理性能受硬件和软件两者的影响,因此,理论上通过硬件平台性能和软件指令的周期是可以计算出网络设备的处理能力;但硬件性能的评估和软件指令周期的计算是一项比较复杂的工程,通过测评结合理论计算的方式进行综合评估,并利用现网使用情况的采样进行结果修正,从而可以在实验室判断出设备在网络中的处理能力范围。

参 考 文 献

- 1 Bradner S, McQuaid J. Benchmarking methodology for network interconnect devices[J]. RFC 2544, 1999.
- 2 Hickman B, Newman D, Tadjudin S, *et al.*. Benchmarking methodology for firewall performance [J]. RFC3511, April, 2003, 16.
- 3 N McKeown, T Anderson, H Balakrishnan, *et al.*. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. Comput Commun Rev, 2008, 38(2): 69–74.
- 4 R Bolla, R Bruschi. RFC2544 performance evaluation and internal measurements for a Linux based open router[C]. High Performance Switching and Routing, IEEE, 2006; 6.
- 5 F Lifu, Y Dongming, T Bihua, *et al.*. Technique for network performance measurement based on RFC 2544 [C]. Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2012 Fourth International Conference on, IEEE, 2012. 200–204.
- 6 Jensen Bente. Experimental studies of the noise recovery ability of in-house power line equipment [C]. Power Line Communications and Its Applications, IEEE, 2008, 19(4): 271–285.
- 7 Yang Song, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, *et al.*. Optical network of content awareness and resource allocation[J]. J Beijing University of

- Posts and Telecommunications, 2013, 36(3): 66–70.
- 杨松,张晓光,席丽霞,等. 内容感知光网络及其资源分配[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(3): 66–70.
- 8 Cai Yanmin, Chen Gang, Dong Zuoren, *et al.*. 155 Mbits/s atmospheric optical communication system and its measurement [J]. Chinese J Lasers, 2000, A27(11): 1040–1044.
- 蔡燕民,陈刚,董作人,等. 155Mbits/s 大气传输光通信系统及其测试[J]. 中国激光, 2000, A27(11): 1040–1044.
- 9 Wang Yong, Yu Lei, Cao Jianian. Performance of optical wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC code [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3295–3298.
- 王勇,于蕾,曹家年. 基于副载波相移键控强度调制和低密度奇偶校验码的光无线通信系统性能[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3295–3298.
- 10 Guo L, Yu H, Li L. Double-link failure protection algorithm for shared sub-path in survivable WDM mesh networks[J]. Chin Opt Lett, 2004, 2(7): 379–382.
- 11 Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li, *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1078–1080.
- 宁提纲,秦曦,裴丽,等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1078–1080.
- 12 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 582–586.
- 李兆玺,胡贵军,孔令杰. 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统性能分析 [J]. 中国激光, 2008, 35(4): 582–586.
- 13 Burton P, Yu Wu, Prybutok V R, *et al.*. Differential effects of the volume and diversity of communication network ties on knowledge workers' performance[J]. Professional Communication, IEEE Transactions on, 2012, 55(3): 239–253.
- 14 Mini S Thomasand, I Ali. Reliable, fast, and deterministic substation communication network architecture and its performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2364–2370.

栏目编辑: 王晓球