

# 信号短暂缺失下的非完备GPS定位算法研究

郑睿, 陈杰

(中国科学院微电子研究所通信与多媒体SOC研究室 北京 朝阳区 100029)

**【摘要】**该文提出一种在城市峡谷等复杂环境中卫星被频繁遮挡造成卫星信号短暂缺失的非完备条件下,利用少于3颗有效卫星,实现满足一定精度要求的定位方法。实际数据测试表明,在数十秒的短暂非完备期间内,该方法可以提供满足导航要求的定位结果,从而提高了GPS接收机的有效性。该方法不依赖额外传感器,亦不需要电子地图支持,同时系统成本无明显增加。

**关键词** GPS双星定位; 全球定位系统; GPS单星定位; 信号短暂缺失

中图分类号 TN967.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.005

## New Algorithm of GPS Positioning in Incomplete Condition of Temporal Insufficient Signal

ZHENG Rui and CHEN Jie

(Institute of microelectronics, Chinese Academy of Sciences Chaoyang Beijing 100029)

**Abstract** A new algorithm is proposed to enable GPS positioning with acceptable accuracy based on less-than-three available satellites in insufficient condition caused by temporal signal blockage. Tests in real data demonstrate that the proposed algorithm offers significant improvement of GPS availability by providing location results suitable for navigation applications in temporal insufficient condition more than one minute. The algorithm does not need extra sensors or support of digital maps, meanwhile the increased gross system cost is neglectable.

**Key words** double satellites positioning; GPS; single satellites positioning; temporal insufficient signal

GPS系统需要至少4颗有效卫星才能实现三维定位;在高程辅助下,需要至少3颗有效卫星才能实现二维定位。当有效卫星数小于3颗时,若不依赖先验信息,接收机无法完成正常定位。论文中定义有效卫星数小于3的情况为“非完备条件”。在城市、森林等遮挡物较多的复杂环境下,非完备条件出现较频繁,且持续时间较短,通常在数十秒。如2007年5月~6月的3次城市车载测试数据统计表明,非完备条件的出现概率大于10%,平均维持时间约为50 s。若不使用特殊算法,接收机不仅在非完备条件下出现期间内无法定位,而且,在非完备条件结束后还需要相当长的时间才能重新定位,给用户使用带来不便。

为提高GPS接收机在信号遮挡严重场合的有效性,文献[1-4]利用GPS/INS组合定位实现持续的较高精度定位。该方法技术成熟,定位精度高,但额外的传感器(如陀螺仪、加速度计)引入导致系统成本过高,且不易集成,严重地限制了其应用。文献[5]提

出利用伪卫星进行辅助定位,但该方法系统成本更为高昂。文献[6-7]从高精度电子地图的精确匹配入手实现双星和单星定位,成本较低,但这类算法严重依赖电子地图,定位误差尤其是单星定位误差大,且仅适用于某些特殊运动状态。本文提出一种在GPS信号短暂缺失情况下,利用少于3颗有效卫星实现满足一定精度要求的定位方法。该方法不需要额外的信息辅助,对接收机的运动状态也没有限定,能够在数十秒的短期内给出满足一定精度要求的定位结果。该方法通过了基于FPGA的GPS实时接收机真实数据的测试验证,并成功应用于国内首款手机用GPS基带芯片“航芯二号”中。真实数据测试表明该方法能够明显提高GPS接收机在信号遮挡严重场合的有效性。

### 1 GPS伪距定位原理

利用伪距观测量获得用户位置的方程为<sup>[8]</sup>:

收稿日期: 2008-04-25; 修回日期: 2008-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(60425413)

作者简介: 郑睿(1983-),男,博士生,主要从事集成电路设计及系统应用方面的研究。

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x_{\text{sat}1} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{sat}1} - y_{\text{user}})^2 + (z_{\text{sat}1} - z_{\text{user}})^2} + b_u \\ \rho = \sqrt{(x_{\text{sat}2} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{sat}2} - y_{\text{user}})^2 + (z_{\text{sat}2} - z_{\text{user}})^2} + b_u \\ \rho = \sqrt{(x_{\text{sat}3} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{sat}3} - y_{\text{user}})^2 + (z_{\text{sat}3} - z_{\text{user}})^2} + b_u \\ \rho = \sqrt{(x_{\text{sat}4} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{sat}4} - y_{\text{user}})^2 + (z_{\text{sat}4} - z_{\text{user}})^2} + b_u \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho_i$  为第  $i$  颗 GPS 卫星和接收机之间的伪距;  $x_{\text{sat}i}$ 、 $y_{\text{sat}i}$ 、 $z_{\text{sat}i}$  为各有效卫星在 ECEF 坐标系下的坐标;  $x_{\text{user}}$ 、 $y_{\text{user}}$ 、 $z_{\text{user}}$  为接收机在 ECEF 坐标系下的坐标;  $b_u = C\Delta t_{\text{bias}}$ ,  $C$  为光速;  $\Delta t_{\text{bias}}$  为接收机时钟和用户时钟的差值, 即钟偏。

当可用卫星多于 4 颗时, 式(1)为超定方程, 可以在最小二乘的意义下获得最优解。

有些接收机可以在高程辅助下利用 3 颗卫星实现二维定位。其原理是在上述伪距观测方程的基础上增加椭球约束方程联合求解:

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{(x_{\text{sat}i} - x_{\text{user}})^2 + (y_{\text{sat}i} - y_{\text{user}})^2 + (z_{\text{sat}i} - z_{\text{user}})^2} + b_u \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{x^2 + y^2}{(a+h)^2} + \frac{z^2}{(b+h)^2} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $h$  为用户接收机离地球基准椭球的高度;  $a$  和  $b$  分别为地球基准椭球的半长轴和半短轴。

式(1)和式(2)中的卫星位置可由 GPS 卫星信号发射时间(下文简称发射时间)和导航电文计算获得<sup>[2-9]</sup>, 同时伪距也可由发射时间计算获得。因此, 实现定位的前提是获得足够数量的发射时间和导航电文, 能够获得发射时间且完整接收导航电文的卫星称为“有效卫星”。

## 2 非完备定位的基本原理

考虑一个信号短暂缺失的典型情况。首先 GPS 接收机观测到多于 3 颗的有效卫星, 接收机正常定位; 随后 GPS 接收机天线在某个时刻部分地被遮挡, 仅有 1~2 颗卫星有效, 即出现不完备条件, 在这种情况下, 若要继续定位必须获知至少额外 1~2 颗卫星的发射时间和导航电文。导航电文的有效期为 2 h 以上<sup>[10]</sup>, 因而对于短暂的信号缺失期, 信号正常时存储的有效卫星的导航电文可以认为是有效的。同时, 由于接收机运动速度和角度不会突变, 所以, 发射时间增量短期内变化平稳, 且仍处于可用状态的卫星的发射时间变化值能够反映接收机和卫星间相对运动的规律。以各卫星信号缺失前的发射时间为基

础进行外推, 并利用仍处于可用状态卫星的发射时间变化值进行修正, 即可以在短期内预测获得精度在一定范围内的发射时间, 进而利用式(1)或式(2)实现持续定位。

## 3 预测发射时间的理论分析

### 3.1 正常状态下的发射时间获得

获得发射时间是 GPS 接收机处理芯片的主要任务之一。发射时间 6 s 精度部分可以直接从导航电文中获得, 但是更高精度部分需要通过跟踪环路测量获得。在正常状态下, 处于跟踪状态的卫星完成了比特同步 (bit synchronization) 和帧同步 (frame synchronization) 之后, 即可以计算出该卫星的发射时间。为获得卫星发射时间, 基带芯片内部包含一个锁存信号生成器作为锁存所有通道时间寄存器的时钟。锁存信号生成器由晶振驱动, 因而其精度与晶振的稳定度有关。在正常状态下, 一旦锁存信号来临, 硬件锁存时间计数器。这些时间寄存器包括: 码相位计数器、半码片计数器、毫秒计数器、比特计数器和秒计数器等。这些计数器在帧同步时被初始化, 在进行相关运算时被修改实现逐级进位。结合导航电文中解出的 6 s 精度的时间信息, 即可以计算出各卫星的发射时间。

### 3.2 正常状态发射时间误差分析

正常跟踪时, 发射时间的测量值可以表示为:

$$T = t_{\text{ST}} + t_{\text{sc}} + t_{\text{rc}} + t_{\text{r}} + t_{\text{l}} + t_{\text{T}} + t_{\text{n}} + t_{\text{m}} \quad (3)$$

式中  $T$  为发射时间测量值;  $t_{\text{ST}}$  为发射时间的真实值;  $t_{\text{sc}}$  为卫星时钟误差;  $t_{\text{rc}}$  为接收机时钟误差;  $t_{\text{r}}$  为相对论效应;  $t_{\text{l}}$  为电离层效应误差;  $t_{\text{T}}$  为对流层效应误差;  $t_{\text{n}}$  为接收机噪声引入的误差;  $t_{\text{m}}$  为多径效应引入的误差。

文献[2,5]对这几种误差都作了详尽的分析。相对论效应、电离层效应和对流层效应引起的误差变化相对缓慢, 对于短暂的信号缺失期, 可以认为这 4 种误差不变。GPS 接收机常用的温补晶振 (TCXO) 在数分钟内的短期稳定度通常在  $10^{-9}$  以上, 在信号短暂缺失的时间区间内, 接收机时钟漂移对于非精密导航应用可以忽略不计。卫星时钟误差在经过校准之后稳定度比接收机时钟高数个数量级, 因而也可以忽略。若不考虑多径效应, 则相邻发射时间的观测值差(相邻发射时间增量)为:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = t_{\text{ic}} + \Delta t_{\text{v}} + (t_{\text{n}1} - t_{\text{n}2}) \quad (4)$$

式中  $t_{\text{ic}}$  为寄存器锁存信号的周期, 由晶振引起的锁存信号周期误差已经归入  $t_{\text{rc}}$  中;  $\Delta t_{\text{v}}$  为卫星和接

收机之前相对运动引入的发射时间差值;  $(t_{n1} - t_{n2})$  为接收机热噪声引入误差, 若采样间隔足够宽, 可认为是高斯白噪声。可见, 发射时间的增量主要来源于卫星和接收机相对运动的变化和接收机热噪声。

图1是静态和动态情况下测得的发射时间增量的变化规律。其中图1a和图1b为静态情况下2号卫星和3号卫星的数据, 图1c和图1d为动态情况下12号卫星和13号卫星的数据。图中纵坐标都已做了归一化, 可见在200 s区间内, 其增量差值维持在 $10^{-8}$ 数量级。

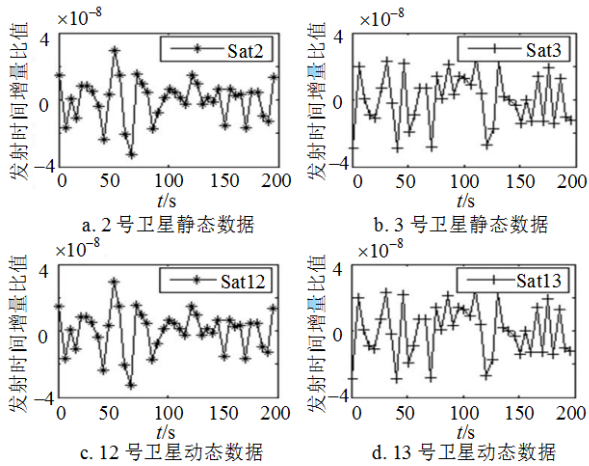


图1 发射时间增量短期变化

### 3.3 预测发射时间的方法

如上所述, 实现非完备条件下定位的关键是预测被遮挡卫星的发射时间。由于发射时间短期变化在 $10^{-8}$ 数量级, 可以利用该卫星信号缺失前存储的发射时间拟合获得拟合方程, 进而外推出信号缺失后的发射时间。为减少计算量, 本文使用一阶线性拟合。式(4)表明短期发射时间增量的主要部分为接收机相对运动变化引入的时间差和接收机热噪声。所以, 拟合时首先对存储的发射时间进行平滑, 减小热噪声, 再计算拟合方程的系数。设存储的发射时间为 $2N$ 个, 则:

$$\begin{cases} \bar{T}_{St1} = at + b \\ \bar{T}_{St2} = a(t + NT_{ic}) + b \\ \hat{T}_{S_{tn}} = a[t + (N + n)T_{ic}] + b \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\bar{T}_{St1}$  为前 $N$ 个发射时间的均值;  $\bar{T}_{St2}$  为后 $N$ 个发射时间的均值;  $a$ 、 $b$  为拟合方程系数;  $T_{ic}$  为寄存器锁存信号的周期, 这里为已知量;  $\hat{T}_{S_{tn}}$  为第 $n$ 步外推发射时间的预测量。将式(5)消元化简, 得:

$$\begin{cases} \hat{T}_{S_{tn}} = \frac{1}{N} \sum_1^n T_{stn} + \left( \sum_1^n T_{stn} - \sum_{n+1}^{2n} T_{stn} \right) n / N^2 \\ a = \left( \sum_1^n T_{stn} - \sum_{n+1}^{2n} T_{stn} \right) / N^2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)只适用于接收机相对卫星静止或匀速运动的情况, 因为该方程隐含了式(4)中  $\Delta t_v$  不变的假设。为放宽对运动状态的限制, 利用仍处于可用状态的卫星进行修正, 对上述方程进行修改为:

$$\begin{cases} \hat{T}_{S_{tn}} = \frac{1}{N} \sum_1^n T_{stn} + (1 + \beta) \left( \sum_1^n T_{stn} - \sum_{n+1}^{2n} T_{stn} \right) n / N^2 \\ \beta = 2(a_{ava2} - a_{ava1}) / (a_{ava2} + a_{ava1}) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\beta$  为修正因子, 可以理解为有效卫星发射时间增量变化率  $a_{ava}$  归一化的一阶导数;  $a_{ava}$  的计算和式(6)中 $a$ 相同。

事实上对于式(6), 即使完全没有有效卫星依然可以实现定位。但由于缺少了有效卫星的修正, 定位只适用于特定的运动状态, 长期精度难以保证, 如何利用这种方法进行隧道等无星情况下的定位是今后改进工作的一个方向。

### 3.4 定位误差的理论分析

外推发射时间和实际发射时间的误差是不完备定位误差的主要来源。参考伪距误差导致的定位误差分析<sup>[2]</sup>, 将外推发射时间引入的位置解的误差表示为几何因子(PDOP)和外推引入误差(Err<sub>Predict</sub>)的乘积, 则外推误差精度可以表示为:

$$Err_a = PDOP \times Err_{Predict} = PDOP \times C \times Err_t \quad (8)$$

在短暂的信号缺失期内, 可认为卫星的PDOP没有变化, 依然可以使用信号缺失前的值, 取典型值2.0。若一步外推发射时间的误差为 $2 \times 10^{-8}$  s, 则利用式(8)计算得一步外推定位误差为12 m, 其持续外推可以简单地乘以外推步数。由于各个跟踪通道使用各自的发射时间进行外推, 其引入的预测误差可以看作是独立的。利用最小二乘定位时, 使用预测卫星的数目越多, 定位的精度就越高, 真实数据测试验证了这种现象。

## 4 定位试验及结果分析

### 4.1 试验环境

在定位试验中以本实验室自主知识产权的手持设备专用GPS基带处理芯片开发平台为测试平台。该平台由ARM9处理器及基于FPGA的协处理器组成。GPS信号的捕获、跟踪、同步和解调电文由协处理器完成, 定位解算由ARM完成。该协处理器拥有12个捕获和跟踪通道, 目前已经单独流片。定位结果通过RS232传入PC, 进而利用Matlab进行统计分析。

### 4.2 静态试验

试验结果是由2007年5月~6月3次观测结果的统

计获得。图2为单星定位和双星定位的定位精度。从图中可知,在60 s的区间内,单星定位的误差小于200 m,双星定位的误差小于50 m。随着非完备条件维持时间的进一步增加,定位误差快速增大,这是由于外推发射时间误差积累造成的。图3为使用预测卫星数目对定位精度的影响示意图。可见,使用预测卫星越多,定位精度越高。

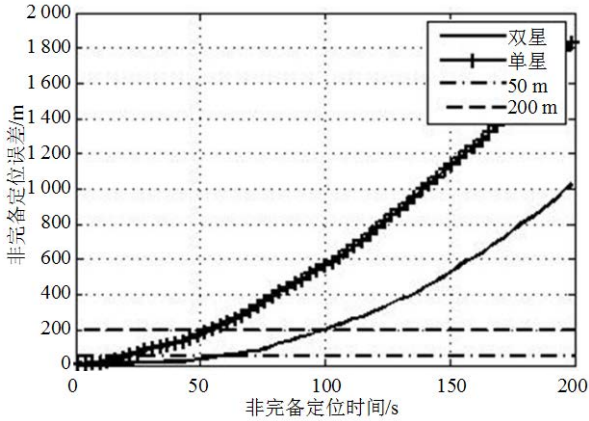


图2 定点试验单星定位和双星定位精度比较

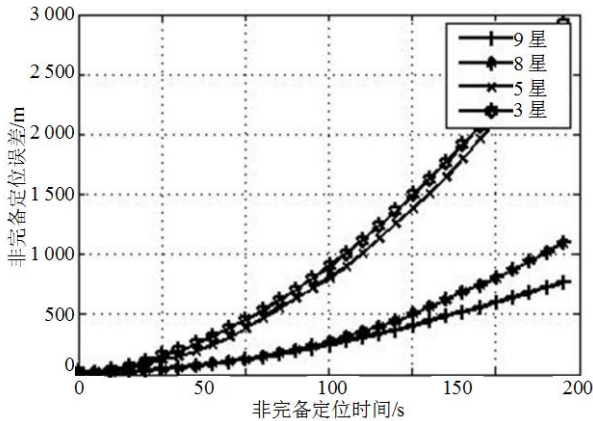


图3 定点试验使用不同预测数目预测卫星定位精度比较

### 4.3 动态试验

试验结果是由2007年7月两次路测结果统计获得,平均车速大于60 km/h。图4为单星定位和双星定位的定位精度图。由图可知,在信号缺失60 s的区间内,单星定位的误差小于500 m,双星定位的误差小于200 m,能够满足短期定位的精度要求。和静态测试类似,随着非完备条件维持时间的进一步增加,由于预测误差的积累,定位误差快速增大,信号缺失超过100 s时只能给出具有一定参考意义的定位结果。同时在动态条件下,不完备定位有初始误差。这是由发射时间预测模型的动态预测误差造成的。图5为动态情况下和静态情况下定位精度比较。可见,无论是单星定位还是双星定位,静态定位精度均好于动态定位精度,这说明了目前使用的预测模

型仍比较粗糙。综上所述,本文方法适用于短暂的信号缺失情况,且动态低时定位精度较好。

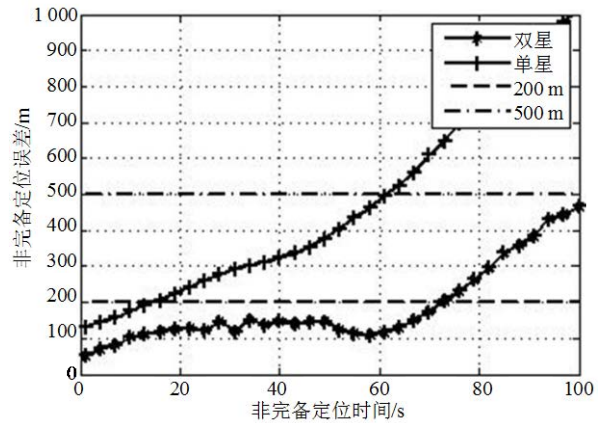


图4 动态试验单星定位和双星定位精度比较

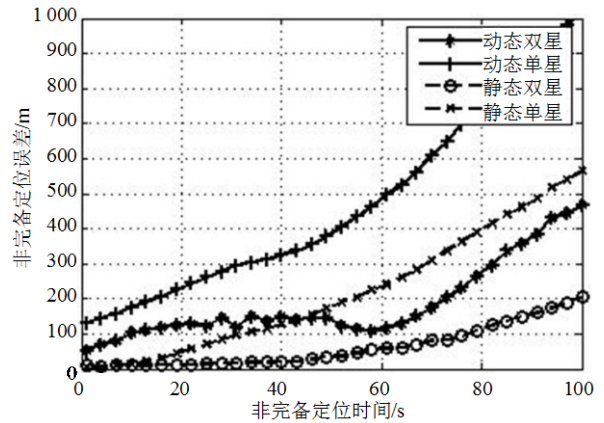


图5 定点试验和动态试验定位精度比较

## 5 结论

本文介绍了一种GPS信号短暂缺失情况下,利用少于3颗有效卫星实现满足一定精度要求的定位方法。实验证明在短期内能够满足车载导航定位的需要,且无需额外的辅助信息,不用增加其他设备,系统成本无明显增加,适用性广。但该方法还存在有效作用时间较短,定位精度不高等缺点。未来的工作主要将集中在进一步完善预测模型,并找到计算复杂度和精度的平衡点。同时引入对钟差的预测,进一步提高定位性能,提高适用性和有效作用时间。

### 参 考 文 献

[1] 王惠南. GPS导航原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WANG Hui-nan. Principles and applications of GPS navigation[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] KAPLAN E. GPS原理与应用[M]. 邱致和, 王万义, 译. 北京: 电子工业出版社, 2001.  
KAPLAN E. Understanding GPS principles and

- applications[M]. Translated by QIU zhi-he, WANG Wan-yi. Beijing: Publishing House of Electronics, 2001.
- [3] YANG Q, SUN J. A location method for autonomous vehicle based on integrated GPS/INS[C]//Vehicular Electronics and Safety 2007 (ICVES 07). Beijing: IEEE, 2007.
- [4] WANG Li-jun, ZHAO Hui-chang, YANG Xiao-niu. The modeling and analysis for autonomous navigation system based on tightly coupled GPS/INS[C]//Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008 (ICMMT 08). Builin: IEEE, 2008.
- [5] WANG Wei, LIU Zong-yu, XIE Rong-rong. INS/GPS/Pseudolite Integrated Navigation for Land Vehicle in Urban Canyon Environments[C]//Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore: IEEE, 2004.
- [6] 桑旋, 李树广. 不完备条件下GPS定位算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2006.24:198-200.
- SANG Xuan, LING Guang-shu. Study of GPS positioning in incomplete condition[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 24: 198-200.
- [7] KOHLI S. GPS Receiver with cross-track hold[P]. CA, US: Sirf Technolugu, Inc, 2003.
- [8] TSUI J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [9] PARKINSON B W, SPILKER J J Jr. Global positioning system: theory and Applications[M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2002.
- [10] Office NGJP. ICD-GPS-200C Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces[J/OL]. [2008-03-02]. ARINC RESEARCH CORPORATION. <http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/ICD-GPS-200C>.

编辑 税红

-----  
(上接第492页)

- [7] LI Yong, SU Fang, FAN Ying-lei, et al. End-to-end differentiation of congestion and wireless losses using a fuzzy arithmetic based on relative entropy[C]//2nd International Conference on Systems and Networks Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2006: 404-410.
- [8] ZOU Zi-xuan, LEE Bu-sung, FU Cheng-peng. Packet loss and congestion state in TCP VENO[C]// Proceedings of 12th IEEE International Conference on Network 2004. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004, 2: 731-735.
- [9] YOUSEFI'ZADEH H, LI Xiao-long, HABIBI A. An end-to-end cross-layer profiling study of congestion control in high BDP wireless networks[C]//2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2007. New York: IEEE, 2007: 3414-3419.
- [10] LI Shi-yin, WANG Xiu-juan, XU Dong, et al. A method of available bandwidth estimation for TCP based on channel noise model[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19): 5058-5061.
- [11] ABOUZEID A, ROY S, AZIZOGLU M. Stochastic modeling of TCP over lossy links[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1724-1733.
- [12] MATHIS M, SEMKE J, MAHDAVI J, et al. The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm[J]. ACM Computer Communication Review, 1997, 27(3): 67-82.
- [13] GRIECO L A, MASCOLO S. Mathematical analysis of westwood+ TCP congestion control[J]. IEE Proc Control Theory Appl, 2005, 152(1): 35-42.

编辑 漆蓉