

互联网中网络时延与物理距离关联性分析

焦程波^{1,2,3}, 郑辉³, 黄宇³

(1. 信息工程大学信息工程学院 郑州 450002; 2. 北京信息技术研究所 北京 海淀区 100093; 3. 西南电子通信技术研究所 成都 610041)

【摘要】结合网络时延的组成部分,对往返时延与物理距离之间的关联性进行了分析,分析结果显示两者之间存在线性关系。比较不同的往返时延估算方法,以较均匀分布于北美和西欧区域的稳定HTTP服务器作为被测量设备,提出通过分析TCP握手过程获取真实的远距离节点之间的往返时延。最后在真实环境下,统计了不同物理距离下理想的往返时延,结果显示不同区域中往返时延与物理距离之间的线性关系存在较大的差异。

关键词 物理距离; 互联网; 网络测量; 往返时延

中图分类号 TP393.4

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.05.026

Research on the Correlation between Network Delay and Geographic Distance in Internet

JIAO Cheng-bo^{1,2,3}, ZHENG Hui³, and HUANG Yu³

(1. School of Information Engineering, Information Engineering University Zhengzhou 450002;

2. Beijing Information Technology Institute Haidian Beijing 100093;

3. Southwestern Institute of Electronics and Telecommunication Chengdu 610041)

Abstract The correlation between geographic distance and network delay plays an important role in network measurement. The analysis shows that the relation between distance and delay is linear. By comparing different network delay estimation methods, it is concluded that the statistical result of RTT of HTTP servers uniformly distributed in the earth should be calculated by using TCP handshake procedure. Measurement result under real condition reveals the linear relations between graphic distance and round trip delay in different areas show significant differences.

Key words geographic distance; internet; network measurement; round trip time

随着互联网业务的推陈出新,特别是流媒体的大量应用,网络时延成为衡量互联网服务质量(QoS)的重要参数。

互联网终端与路由器等设备的地理位置、路由机制与处理能力等因素决定了设备之间数据的传输和传播速度,同时网络业务的不同分布也将对网络时延造成一定程度的影响。

互联网当前复杂的拓扑结构导致端到端的网络传输距离与实际端到端之间的物理距离之间存在一定程度的偏差^[1],在网络距离难以获取的情况下可以将其转换为网络时延与物理距离之间的关联性,而其之间的关联性挖掘结果是网络距离预测^[2-4]和网络拓扑发现^[5]等领域的关键性技术。

单向时延owd(one way delay)的计算需要在发送方和接收方时钟同步情况下获取数据发送和接收时间^[6],而在当前的互联网环境下缺乏终端时钟的同

步,因此难以完成大规模的owd获取工作。往返时延RTT(round trip time)代表了数据从发送到接收过程的总消耗时间,其受到往返传输过程中网络距离的约束。RTT的获取不存在时钟同步等问题,因此利用互联网中地理位置已知服务器可以完成对不同区域中RTT值的准确获取。基于ping操作的RTT估算方法简单易用,是当前主要的估算方法。但频繁的ping操作将会导致网络安全设备误认为入侵而进行屏蔽,使用性受到限制;同时主动的ping操作将消耗一定程度的网络带宽,造成网络负担。文献[7]提出了通过分析TCP数据流传输过程完成对往返时延RTT的被动式估算,但其面向的TCP数据流需要携带时间戳信息或其传输数据量较大,因此对测量数据要求较高。基于对TCP握手过程的分析,提出利用握手过程完成对RTT的估算。

受到迂回线路、瓶颈链路和网络拥塞等因素的

影响,传统意义上网络时延和物理距离之间的关联性较差^[8-9]。随着近十年互联网基础设施处理能力的显著提升、网络拥塞解决方法的不断改进和传输线路QoS的提高,迂回线路和瓶颈链路现象大为降低,互联网中时延瓶颈从网络接入端转移到路径的中间部分和AS自治域内部^[10]。文献[11-13]提出地理位置相近的网络设备拥有提高相似的网络时延。文献[12]研究了互联网中某些地理区域之内节点之间RTT与物理距离(geographic distance)之间的约束性,但缺乏对跨区域节点之间RTT与物理距离关系的研究。文献[13]比较了北美和西欧地区中节点之间RTT与物理距离之间的近似性。文献[10]指出了传播时延占据了支配延迟的较大比例,且链路长度成为制约网络访问速度的瓶颈。但相关工作中还缺乏对RTT与物理距离之间关系的准确性分析与描述。

基于Internet骨干网络的流量统计结果显示:骨干网络聚合流中约95%的字节总数和约90%的报文总数采用TCP协议进行传输,而UDP协议是仅次于TCP的第二大传输层协议。相对于TCP协议,UDP协议没有任何的网络拥塞控制机制,根据是否处理拥塞反馈信号可以将TCP流和UDP流区分为响应业务流和非响应业务流。随着分布式多媒体应用的普及,越来越多的UDP流将会出现在Internet上,并对Internet的稳定性产生重要的影响。在网络带宽紧张的情况下,非相应业务流将会抢占相应业务流的带宽,影响相应业务流的正常传输^[14-16],导致网络时延特别是往返时延的异常。

基于以上考虑,本文通过分析网络正常运行状况下RTT的物理意义,结合实际测试结果,挖掘不同区域之间RTT与物理距离之间的关联性。

1 RTT与物理距离之间的关系

1.1 单向时延与物理距离之间的关系

互联网中数据包的传输过程由终端接入和多跳转发构成。首先对任意两个节点之间数据包的传输过程进行分析,再进行多跳环境下数据包传输过程的分析。作为数据的主要转发节点,路由器对数据的处理过程主要包括接收、查找路由表项、转发和发送结构步骤。在非拥塞状态下,路由器对数据包的处理时延非常小,而在拥塞状态下,排队时延将呈现随机性,占据了处理时延的较大比例^[14-17]。节点之间数据的处理过程如图1所示。

由图1可以知道,传输过程中第*i*跳的单向时延 owd_i 主要由传输时延 t_i 、传播时延 p_i 和排队时延 q_i 等3

部分构成,且呈现加性关系,即满足:

$$owd_i = t_i + p_i + q_i \quad (1)$$

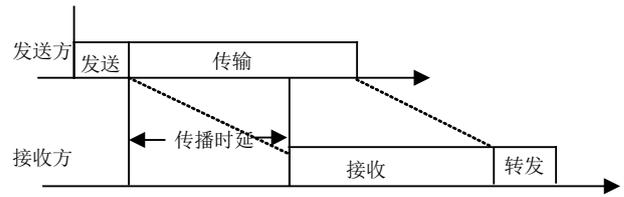


图1 节点之间单向时延组成

t_i 由数据包大小PktSize与信道容量 C_i 所决定,满足关系:

$$t_i = \frac{\text{PktSize}}{C_i} \quad (2)$$

p_i 由链路中信号传播速度 R_i 和节点之间链路距离 D_i^{link} 所决定,满足关系:

$$p_i = R_i D_i^{\text{link}} \quad (3)$$

文献[10]中的研究结果显示,当前传输时延在总延迟中的影响逐渐减小,路径中的支配时延主要由传播时延所决定。

q_i 属于随机噪声,由网络的拥塞情况等因素所决定。

文献[10,18-20]中分别对国内外端到端传输过程中的跳数(hop count, HC)进行了统计,平均跳数均超过了10跳,绝大多数的跳数在10跳以上。因此互联网数据包的实际传输过程中,数据包将经过多跳转发后到达接收方,具体过程如图2所示。

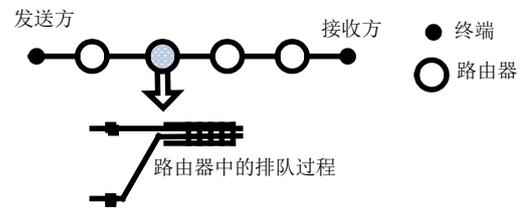


图2 owd组成示意图

由图2可以看出,总时延 owd 由各跳时延 owd_i 累加所得,设传输过程中一共拥有 $N+1$ 个设备,即总共有 N 跳,则有:

$$owd = \sum_{i=1}^N owd_i \quad (4)$$

综合式(1)和式(4),有:

$$owd = \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N q_i \quad (5)$$

总的传输时延 t 表示为:

$$t = \sum_{i=1}^N t_i = \text{PktSize} \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \quad (6)$$

互联网中存在多路由现象,即终端之间存在多条可通信的路径,由式(6)可以发现,在路由确定的

情况下, t 由报文大小和传输路径中各条线路的带宽所决定。互联网中大规模的测量结果显示, 在一定尺度下的时间段内, 路由较为稳定^[21], 因此 t 可以认为是一个稳定变量, 由具体的传输路径所决定^[10]。与 t 相同, 端到端的排队时延 q 由不同转发设备的 q_i 累加所得, 但是因为 q_i 的高度随机性导致 q 的随机性较强, 其为 owd 中的随机噪声。

总的传播时延 p 表示为:

$$p = \sum_{i=1}^N R_i D_i^{\text{link}} \quad (7)$$

随着互联网拓扑的扩展, 节点之间的互通性逐渐增强, 同时结合网络拓扑分布^[6,11-12], 网络中任意两个节点之间的链路距离 D_i^{link} 与其地球球面距离 D_i 之间满足线性关系, 即可以表示如下:

$$D_i^{\text{link}} = D_i + \gamma_i \quad (8)$$

式中, γ_i 代表链路距离与物理距离之差, 即链路距离相对于物理距离的失真 (geographic distance distortion)。

综合式(5)~式(8), 可以得到:

$$owd = \text{PktSize} \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} + \sum_{i=1}^N R_i D_i + \sum_{i=1}^N R_i \gamma_i + \sum_{i=1}^N q_i \quad (9)$$

由以上分析可知, 在传输路径确定的情况下, owd 与物理距离 D_i 之间呈现线性关系。其中 $\text{PktSize} \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} + \sum_{i=1}^N R_i \gamma_i$ 为固定值, 而 $\sum_{i=1}^N q_i$ 属于动态随机噪声。

进一步对式(9)进行简化。当前边界网络QoS有了较为显著的提高^[17], 且支配时延主要出现在路径的中间部分和AS自治域内部^[10]。因此传输过程中第1跳和最后1跳传播时延在总的传播时延中所占比例非常小, 有:

$$\sum_{i=1}^N R_i D_i \approx \sum_{i=2}^{N-1} R_i D_i \quad (10)$$

由骨干光纤的拓扑可以知道, 远距离路由器之间的网络路径距离与实际物理距离偏差不大^[1,9], 即 $\exists i, \frac{\gamma_i}{D_i} \ll 5\%$ 。令 R_{avg} 代表平均传播速度, 则综合式

(9)和式(10), 有:

$$owd = R_{\text{avg}} D + \text{PktSize} \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} + \sum_{i=1}^N q_i + \sum_{i=1}^N R_i \gamma_i \quad (11)$$

式中, D 代表传输路径中前后两个路由器之间物理距离之和, 表示为:

$$D = \sum_{i=2}^{N-1} D_i \quad (12)$$

由式(11)可知, 非拥塞的理想环境下 owd 与 D 之间的斜率即为平均传播速度。

单向时延的计算需要在传输数据发送和接收方时钟同步的情况下获取数据发送和接收的准确时间, 即需要保证测量设备与被测量设备之间的合作, 当前存在较大的难度。根据定义, 往返时延RTT代表数据接收和发送的时间差, 因此如果测量设备在接收到数据后立即对接收数据做出响应, 那么RTT主要由发送和接收两方面的单向时延 owd_s 构成。

1.2 往返时延与物理距离之间的关系

随着负载均衡等QoS技术的使用, 服务器处理延迟大幅度降低, 在RTT测量结果中所占比例非常小^[7,17]。因此在较理想的实际运行过程中, 可以忽略服务器处理时间, 即往返时延RTT由发送单向时延 owd_s 和接收单向时延 owd_r 构成, 即:

$$\text{RTT} = owd_s + owd_r \quad (13)$$

由式(11)和式(13)可知, RTT与 D 之间存在线性关系, 即:

$$\text{RTT} = \alpha_{\text{RTT}} D + \beta_{\text{RTT}} \quad (14)$$

设 (D_i, RTT_i) , 为测量集合 M 中第 i 个测量点的物理距离和往返时延, $i \in [1, N]$, 则必然存在 (ξ, θ) 满足如下关系:

$$\begin{cases} \text{RTT}_i \geq \xi D_i + \theta \\ \min\{\sum_{i=1}^N (\text{RTT}_i - \xi D_i - \theta)\} \end{cases} \quad (15)$$

(ξ, θ) 为线性规划意义下的线性拟合结果^[22], 代表理想情况下 D 与 RTT 之间的关系。在物理距离确定的情况下, 理想RTT与真实RTT之间差值 S 为:

$$S = \text{RTT}_i - \xi D_i - \theta \quad (16)$$

2 RTT估算方法

2.1 基于handshake过程的RTT估算方法

ping操作是计算RTT的常用方法, 但频繁的ping操作会被当前许多网络安全设备误认为网络入侵操作, 同时ping操作在某些转发和终端设备中被禁, 因此通过ping操作较频繁的获取RTT值在当前的互联网环境下并不可行。TCP协议中的三次握手过程(three handshake)与ping操作具有较强的相似性, 在负载较轻的情况下服务器接收到连接建立请求报文后会立即返回报文给客户端。在全球广泛分布了各种商用和科研服务器, 可以自由对其进行访问。在handshake过程之中, 所传输的数据包小(普遍小于80 bit), 当前终端的介入带宽普遍大于100 Kbps, 因此终端的传输时延对RTT影响很小。同时, 因为数据

包没有携带有效载荷,所以服务器在接收到之后响应速度快。基于以上两点,可以通过利用TCP访问初始阶段的三次握手过程得到较为理想情况下的RTT估算结果。

客户端与服务器的握手时间handshake_time由SYN包的发送时间 S_i 和SYN ACK包的捕获时间 R_i 所决定,即:

$$\text{handshake_time} = R_i - S_i \quad (17)$$

对于当前的服务器系统而言,在负载较低的时候,设备接收到报文后立即发送数据,因此握手时间handshake_time与RTT近似,可以认为:

$$\text{RTT} = \text{handshake_time} \quad (18)$$

在获得了RTT估算值序列后,采用如下方法计算RTT估算最小值:

$$E(\text{RTT}) = \min\{\text{RTT}_1, \text{RTT}_2, \dots, \text{RTT}_n\} \quad (19)$$

由其物理意义可知,在路径没有改变的情况下,最小RTT值与真实RTT值最为接近,具有代表性。实际的测试中,首先通过估算RTT估算值序列的稳定情况,在RTT估算值较为稳定的情况下用最小RTT值代表真实RTT值。综合以上内容,基于handshake过程的RTT估算方法主要由以下3个步骤组成:

1) 测量点以固定间隔时间 Δt 访问服务器,同时记录SYN包的发送时间 S_i 和对应SYN ACK包的捕获时间 R_i ,构建发送/捕获时间序列 $\{(S_i, R_i), 1 \leq i \leq N\}$,其中 N 代表访问次数。 S_i 和 S_{i+1} 之间满足关系 $S_{i+1} - S_i = \Delta t$;

2) 在式(18)的指导下,结合发送/捕获时间序列 $\{(S_i, R_i), 1 \leq i \leq N\}$ 完成对RTT的估算,得到RTT时间序列 $\{(S_i, \text{RTT}_i), 1 \leq i \leq N\}$;

3) 在式(19)的指导下,结合RTT时间序列完成对最小RTT值的计算,其代表当前时间段($S_N - S_1$)内的最小RTT值。

实际运行过程中, Δt 和 N 可以根据具体情况进行设置,本文中设置 $N = 10$, $\Delta t = 1 \text{ s}$ 。

2.2 RTT估算方法比较

选择分布于全球不同区域的稳定服务器,分别用ping和handshake方法在不同时间段(分为繁忙时间段和空闲时间段)得到RTT估算值,并进行比较,结果如表1和表2所示。

表1 繁忙时间段内ping与handshake方法的比较

百分比阈值 / (%)	差距阈值之内的比例 / (%)	差距阈值之外的比例 / (%)
1	51.1	48.9
2	78.7	21.3
5	91.4	8.6
10	96.0	4.0

表2 空闲时间段内ping与handshake方法的比较

百分比阈值 / (%)	差距阈值之内的比例 / (%)	差距阈值之外的比例 / (%)
1	69.1	30.9
2	86.8	13.2
5	93.1	6.9
10	95.6	4.4

通过分析表1和表2,可以知道两种方法获取的RTT值较为吻合,在两个时间段内RTT估算结果偏差小于10%的比例在5%范围内,因此handshake方法估算的RTT值与真实RTT值相差很小,可以代表真实的RTT值。在实际的测试中,部分RTT值明显超过了正常RTT的范围(正常的RTT值应该在1 s范围内变化),因此需要将此种情况下的RTT值进行去除。在下面的测试中,选取了分布于全球不同区域的稳定服务器作为被测量点,完成了测量点与被测量点之间稳定RTT的估算与统计工作。

3 实验结果

实际测试过程中,以位于我国境内的一台高精度测量设备作为测量点,将位于北美和西欧地区的稳定HTTP服务器作为被测量点进行了RTT结果的统计。为了保证结果的准确性,在选择被测量点的时候,应尽可能选择该区域中地理位置均匀分布的服务器。实际测量过程中,选取了分布广泛且位于不同区域中的大学HTTP服务器作为被动测量点。

在确定了被测量点集合之后,使用基于handshake过程的RTT估算方法通过自动访问HTTP服务器,获取了测量点与被测量点之间理想情况下的RTT值,同时结合被测量点和测量点之间的经、纬度坐标,计算两者之间的球面物理距离,最终获得不同区域中RTT和物理距离之间的对应关系 $\{(\text{RTT}_i, D_i), 1 \leq i \leq M\}$,其中 M 代表被测量点个数。采用式(15)中线性规划的方法拟合了北美和西欧区域中RTT和 D_i 之间的线性关系,结果分别如图3和图4所示。

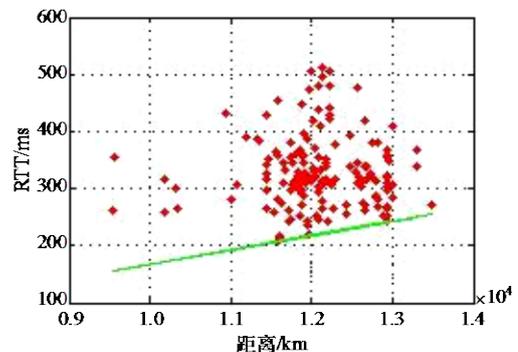


图3 北美地区RTT与物理距离之间的关系

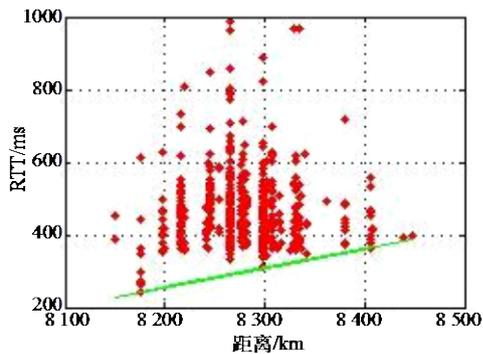


图4 西欧地区RTT与物理距离之间的关系

由图3和图4中的结果显示, RTT主要集中于某一范围之内, 该结果与文献[10]中的测试结果相吻合。由式(15)可知, 拟合斜率 ξ 反映了不同区域之间数据在互联网理想环境下的平均传播速度, 对于同一个区域中的不同被测量点, 其与测量点之间的物理距离越大, 则RTT最小值越大, 即RTT与物理距离成正比。

比较图3和图4之间的拟合斜率 ξ 可发现, 不同区域之间数据的理想传播速度存在较大的差异, 即测量点到北美区域中被测量点的平均传播速度(约为57 000 km/s)远远高于到西欧区域中被测量点的平均传播速度(约为21 000 km/s)。该结果说明, 对于不同区域中的被测量点, 即使其与测量点之间的物理距离相同, 但因为受到网络连通性、数据转发设备处理能力和传输线路等情况的影响, 其与测量点之间的RTT存在较大差异。

进一步由图3和图4知道, 对于位于相同区域的任意两个被测量点, 即使其与测量点的物理距离相差不大, 但其与测量点的RTT可能存在较大的差别。

综合以上两点可知, 互联网中服务器特别是流媒体服务器的部署过程中, 需要同时考虑区域之间的平均传播速度和边界网络服务质量对网络时延的影响。

4 总结与展望

本文结合网络传输时延的物理意义对网络时延与物理距离之间的关系进行了分析, 比较了不同的RTT估算方法, 结合实际情况提出选取分布于不同区域的稳定服务器作为被测量点, 使用基于handshake的RTT估算算法完成对不同物理距节点之间RTT的统计和平均速度计算。

在下一步工作中, 通过构建更加完备和高效的实验框架, 进一步完成对不同区域中网络时延与物理距离之间关系的挖掘, 同时将研究结果应用到包

括网络距离预测在内的其他研究中。

参考文献

- [1] SUBRAMANIAN L, PADMANABHAN V N, KATZ R. Geographic properties of Internet routing[C]//The USENIX 2002. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- [2] 王意洁, 李小勇. 网络距离预测技术研究[J]. 软件学报, 2009, 20(6): 1574-1590.
WANG Yi-jie, LI Xiao-yong. Network distance predication technology research[J]. Journal of Software, 2009, 20(6): 1574-1590.
- [3] ZIVIANI A, FDIDA S, REZENDE J F. Toward a measurement-based geographic location service[C]//The 2004 Passive and Active Measurement Workshop. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [4] 邢长友, 陈鸣. 网络距离预测技术[J]. 软件学报, 2009, 20(9): 2470-2482.
XING Chang-you, CHENG Ming. Techniques of network distance prediction[J]. Journal of Software, 2009, 20(9): 2470-2482.
- [5] BRIAN E, PAUL B, ROBERT N. Learning network structure from passive measurements[C]//The 2007 Internet Measurement Conference. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- [6] Geobytes. GeoNetMap[EB/OL]. [2010-12-18]. <http://www.geobytes.com/GeoNetMap.htm>.
- [7] BRYAN V, KANG L, DAVID L. New methods for passive estimation of TCP round-trip times[C]//The 2005 passive measure conference (PAM). [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [8] BALLINTJN G, STEEN M, TANENBAUM S. Characterizing internet performance to support wide-area application development[J]. Operating Systems Review, 2000, 34(4): 41-47.
- [9] PADMANABHAN V, SUBRAMANIAN L. An investigation of geographic mapping techniques for Internet hosts[C]//The ACM SIGCOMM 2001. [S.l.]: ACM, 2001.
- [10] 李超, 赵海, 张昕, 等. Internet中支配延迟的特征行为研究[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1063-1067.
LI Chao, ZHAO Hai, Zhang Xin et al. Research on the characteristic behavior of Internet dominant delay[J]. Chinese journal of electronics, 2008, 36(6): 1063-1067.
- [11] CAIDA. NetGeo[EB/OL]. [2010-12-18]. <http://www.caida.org/tools/utilities/netgeo>.
- [12] BAMBA G, ARTUR Z. Constraint-based geolocation of Internet hosts[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(6): 1219-1232.
- [13] ARTUR Z, SERGE F, JOSE F, et al. Similarity models for Internet host location[C]//The 11th IEEE International Conference on networks. [S.l.]: IEEE, 2003.
- [14] 焦程波. 核心路由器队列管理算法公平性研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2007.
JIAO Cheng-bo. Research on the fairness of core router queue management algorithm[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007.
- [15] RONG P, LEE B, BALAJI P, et al. Approximate fairness through differential dropping[J]. ACM Computer Communication Review, 2003, 33(2): 23-39.

- [16] GAO Xiao-jie, SCHULMAN L. Feedback control for router congestion resolution[C]//Proceedings of PODC 2005. Las Vegas, USA: [s.n.], 2005.
- [17] 徐恪, 吴建平, 徐明伟. 高等计算机网络——体系结构、协议机制、算法设计与路由器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- XU Ke, WU Jian-pin, XU Ming-wei. Advanced computer network——architecture, protocol mechanism, algorithm design and router technology[M]. Beijing: China machine press, 2009.
- [18] CAIDA. Skitter[EB/OL]. [2010-12-18]. <http://www.caida.org/tools/measurement/skitter/RSSAC>.
- [19] BEGTASEVOC F, VAN M P. Measurement of the hop count in Internet[C]//Proc of Passive and Active Measurement. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [20] 马建国, 席明贤, 林益民, 等. 中国Internet路由级跳数测量与分析[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(7): 2112-2114.
- MA Jian-guo, XI Ming-xian, LIN Yi-min et al. Chinese Internet router-level hop count measurement and analysis[J]. Application research of computers, 2008, 25(7): 2112-2114.
- [21] PAXSON V. End-to-end routing behavior in the Internet[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006. 36(5): 593-602.
- [22] MOON S, SKELLY P, TOWSLEY D. Estimation and removal of clock skew for network delay measurements [C]//IEEE Infocom. [S.l.]: IEEE, 1999.

编辑 税红

(上接第701页)

- [3] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [4] GHASEMI A, SOUSA E S. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing[J]. Journal of Communications(JCM), 2007, 2(2): 71-82.
- [5] MA J, ZHAO G, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4502-4507.
- [6] WANG W, LI H, SUN Y L, et al. Securing collaborative spectrum sensing against untrustworthy secondary users in cognitive radio networks[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, ID 695750: 1-15.
- [7] DIGHAM F F, ALOUINI M, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[C]//IEEE International Conference on Communications. Alaska, USA: IEEE, 2003: 3575-3579.
- [8] SHEN B, ULLAH S, KWAK K. Deflection coefficient maximization criterion based optimal cooperative spectrum sensing[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2010, 64(9): 819-827.
- [9] SHEN B, KWAK K S. Soft combination schemes for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. ETRI Journal, 2009, 31(3): 263-270.
- [10] QUAN Z, CUI S, SAYED A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 28-40.
- [11] MA J, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2007: 3139-3143.
- [12] KYPEROUNTAS S, CORREAL N, SHI Q, et al. Performance analysis of cooperative spectrum sensing in suzuki fading channels[C]//2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom. Orlando, USA: IEEE, 2007: 428-432.

编辑 张俊