

文章编号:1001-9081(2010)02-0319-04

自适应网络往返时延采样方法

胡治国^{1,2}, 张大陆¹, 侯翠平¹, 张俊生¹

(1. 同济大学 计算机科学与技术系, 上海 201804; 2. 中国人民解放军 65583 部队, 辽宁 辽阳 111000)

(huliang393@yahoo.com.cn)

摘要:在讨论周期性数据采样算法弊端的基础上,提出自适应往返时延(RTT)的采样算法。该算法以时延变化率作为动态控制采样频率的主要依据,根据网络时延变化的缓急自动调整采样时间间隔。通过实验分析证明,该算法实现简单,可有效地跟踪网络 RTT 变化情况,从总体上减少采样工作量,减轻因网络测量而给网络带来的额外负载。

关键词:自适应采样算法;延迟变化率;预测;网络测量

中图分类号: TP393.06 **文献标志码:** A

Adaptive sampling algorithm of network round-trip time

HU Zhi-guo^{1,2}, ZHANG Da-lu¹, HOU Cui-ping¹, ZHANG Jun-sheng¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. 65583 Troops, The Chinese People's Liberation Army, Liaoyang Liaoning 111000, China)

Abstract: Round-Trip Time (RTT) is an important performance metric of IP network which reflects network path's workload characteristics. To overcome the ignorance of network performance variation characteristics of the equal-interval sampling algorithm, the paper presented an adaptive algorithm based on estimation method, which determined sampling time by the degree of delay variation. The verification shows that the method not only effectively tracks delay change but also reduces sampling time very well.

Key words: adaptive sampling algorithm; delay variation rate; prediction; network measurement

0 引言

对于 IP 网络,存在多种性能评价指标:网络时延、丢包率、时延抖动、瓶颈带宽和吞吐量等。在这些性能指标中,网络时延变化情况常作为时延抖动^[1]、分组丢失率^[2]、可用带宽^[3-4]等性能指标测量的重要参考。在网络性能评价的研究中,用往返时延(Round-Trip Time, RTT)与带宽乘积,即 Capacity = round-trip time × bandwidth(也称为通道容量),作为 TCP 接收方窗口大小选定和性能评价的重要度量指标,它表明在信道充分利用的情况下,在信道中传输但没有被确认的数据量^[5]。在网络拥塞控制的研究中,也常根据网络 RTT 的上升与下降变化情况判断当前网络状态^[6]。因其重要性,ITU-T 针对不同多媒体应用给出了网络时延的参考阈值^[7],IETF 组织的 IP 网络性能指标工作组(IP Performance Metrics Working Group)依据网络时延特性,对往返时延(RTT)进行了标准化定义^[8]。

由于互联网的动态特性,对其性能指标的测量通常是遵循统计学原理采样获得,即测量方法实际是个统计采样过程,首先进行单次测量(采样)获得指标的样本值,多次测量之后得到指标的样本空间,最后对样本空间做统计运算,得到性能指标的测量统计量如平均值等。通常在网络管理中是预先设定固定采样间隔,周期性地发起测量。这种方法虽然简单,但是忽略了被测数据本身的变化特性,如被测的性能指标呈现周期性变化,那么固定周期的采样方法只能观察到性能指标变化的部分特征,即只能测到一个相位^[9],这样可能会出现

采样结果较大程度偏离实际网络性能状况的情况;而当被测指标的固有周期与采样周期之间成倍数关系时,重复周期性的采样带来的扰动很可能干扰被测量对象,会使网络进入同步状态^[10],虽然一次测量影响不至于引起很大误差,但是周期性测量行为会加强这种影响,最终会产生大的误差而引起测量失真^[11]。

基于以上考虑,本文对 RTT 的变化规律进行了分析,提出了基于时延变化率的自适应 RTT 的采集算法。该算法根据测量数据的变化情况自动地调节测量算法的采样时间间隔,既跟踪了网络时延值平稳或剧烈变化的细节,又减少了采样次数,减轻了网络测量带来的额外负载。

1 数据特征分析

使用 Ping 命令连续采集六天同一时间段从同济大学网络与 Web 服务实验室到 www.google.com 的往返时延 RTT 值和分组丢失变化情况(采样间隔 1 s)。图 1 是其中一次采样得到的数据,可以看到 RTT 值随采样时间的改变呈现不同变化特征。在实验中发现对分组丢失的测量与指定的测量超时间间隔存在较大关系,测量中设定超时间间隔为一秒,总的丢包率呈现随机性且仅为万分之四。

从图 1 中可以看到在 [0, 291] 时间区间内,数据变化平缓,RTT 值较小,而在 [292, 644] 时间区间内数值明显增大且变化剧烈;如采用等间隔采样周期(采样间隔 10 s),采样点分别在时间 270、280、290、300、310 处,采样点间用直线段拟合原曲线(如图 2 所示),则显然在 [270, 292] 时间区间内

收稿日期:2009-08-05。

作者简介:胡治国(1977-),男,山西灵石人,博士研究生,主要研究方向:网络性能评估; 张大陆(1949-),男,山东莱阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络、P2P 技术、语义 Web; 侯翠平(1985-),女,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向:网络管理; 张俊生(1984-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:网络性能测量。

原始曲线与拟合曲线之间数值相差较小,即使增大其采样周期,对测量精度的影响也不大,则可以保持原有采样周期或延长采样周期;而[293,330]内原始曲线变化比较显著,如再采取采样间隔 10 s 的方法,已不能反映 RTT 值变化情况,测量偏差变大,则应减小采样周期。

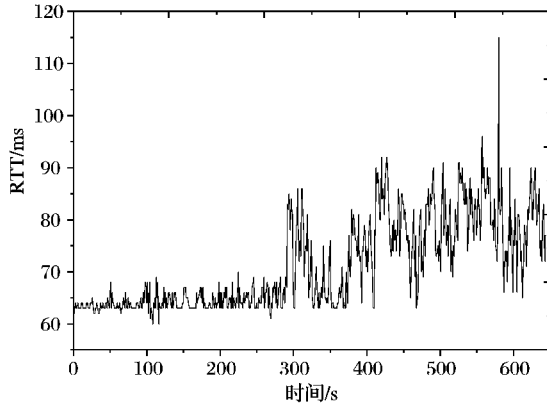


图1 RTT 随时间变化

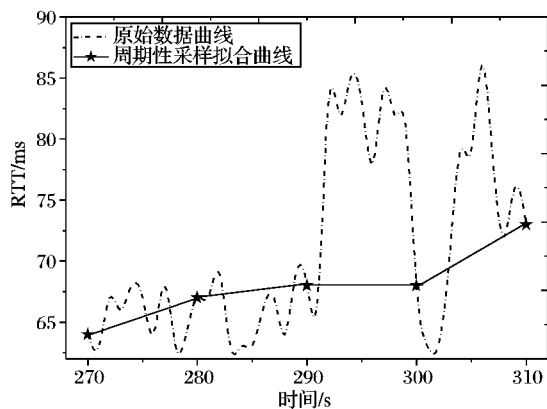


图2 RTT 变化与采样失真之间的关系

RTT 值由确定时间和可变时间两部分组成,确定时间指数据包在网络节点中的传输时延 (transmission delay) 和在数据链路中的传播时延 (propagation delay)。这是数据包经过网络所需的最短时间,是固定不变的;可变时间是指数据包在网络节点中的排队时延及其他处理时延,主要是受到处理速度、缓冲区大小、路由算法等配置的影响。网络时延看似随机,但其背后却有一定的规律,在网络正常运行的情况下,因特网是采用动态路由机制来传输数据业务的,但这种动态并不等于随机路由,只有当网络情况发生严重变化时,例如路由失效、严重拥塞等情况下,转发数据报的路由路径才会改变^[12]。因此,各数据报的网络时延总是分布在一定的范围内,看似随机的网络时延背后有着一定的规律可循,这就使分析和预测网络时延的变化规律成为可能。

2 自适应测量算法描述

以时延变化率近似替换、时间序列预测方法^[13]、Jacobson 算法^[14] 分别作为 RTT 变化预测算法的理论依据,最终根据预测结果来控制下一次 RTT 采样时间。

2.1 变量定义

$D_{t_1}, D_{t_2}, \dots, D_{t_n}$: 在时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 采样测得的 RTT 值, 单位 ms;

$\partial_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{t_i} - \theta_n|$, $\theta_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{t_i}$: ∂_n 表示延迟样本与其均值的分散程度,单位 ms;

$X_{t_i} = \frac{|D_{t_i} - D_{t_{i-1}}|}{t_i - t_{i-1}}$: X_{t_i} 代表 t_i, t_{i-1} 间的延迟变化率;

$\pi_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{t_i} - \sigma_n|$, $\sigma_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{t_i}$: π_n 表示延迟变化率分散程度。

2.2 简单自适应采样算法

1) 把本次测量的延迟变化率 X_{t_n} 作为下次测量的延迟变化率的近似值 $X_{t_{n+1}}$, 即可认为:

$$X_{t_{n+1}} = X_{t_n} \quad (1)$$

2) 用 ∂n 来近似表示 $|D_{t_{n+1}} - D_{t_n}|$, 即可认为:

$$|D_{t_{n+1}} - D_{t_n}| = \partial n \quad (2)$$

3) 因为 ∂n 是随着时间和测量值而不断变化的,能实时跟踪网络变化情况,故能得到 $|t_{n+1} - t_n|$ 的一个简单计算值,即可认为:

$$t_{n+1} = \partial n / X_{t_n} + t_n \quad (3)$$

2.3 基于 AR 模型的自适应

时间序列分析是一种描述动态数据统计特性的理论和方法,其突出特点是从有限的样本数据中拟合具有一定精度的时间序列模型。目前所采用的大多数时间序列分析模型主要是线性模型,其中最为常用的有自回归 AR 模型、滑动平均 MA 模型和自回归滑动 ARMA 模型。理论上 MA 模型并不适合于网络时延这种高的随机过程的预测。同时因为 AR 模型在参数估计时计算量比 ARMA 模型小,这对有实时性要求的时延预测来说是非常重要的;其次,即便真实模型是 ARMA 或者 MA 模型,也可以用高阶 AR 模型来逼近。因此本文选用 AR 模型作为预测算法之一,具体算法为:

1) 原始序列的零均值化^[13]。

随机数据运用 AR 模型进行分析必须满足平稳时间序列假设,可将原始序列进行零均值化处理,设 μ 为原始延迟变化率序列 X_t 的平均值,零均值化 $\{X_t\}$ 得到数列 $\{y_t\}$:

$$y_t = X_t - \mu \quad (4)$$

则 $\{y_t\}$ 为近似平稳时间序列。

2) 确定模型阶数 p 。

AR 模型的数学表达式^[13]为:

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + a_t \quad (5)$$

式中: p 为 AR 模型的阶数; $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 为模型的系数,也为待估参数; a_t 为白噪声。

采用从低阶到高阶逐个拟合的方式确定模型的阶,即从 $p = 1$ 开始逐个寻找能够使序列预测曲线与实际曲线拟合较好的阶数。具体为利用 Yule-Walker 方程组 $\Phi = P_p^{-1} \rho$, 式中: Φ 为系数向量; ρ 为自相关向量; P_p 为自相关矩阵^[13]。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix}, \rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix}, P_p = \begin{bmatrix} 1 & P_1 & \dots & P_{p-1} \\ P_1 & 1 & \dots & P_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{p-1} & P_{p-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对 φ_i 进行估值,然后求出序列 $\{y_t\}$ 的近似预测曲线,并从中选择一个拟合较好的模型。

3) 对于选定的阶数 p , 用最小二乘法求解 $\varphi_i (i = 1, 2, 3, \dots, p)$ 。

4) 利用确定的模型求出预测 $Y_{t_{n+1}}$ 。

$$X_{t_{n+1}} = Y_{t_{n+1}} + \mu$$

5) 根据 $X_{t_{n+1}} = (D_{t_{n+1}} - D_{t_n}) / (t_{n+1} - t_n)$, 而得到从本次到下次采样间隔。

2.4 基于 Jacobson 算法的自适应采样算法

在 RFC793^[15] 中是通过 RTT 估计值乘以一个常数因子来消除 RTT 可能出现突变影响:

$$RTO(k+1) = \beta \times srtt(k+1) \quad (7)$$

其中, β 通常取 2, 在稳定环境中 RTT 的方差很小, 而在一个不稳定的环境中, β 取 2 可能不足以防止不必要的重传。更有效的办法是估计 RTT 的变化, 并记入 RTO 的计算, 可以考虑计算 RTT 的标准差, 但要涉及平方和平方根运算。为了避免这一点, 可以用如下简单的平均方法来估计标准差:

$$aerr(k+1) = rtt(k+1) - artt(k) \quad (8)$$

$$adev(k+1) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} |aerr(i)| \quad (9)$$

其中, $artt(k)$ 是简单平均, 而 $aerr(k)$ 是时刻 k 的采样平均偏差。Jacobson 建议用与 $srtt$ 估计中完全相同的指数加权平滑平均技术来计算 RTT 的平均偏差, 并提出了一套完整算法^[14]:

$$\begin{cases} srtt(k+1) = (1-g) \times srtt(k) + g \times rtt(k+1) \\ srtt(k+1) = rtt(k+1) - srtt(k) \\ sdev(k+1) = (1-h) \times sdev(k) + h \times |serr(k+1)| \\ RTO(k+1) = srtt(k+1) + f \times sdev(k+1) \end{cases} \quad (10)$$

与 RFC793 的定义一样, $srtt$ 是 RTT 的指数加权滑动平均值, 其中 $1-g$ 等效于 α , 但这里不用常数乘以 $srtt$, 而是采用估计的平均偏差的倍数加到 $srtt$ 上来形成重发定时器。基于实验, Jacobson 提出对各常数使用下列数值: $g = 1/8$; $h = 1/4$; $f = 2$ 。在进行深入研究之后, Jacobson 又建议将 f 的值改为 4。这个值是目前 TCP 实现中所有的标准值。

参照 Jacobson 的算式, 也将延迟变化率分为两部分考虑: 延迟变化率部分预测和延迟变化率的分散程度的加权预测。

第 1 步 计算如下:

$$\begin{cases} X_{t_{n+1}} = \alpha X_{t_n} + (1-\alpha) X_{t_{n-1}}; \alpha = 1/8 \\ Y_{t_{n+1}} = \beta \pi_n + (1-\beta) \pi_{n-1}; \beta = 3/4 \\ X_{t_{n+1}} \equiv X_{t_{n+1}} + 4Y_{t_{n+1}} \end{cases} \quad (11)$$

第 2 步 根据上述三个等式得出下一次测量的延迟变化率 $X_{t_{n+1}}$, 同样取 $D_{t_{n+1}} - D_{t_n}$ 为 ∂n , 根据:

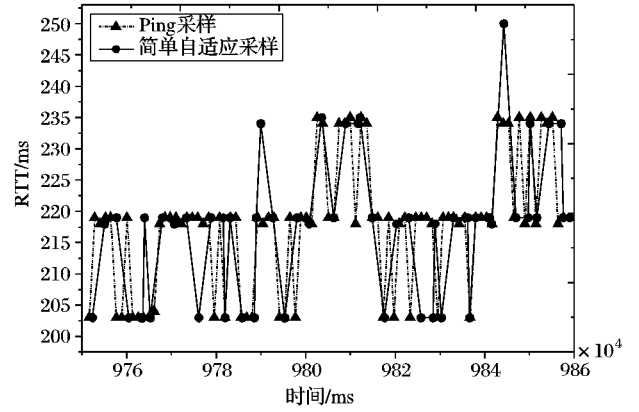
$$X_{t_{n+1}} = (D_{t_{n+1}} - D_{t_n}) / (t_{n+1} - t_n) \quad (12)$$

可计算出 $\Delta t = t_{n+1} - t_n = \partial n / X_{t_{n+1}}$, 从而得到下一次轮询采样时间 t_{n+1} 。

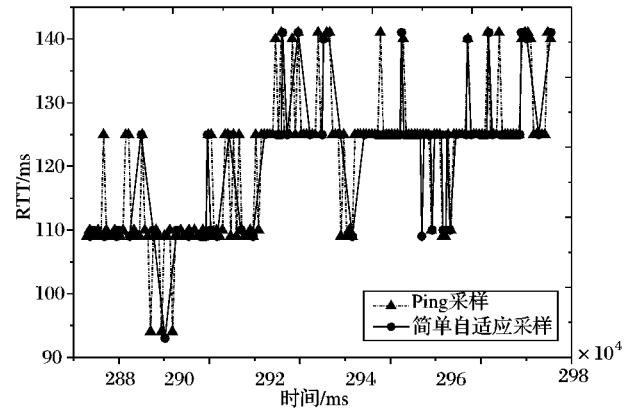
3 实验与结果分析

为了检验算法的正确性, 通过同时运行以上算法及 Ping 算法测量从同济大学网络与 Web 服务实验室到 www.google.com 的 RTT 数值, 从中分析自适应测量算法性能及对延迟变化的跟踪情况, 周期采样 Ping 命令采用时间间隔分别为 1000 ms (实验一) 和 500 ms (实验二), 实验过程中使用 GetTickCount 函数获得所需参考时间信息。实验结果如图 3~5。

从获得的实验数据可知, 与周期性采样 Ping 算法相比, 以上 3 个算法都明显地减少了测量次数 (见表 1), 也都较好地跟踪到了网络 RTT 变化情况。实验一中, 简单自适应采样方法在时间 9789980 和 9844300 处测量到了 Ping 命令和其他两种算法都没有测量到的 RTT 值突变情况 (图 3a); 而基于 AR 模型的采样方法虽然所需采样次数与基于 Jacobson 思想的采样算法基本一致, 但对 RTT 值突变情况反映不敏感, 如在实验二中对时间 2937810 和 2964060 之间的多处 RTT 值突变情况没有反映 (图 4b)。

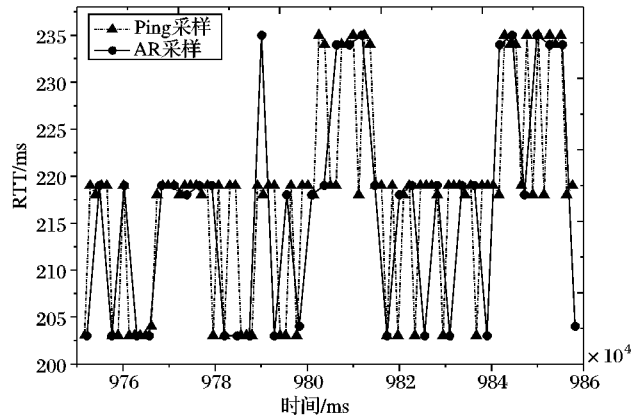


(a) 初始采样间隔1000ms

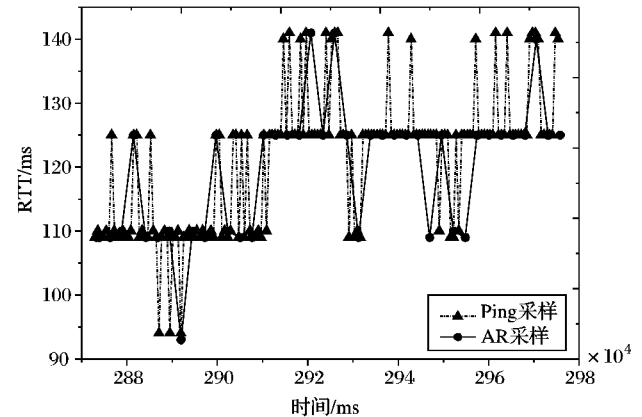


(b) 初始采样间隔500ms

图3 简单自适应算法与 Ping 的比较



(a) 初始采样间隔1000ms

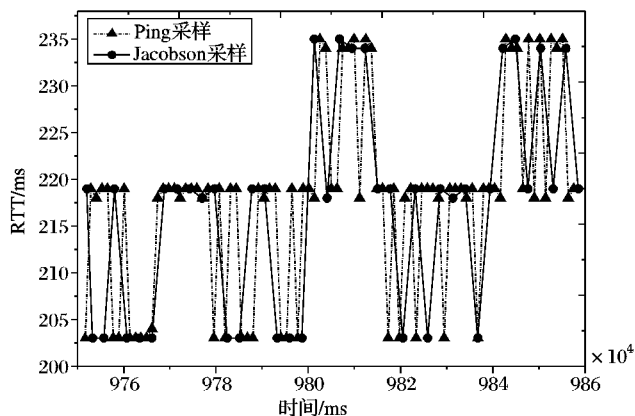


(b) 初始采样间隔500ms

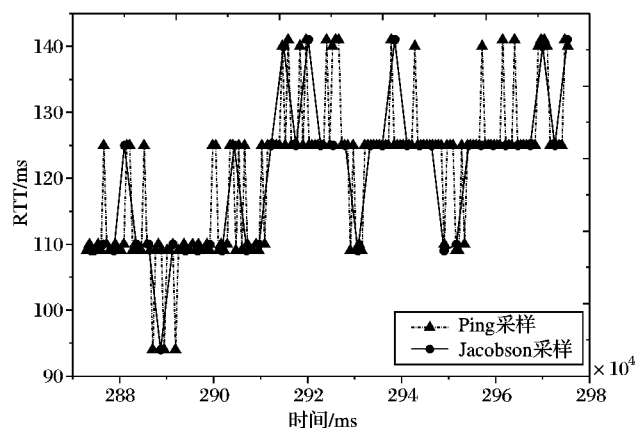
图4 基于 AR 模型的自适应算法与 Ping 的比较

在大量的实验过程中还发现, 简单自适应方法在网络发生突变时, $|D_{t_n} - D_{t_{n-1}}|$ 变大, 用 ∂n 近似表示

$|D_{t_{n+1}} - D_{t_n}|$ 时, 因取均值而变化较小, 从而导致计算出来的下一次轮询时间偏大, 需进行适当的经验修正。而基于 AR 模型的自适应算法, 其模型结构辨识和模型检验的过程比较繁琐, 其模型参数的求解难以实现在线递推估计, 因此在异常网络时延的条件下, 利用该算法预测网络 RTT 变化情况不能达到令人满意的效果。而基于 Jacobson 思想的算法数值计算运算简单、快速, 实验也表明该算法在网络处于稳定状态或突发状态都能较好地反映网络延迟变化。



(a) 初始采样间隔1000ms



(b) 初始采样间隔500ms

图5 基于 Jacobson 的自适应算法与 Ping 的比较

表1 采样次数分析

方法	实验一	实验二
Ping 采样	88	166
简单自适应采样	54	111
AR 自适应采样	39	41
Jacobson 自适应采样	40	41

4 结语

本文研究了网络时延变化规律和周期性采样算法的弊端, 提出了基于时延变化率的 RTT 自适应采样算法, 通过实验数据证明了算法的正确性, 即: 自适应算法获得了与周期性采样算法几乎一致的 RTT 值分布情况, 又有效地减小了采样次数。特别是基于 Jacobson 思想的自适应采样算法数值计算简单, 具有更大的适用范围。探索该算法对其他网络性能参数测量的适用性, 是我们下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 黎文伟, 王俊峰, 谢高岗, 等. 基于包对采样的 IP 网络时延变化测量方法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(8): 1354-1360.
- [2] ISHIBASHI K, AIDA M, KURIBAYASHI S. Estimating packet loss rate by using delay information and combined with change of measure framework[C]// IEEE GLOBECOM 2003. San Francisco: IEEE, 2003: 3878-3882.
- [3] 谢高岗, 李忠诚, 张大方, 等. 链路带宽测量方法改进[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(1): 68-74.
- [4] DOWNEY A B. Using Pathchar to estimate Internet link characteristics[C]// The ACM SIGCOMM 1999. New York: ACM, 1999: 241-25.
- [5] HANDLEY KM, ROHRS C. Congestion control for high bandwidth-delay product networks[C]// The ACM SIGCOMM 2002. New York: ACM, 2002: 89-102.
- [6] 朱利, 周俊辉, 郑守淇, 等. 基于 RTT 的自适应拥塞控制研究[J]. 计算机学报, 2000, 23(7): 705-710.
- [7] ITU-T Recommendation G 1010, End-user multimedia QoS categories[S]. ITU-T, 2001.
- [8] ALMES G, KALIDINDI S, ZEKAUSKAS M. RFC2681, A round-trip delay metric for IPPM[S]. 1999.
- [9] 王亚沙, 王光兴. 网络性能管理中一种数据采集算法的研究[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(9): 8-14.
- [10] FLOYD S, JACOBSON V. The Synchronization of periodic routing messages[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(2): 122-136.
- [11] 黎文伟, 端到端互联网性能监测技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [12] VERN P. End-to-end routing behavior in the Internet[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(5): 601-615.
- [13] 张树京, 齐立心. 时间序列分析简明教程[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2003.
- [14] JACOBSON V, KARELS M J. Congestion avoidance and control[C]// The ACM SIGCOMM 1988. New York: ACM, 1988: 314-329.
- [15] POSTEL J. RFC793, Transmission control protocol specification[S]. 1981.

(上接第318页)

5 结语

本文在分析了各种传播模型的基础上, 选用反向射线跟踪技术对场强进行计算, 提出一种“三维场景建模, 建设场强预测数据库, 进行射线跟踪计算场强分布, 三维可视化”的思路, 完成了一个基于三维射线跟踪技术的网络优化模块, 为 3G 网络在微小区, 微微小区的规划和优化提供直观, 形象的数据支持。

参考文献:

- [1] 袁正午. 移动通信系统终端射线跟踪定位理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

- [2] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1985.
- [3] HARRINGTON R F. Time-harmonic Electromagnetic Fields[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [4] 黄心渊. 3DS MAX 8 标准教程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [5] 孙家广, 胡事民. 计算机图形学基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 吴志忠. 移动通信无线电波传播[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [7] 周力, 柴舜连, 毛均杰. 基于三维射线跟踪八叉树算法的城市微区电波传播预测算法模型[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1776-1778.