

文章编号:1001-9081(2007)03-0519-03

一种 CDMA2000 自适应链路层重传算法

杨 帅,王民北,秦 刘,柏 溢

(国家数字交换系统工程技术研究中心,河南 郑州 450002)

(yangshuai@mail.ndsc.com.cn; ys-yss@eyou.com)

摘 要: TCP 协议应用在 3G 无线网络中时,其传输性能受到了无线网络物理层帧差错率的严重影响。链路层重传技术可以大大改善 TCP 数据传输性能因无线信道误码率大而下降的情况。主要研究了 CDMA2000 中链路层重传技术对无线 TCP 数据传输的影响,并结合 TCP 层重传超时机制,提出了一种新的自适应链路层重传算法,提高了 TCP 在无线链路的数据传输性能。最后对该算法进行仿真,验证了此算法可以显著提高 TCP 吞吐率。

关键词: CDMA2000; 传输控制协议; 无线链路协议; 自适应重传

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A

An adaptive retransmission scheme over CDMA2000 wireless link layer

YANG Shuai, WANG Min-bei, QIN Liu, BAI Yi

(National Digital Switching System Engineering & Technology R&D Center, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: When TCP application is used in 3G wireless packet data service, its data transmission performance is badly influenced by the frame error rate (FER) of physical layer. The link layer retransmission technology is an important measure to improve the TCP data transmission performance. The effect of the link layer retransmission schemes of CDMA2000 on TCP performance was mainly studied. An adaptive retransmission scheme over CDMA2000 wireless link layer was put forward. The simulation of this algorithm using NS2 shows that this scheme can greatly improve the TCP throughput.

Key words: CDMA2000; TCP; radio link protocol; adaptive retransmission

0 引言

随着 3G 技术的不断成熟并逐步进入商业化,越来越多的用户希望通过移动通信网络访问 Internet。当用户通过移动终端访问 Internet 时,大约有 80% 的业务需要 TCP 服务。最初, TCP 是为有线网络设计的,其最主要的特点就是提供了可靠的面向连接的传输服务。但是,在无线网络中,由于有线和无线环境具有截然不同的特征,造成 TCP 在无线网络中的运行效率严重下降。在有线网络中,链路传输通常认为是非常可靠的,包的丢失主要是由于拥塞造成, TCP 协议的拥塞控制机制可以较好地解决因网络拥塞引起的丢包问题。但在无线网络中,数据包的丢失主要是由于无线信道高比特帧差错率(Frame Error Rate, FER)引起的,而 TCP 却将这种数据包的丢失误归于网络发生拥塞而采取拥塞控制处理,不必要地降低了端到端的吞吐率,导致自身性能的下降^[1,2]。因此,如果要在无线网络中使用 TCP 协议传输数据,则必须采取相应的措施,才能保证 TCP 的传输性能。

CDMA2000 是 3G 无线系统的三个主要标准之一。为了在 CDMA2000 中解决 TCP 在无线网络中传输性能差的问题,美国高通公司提出了无线链路协议(Radio Link Protocol, RLP)。RLP 的目的是改善无线链路高帧差错率(FER)对 TCP 传输性能的影响,在 CDMA 业务信道上提供类似于有线

网络可靠的数据传输。CDMA2000 无线系统中有关 TCP 数据传输的协议体系结构如图 1 所示。其中移动台是用户的移动终端, RN 是指无线网络,包括基站收发系统(BTS)、基站控制器(BSC)和分组控制功能(PCF); PDSN 连接无线网络和分组数据网的接入网关;终端主机是网络上向用户提供特定数据业务的服务器。

RLP 是采用了基于否定重传的自动重传请求(Automatic Repeat Request, ARQ)机制,它的重传方案对 TCP 数据传输的吞吐量影响较大。一般情况下,在一次连接建立时,由发送端和接受端通过协商确定 RLP 的重传方案,不同的重传方案对系统性能有着不同的影响^[3]。

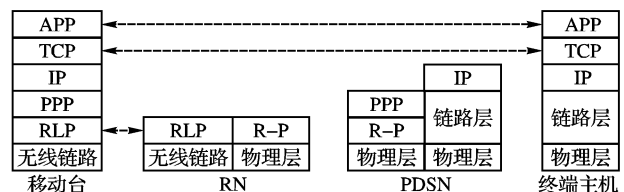


图 1 CDMA2000 无线系统 TCP 协议体系结构

本文主要研究 CDMA2000 中无线链路层 RLP 的重传方案对 TCP 数据传输性能的影响,并结合 TCP 的重传超时机制,提出了一种能改善 TCP 传输性能的自适应链路重传算法。通过仿真技术对该算法的仿真,验证了这种自适应链路重传算法确实能改善 TCP 数据在 CDMA2000 无线网络中的

收稿日期:2006-09-15; 修订日期:2006-10-15 基金项目:国家 863 计划项目(2004AA103130)

作者简介:杨帅(1983-),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向:无线通信技术; 王民北(1963-),男,山东章丘人,教授,主要研究方向:无线通信技术、计算机应用; 秦刘(1980-),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向:宽带信息网络; 柏溢(1975-),男,江苏盐城人,博士研究生,主要研究方向:CDMA2000-1X 移动终端分组数据技术。

传输性能。

1 RLP 重传方案对 TCP 性能的影响

TCP 是面向连接的端到端传输控制协议,其差错控制机制是采用肯定应答的方式,即当某一报文成功到达接收端时,接收端将发送 ACK 报文给发送端,但是若在给定的一个超时时间值(RTO)内没有到达,发送端则认为有可能发生了网络拥塞,就要重传该帧。TCP 的 RTO 是对 RTT 的上限值的推测,RTT 是从一个包离开发送端到发送端接收到接收端发送的对该包的响应(ACK)所经历的时间。RTO 根据 RTT 计算的公式如下:

$$\text{DELTA} = \text{RTT} - \text{SRTT} \quad (1)$$

$$\text{SRTT} = \text{SRTT} + \text{DELTA}/8 \quad (2)$$

$$\text{RTTVAR} = \text{RTTVAR} + (|\text{DELTA}| - \text{RTTVAR})/4 \quad (3)$$

$$\text{RTO} = \text{MAX}(\text{SRTT} + 4 * \text{RTTVAR}, 2 * \text{ticks}) \quad (4)$$

RTO 是在完成每个新的 RTT 测量后修改 SRTT (Smoothed RTT),SRTT 称作平滑 RTT 估计器,是一个低通滤波器,它是 RTT 的平均值。DELTA 是最新的 RTT 与当前的 SRTT 的差。RTTVAR 是平滑的 RTT 偏差的估计器,它也是一个低通滤波器,它是被平滑的均值偏差。其中 1/8 和 1/4 为估计器增益,4 是 RTT 偏差权重,ticks 为计时器粒度,大小一般是 1 秒的几分之一。RTO 的设定对 TCP 来说是个关键的问题,它直接影响到 TCP 的传输性能。

CDMA2000 无线链路层的 RLP 是采用基于否定重传的 ARQ 技术来尽力降低无线链路的帧差错率,即只有当有数据帧丢失时,RLP 接收端才会发送 NAK 帧来通知发送端。常见的重传方案有(1,2,3),(1,1,1),(2,3)等。以(1,2,3)方案为例,接收端在检测到一帧丢失后,第一轮先发送一个 NAK 帧,并启动一个 RLP 重发定时器,如果定时器超时前收到重传的丢失帧,则结束该丢失帧的重传过程;如果定时器超时还没收到,则在第二轮中发送两个 NAK 帧,并重新启动 RLP 重发定时器;如果定时器超时仍然没收到该帧,则在第三轮中发送三个 NAK 帧,并重新启动重发定时器。如果在定时器超时前收到重传的丢失帧,则结束该丢失帧的重传过程,若仍在超时后没收到,则放弃对该帧的重传,交由上层协议处理。CDMA2000 中采用的 RLP 协议对重传方案并没有明确的限定,通常在 RLP 连接建立后,通过初始化协商来设定一个固定的重传方案^[4]。

虽然 RLP 可以改善无线链路的数据传输率,但是 RLP 重传方案实现的前提是必须在 TCP 所设定的 RTO 时间内完成丢失帧的重传,否则会引发 TCP 启动拥塞控制机制,不必要地降低 TCP 吞吐量,造成无线链路的传输性能的下降。然而 RLP 重传方案是在通信双方初始化时协商的一个固定的方案,因此在整个数据传输过程中它并不能很好地适应 RTO 的变化和无线链路的变化。例如,在通信双方刚刚建立连接时,由于此时的无线链路不稳定,FER 较高,则双方会协商一个 RLP 重传次数多的方案,以便更好地传输数据。但是在数据传输过程中,由于无线链路和 RTO 是不断变化的,当链路状态较好,FER 较低时,RTO 会随着 RTT 的降低而降低,此时在初始化协商的重传方案就很可能在重传丢失帧时,超出 TCP 发送端的 RTO 值,从而引发 TCP 启动拥塞控制机制和超时重

传机制,引发无线链路传输性能的下降。因此,我们必须对 TCP 和 RLP 进行综合考虑来设计 RLP 的重传方案^[5]。

2 无线链路自适应重传方案

2.1 RTO 与 RLP 重传次数之间的定量分析

为了更好地对 RTO 及 RLP 重传次数进行定量分析,现假设一个 TCP 报文被分成了 m 帧,并且 TCP 报文在有损链路传输过程中差错率忽略不计。在分析中,所涉及的变量约定如下: T_{prop} ,无线信道的电磁波传输延迟; T_d ,数据帧传输时间; T_n ,NAK 帧传输时间; T_{timeout} ,RLP 超时重传时间;RTT,TCP 报文样本往返时间; T_{wired} ,TCP 报文在有损网络传输时间; m ,一个 TCP 报文所包含帧数; K ,丢失帧的重传次数。

则: $T_{\text{all}(d)} = m * T_d + T_{\text{prop}}$; $T_{\text{one}(d)} = T_d + T_{\text{prop}}$; $T_{\text{one}(n)} = T_n + T_{\text{prop}}$ 。其中 $T_{\text{all}(d)}$ 是 TCP 报文从发送端成功到达接收端的时间, $T_{\text{one}(d)}$ 是一帧从发送端成功到达接收端的时间(同时是 ACK 从接收端到达发送端的时间), $T_{\text{one}(n)}$ 是 NAK 帧从接收端到达发送端的时间。

由上可以得出,当无线链路为理想状态(即 FER 为零)时,TCP 报文的 RTT 时间为:

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= T_{\text{wired}} + (m * T_d + T_{\text{prop}}) + (T_d + T_{\text{prop}}) \\ &= T_{\text{wired}} + T_{\text{all}(d)} + T_{\text{one}(d)} \end{aligned} \quad (5)$$

当 FER 增加造成数据帧在传输过程中丢失,数据帧在第一次重传成功时,TCP 报文的 RTT 为:

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= T_{\text{wired}} + (m * T_d + T_{\text{prop}}) + \\ &\quad (T_n + T_{\text{prop}}) + (T_d + T_{\text{prop}}) + (T_d + T_{\text{prop}}) \\ &= T_{\text{wired}} + T_{\text{all}(d)} + T_{\text{one}(d)} * 2 + T_{\text{one}(n)} \end{aligned} \quad (6)$$

若数据帧在第二次重传成功,则 TCP 报文 RTT 为:

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= T_{\text{wired}} + (m * T_d + T_{\text{prop}}) + T_{\text{timeout}} + (T_n + T_{\text{prop}}) + \\ &\quad (T_d + T_{\text{prop}}) + (T_d + T_{\text{prop}}) \\ &= T_{\text{wired}} + T_{\text{all}(d)} + T_{\text{one}(d)} * 2 + T_{\text{one}(n)} + T_{\text{timeout}} \end{aligned} \quad (7)$$

由此类推,若数据帧在第 $K + 1$ 次重传成功,TCP 报文的 RTT 为:

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= T_{\text{wired}} + (m * T_d + T_{\text{prop}}) + T_{\text{timeout}} * K + (T_n + T_{\text{prop}}) \\ &\quad + (T_d + T_{\text{prop}}) + (T_d + T_{\text{prop}}) \\ &= T_{\text{wired}} + T_{\text{all}(d)} + T_{\text{one}(d)} * 2 + T_{\text{one}(n)} + T_{\text{timeout}} * K \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知,无线链路的传输时延主要影响因素为 RLP 丢失帧的重传次数 K (因有线网络数据的传输时间远低于无线网络传输时间,即 $T_{\text{wired}} \ll \text{RTT}$),而 RTO 是对 RTT 的上限值的推测值。因此,要想在 RLP 重传丢失帧时,不引起 TCP 层传输启动超时重传机制,造成系统性能下降,则要满足下式:

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= T_{\text{wired}} + T_{\text{all}(d)} + T_{\text{one}(d)} * 2 + T_{\text{one}(n)} + \\ &\quad T_{\text{timeout}} * K \leq \text{RTO} \\ \text{即: } K &\leq (\text{RTO} - T_{\text{wired}} - T_{\text{all}(d)} - 2 * T_{\text{one}(d)} - T_{\text{one}(n)}) / T_{\text{timeout}} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知,RLP 的重传次数与 TCP 的 RTO 成正比,与 RLP 超时重传时间 T_{timeout} 成反比。

2.2 自适应重传算法

自适应重传算法根据无线链路 FER 的变化和 TCP 的 RTO 值,在 RTO 范围内动态调节 RLP 的重传方案,使得 RLP 尽可能重传所丢失的帧,并且 RLP 重传没有超出 RTO 的值,

因此同时避免了 TCP 进入慢启动过程,有效地提高了无线链路的 TCP 数据传输性能。

基于上述思想,该算法的描述如下:

1) 在发送端和接收端初始化协商时,采用一个特定的重传方案(1,2,3)。据文献[4]研究表明,如果考虑到差错恢复、帧差错率的统计分布和时延等因素,方案(1,2,3)比其他方案的性能相对要好,所以我们采用(1,2,3)方案作为初始协商值;

2) 当该方案传输丢失帧失败时,将失败信息传递给 TCP,由于此时没有超出 RTO 时间值,因此引发 TCP 启动快速重传机制对丢失的数据包进行重传,同时根据在(4)式计算所得的 RTT 来对 RTO 进行更新;

3) 发送端用更新的 RTO 的值根据式(9)来对 RLP 重传方案进行重新计算,并且将新计算的重传方案运用到下次的重传丢失帧中;

4) 重传方案成功将丢失帧传送到接收端时,仍要对 RTO 进行更新,根据式(9)计算新的重传次数 K,更新原来的 K 值,在下次重传丢失帧时使用新得到的 K 值的重传方案对丢失帧进行传输。

该算法的流程如图 2 所示。可以看出采用自适应重传方案后,具有以下显著的优点:

1) 自适应性。RLP 层可以根据无线链路的特点以及不断更新 RTO 值,动态地设定重传方案,而不是在数据传输过程中一直采用固定的重传方案,这样可以有效提高数据传输效率。

2) 避免了 TCP 进入慢启动。RLP 层的重传方案是根据 RTO 来动态设定的,因此 RLP 重传过程不会超出 RTO 的时间。当 RLP 重传方案失败时,由于没有超过 RTO 时间,因此 TCP 直接进入快速重传阶段,避免了 TCP 进入慢启动,提高了 TCP 的传输性能。

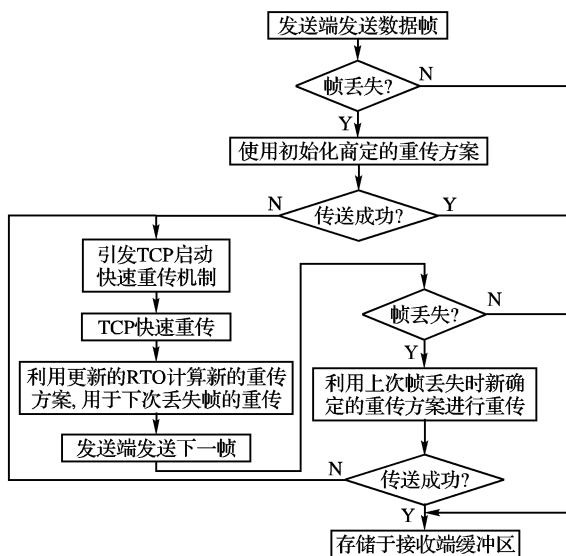


图 2 自适应重传算法流程

3 仿真与仿真结果分析

本文使用 NS2 仿真器测试所提出的算法,图 3 为仿真中使用的网络拓扑结构。其中节点 FH 和 RT 之间是有线网络,节点 RT 和 BS 间的长时延瓶颈链路用来模拟广域网环境,节点 BS 和 MH 间的有差错链路用于模拟无线链路,实验中这段链路上引入了不同的误帧率,来观察自适应重传方案的有效

性。在这段链路中 RT 节点位于有线网络和无线网络之间,起着数据路由的作用。仿真中用的参数设置如表 1 所示。

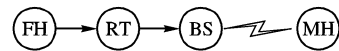


图 3 仿真使用的网络拓扑

表 1 仿真参数设置

参数	值
数据业务类型	FTP
TCP 版本	TCP Reno
有线链路延迟/s	0.02
无线链路延迟/s	0.1
无线数据传输率/kbps	153.6
帧差错率	1% ~ 30%
RLP 缺省重传方案	(1, 2, 3)
fdT	0.01

仿真结果如图 4 所示,其中 TCP 的吞吐量采用归一化表示。

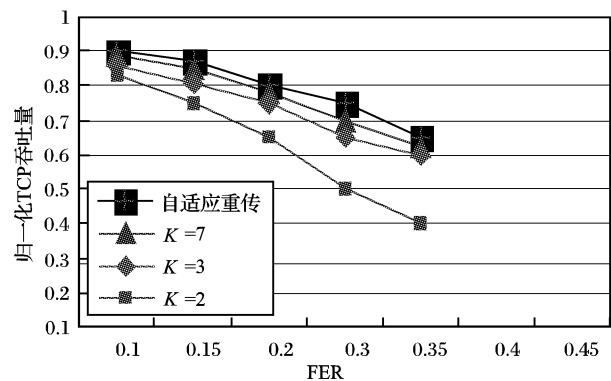


图 4 各种重传方案在不同 FER 时的 TCP 吞吐量

图 4 是 RLP 采用自适应重传方案和不同的固定重传方案在不同 FER 的 TCP 吞吐量,其中 K 为 RLP 重传次数。由图 4 可以看出,采用 RLP 自适应重传方案的 TCP 吞吐量要比采用初始化协商时的固定重传方案(K = 2,3,7)的吞吐量高。这是因为自适应重传方案可以随着无线链路 FER 的动态变化,根据随时更新的 RTO 来确定重传方案,使 RLP 在 RTO 时间内尽力而为重传丢失帧。而固定重传方案是在初始化时协商的固定方案,不会随着无线链路 FER 的变化而改变,因此在重传丢失帧时可能会超出 TCP 的 RTO 值,引发 TCP 启动超时重传机制,在一定程度上降低了 TCP 的吞吐量。

4 结语

为有线网络设计的 TCP 协议应用在无线链路上时,其传输性能很难满足数据传输业务要求。传统的链路层重传机制虽然可以改善 TCP 在无线链路的传输性能,但不能很好适应无线链路及其 RTO 的变化。本文结合 TCP 层重传超时机制,提出了一种新的自适应链路层重传算法,此算法能根据无线链路的状况动态调节重传策略,使 TCP 跳过慢启动过程,避免慢启动对 TCP 性能的影响,改善了 TCP 在无线链路传输性能差的状态。我们已经将该方案成功地应用于 FTP、HTTP 等无线 TCP 成块数据传输业务,改善了 TCP 数据包在 CDMA2000 无线网络中的传输性能。

字,将删除消息传递到根据该关键字确定的分组,然后转3)。

同样,空间数据的存储及删除操作完成后,若使得某些节点的负载满足分组合并或分裂条件,则需要对分组合并或分裂操作,对分组进行动态调整。

3 性能分析

3.1 理论分析

本文方法主要从负载均衡和提高空间数据访问操作的执行效率两方面进行考虑,设定每个存储节点的负载在区间 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 内可较好地保证整个系统的负载均衡。

空间数据访问的执行由两个阶段组成:首先从启动节点发送查询消息到目标分组;然后在组内将消息路由至目标节点,返回满足查询条件的结果。称查询消息从源节点传送到目标节点时经过的节点数为跳数,执行空间范围查询操作时,跳数可以作为衡量系统效率的一个重要参数。令当前系统中节点总数为 N ,分组数为 $K(K < S)$,则最坏的情况下 K 跳即可完成第一阶段的操作;每个分组的平均规模为 (N/K) ,则 $\log(N/K) = (\log N - \log K)$ 跳即可完成第二阶段的操作。由于空间数据访问具有位置相关性,若某次查询某范围内 M 个的空间数据对象,由于分组方法中保留了对对象的位置信息,则查询 M 个对象可在 $(K + \log N - \log K)$ 跳内完成,而 Chord 协议则需要 $(M \times \log N)$ 跳内完成,可看出分组方法在访问多个数据对象时优势明显。

3.2 仿真实验

我们使用了一台 CPU 为 P4 2.4G、内存为 512M 的计算机,利用 OPNET 公司的 OPNET Modeler 仿真软件并结合 VC 开发语言进行调试,对文中提出的分组方法进行了仿真实验。为简便考虑,实验数据设为粒度相同的 GML 格式的点类型数据集,初始分组数 S 的值为 32。具体数据访问操作设定为空间范围查询,随机选取一个节点作为查询的启动节点,性能监视器收集跳数及产生的消息数作为衡量参数。针对不同的查询范围及节点数进行多次实验,分别记录各次的结果,最终取平均值。

图 2 给出了分组方法与 Chord 协议在不同的节点数时的跳数对比结果,实验结果显示分组方法在减少跳数上有比较好的效果,在节点数增多的时候这种效果更加明显。

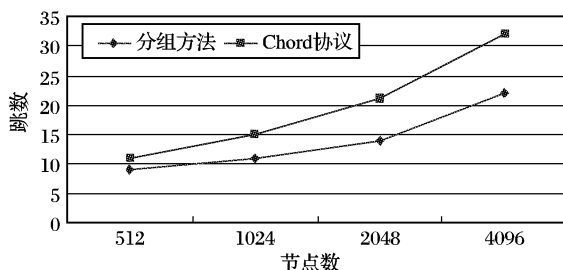


图2 执行空间范围查询操作时的跳数对比

图 3 给出了由一个范围查询操作引起的消息总数对比。从该图可以看出分组方法较 Chord 协议在降低网络流量方面有非常好的效果,在节点数增多时这种效果更加明显。

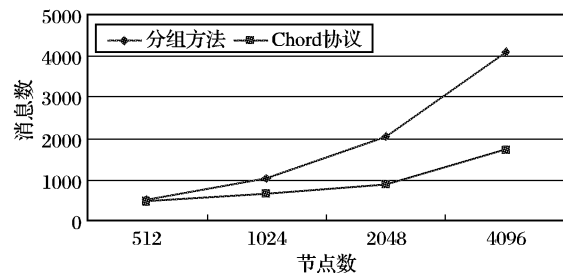


图3 执行空间范围查询操作时的消息数对比

4 结语

结构化 P2P 系统由于具有鲁棒性、负载均衡和良好的可扩展性等优点,可将广域网上大量闲置的分散存储空间组织成一个逻辑整体来提供存储服务,而广域分布式海量空间数据的存储是当前制约大型 GIS 发展的一个瓶颈,本文针对空间数据访问的局部性和位置相关性提出的节点分组方法,基于 Chord 进行扩展来高效地支持空间数据的存储,为海量空间数据分布式存储提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1] 胡进峰. 基于对等结构的广域网分布式存储系统研究[D]. 北京:清华大学, 2005. 9-10.
- [2] KUBIATOWICZ J, BINDEL D, CHEN Y, et al. OceanStore: An Architecture for Global-scale Persistent Storage[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2000, 34(5):190-201.
- [3] DRUSCHEL P, ROWSTRON A. PAST: A large-scale persistent Peer-to-Peer Storage Utility[A]. Proceedings of the 8th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS VIII) [C]. Schloss Elmau, Germany, 2001. 65-70.
- [4] COX LP, MURRAY CD, NOBLE BD. Pastiche: Making Backup Cheap and Easy[A]. Proceedings of 5th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation [C]. Boston, MA, 2002. 285-298.
- [5] DABEK F, KAASHOEK MF, KARGER D, et al. Wide-Area Cooperative Storage with CFS[A]. 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles [C]. Banff, Alberta, Canada, 2001. 202-215.
- [6] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Application[A]. Proceedings of the 2001 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications [C]. San Diego, California, 2001. 149-160.
- [7] WANG H, ZIMMERMANN R, KU W-S. ASPEN: An Adaptive Spatial Peer-to-Peer Network[A]. Proceedings of the 13th annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems [C]. Bremen, Germany, 2005. 230-239.

(上接第 521 页)

参考文献:

- [1] 邓晓衡,陈志刚,张连明,等. 无线网络 TCP 协议改进及网络仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11): 2664-2669.
- [2] 柏溢,王民北. CDMA 无线蜂窝网中 TCP 性能分析及改善方法[J]. 微机计算机信息, 2006, 22(3): 188-190.
- [3] 刘海鹏,张根度,李明. 无线移动网络中增强 TCP 性能的技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(6): 641-648.
- [4] SHINBO H, IDOUE A, HASEGAWA T. Evaluation of TCP Per-

- formance on CDMA2000 1x system using Computer Simulation[A]. IEEE Telecommunications [C]. 2003. 723-728.
- [5] KANDUKURI S, CHAPONNIERE E, HAMDY W. On Optimizing FER Target for CDMA2000 Downlink[A]. The 57th IEEE Semianual [C]. 2003, 3. 1955-1959.
- [6] KANDUKURI S, CHAPONNIERE E, CHEN J. Optimizing TCP Performance over CDMA2000 [A]. 14th IEEE Proceedings on [C]. 2003, 2. 1476-1480.