

7-31-2020

## Chaos Analysis for TCP Congestion Control in Heterogeneous Networks

Xuhui Wei

*1. Information Engineering College of HAUST, Luoyang 471003, China; ;*

Wang Hui

*2. Network Information Center of HAUST, Luoyang 471003, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Chaos Analysis for TCP Congestion Control in Heterogeneous Networks

### Abstract

**Abstract:** In order to study the chaos nature of TCP in Heterogeneous Network, the major features were demonstrated such as periodicity, sensitivity to initial conditions (butterfly effect), and strange attractor of chaotic system by analyzing parameters in Heterogeneous Network proving *that TCP shows chaos nature in Heterogeneous Network in certain situations. Numerical examples show that in the case of system with low bottleneck link, the system shows fine periodic and stable behavior, and there is no TCP deadlock phenomenon in the heterogeneous network system. In the case of system with larger bottleneck link, the system shows chaotic. And a chaotic and non-predictable Heterogeneous Network system can be turned into a regular easy-to-handle system by choosing proper initial value of parameters in the same condition*, which throws new light on improving the TCP's performance in Heterogeneous Network.

### Keywords

heterogeneous network, chaotic nature, TCP congestion control, strange attractor, sensitivity to initial conditions

### Recommended Citation

Wei Xuhui, Wang Hui. Chaos Analysis for TCP Congestion Control in Heterogeneous Networks[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1541-1547.

## 异构网络下 TCP 拥塞控制的混沌特性分析

魏旭晖<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学信息工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南科技大学网络信息中心, 洛阳 471023)

**摘要:** 为了研究传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)在异构网络下是否具有混沌特性, 通过对 TCP 在异构网络系统中参数的分析, 对系统是否存在周期性、系统初值敏感性(蝴蝶效应)以及奇异吸引子等几方面进行验证, 证实了特定情况下 TCP 拥塞控制在异构网络中具有混沌特性。实验结果表明, 在瓶颈带宽较小的情况下, 异构网络系统具有较好的周期性, 且在异构网络系统下不会出现 TCP 死锁现象。在瓶颈带宽较大的情况下, 异构网络系统表现出混沌特性。同时提出在相同条件下选取合适的初值能使一个复杂的, 混沌无序的异构网络系统转换为一个比较简单且具有较好的稳定性的系统, 从而为异构网络系统中 TCP 性能的提升指出了一个新的方向。

**关键词:** 异构网络; 混沌特性; TCP 拥塞控制; 奇异吸引子; 初值敏感性

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2015)07-1541-07

## Chaos Analysis for TCP Congestion Control in Heterogeneous Networks

Wei Xuhui<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>2</sup>

(1. Information Engineering College of HAUST, Luoyang 471003, China; 2. Network Information Center of HAUST, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In order to study the chaos nature of TCP in Heterogeneous Network, the major features were demonstrated such as periodicity, sensitivity to initial conditions (butterfly effect), and strange attractor of chaotic system by analyzing parameters in Heterogeneous Network proving that TCP shows chaos nature in Heterogeneous Network in certain situations. Numerical examples show that in the case of system with low bottleneck link, the system shows fine periodic and stable behavior, and there is no TCP deadlock phenomenon in the heterogeneous network system. In the case of system with larger bottleneck link, the system shows chaotic. And a chaotic and non-predictable Heterogeneous Network system can be turned into a regular easy-to-handle system by choosing proper initial value of parameters in the same condition, which throws new light on improving the TCP's performance in Heterogeneous Network.

**Keywords:** heterogeneous network; chaotic nature; TCP congestion control; strange attractor; sensitivity to initial conditions

## 引言

传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)控制着当前网络中 80%以上数据流的数据发



收稿日期: 2014-06-11 修回日期: 2014-12-26;  
基金项目: 国家自然科学基金(61070247); 河南省教育厅自然科学基金项目(2009A520011); 河南省科技攻关项目(112102210186);  
作者简介: 魏旭晖(1987-), 男, 河南偃师, 硕士生, 研究方向为网络性能改善; 王辉(1966-), 女, 河南洛阳, 教授, 硕导, 研究方向为网络性能改善与数据挖掘。

送。为了更好地提高 TCP 的性能, 学者们提出不同的基于 TCP 的网络系统模型, 用于更加精准地描述网络特性。其中, Mathis 等人分析了 TCP 性能的宏观表现<sup>[1]</sup>, Padhye 等提出 TCP 吞吐量模型比较精确的描绘出 TCP 吞吐量与往返时延, 丢包率, 超时的关系<sup>[2]</sup>。这些模型为 TCP 传输性能的改善提供了一定的理论基础, 但是它们都是在有线网络中提出的, 具有局限性。

众所周知, TCP 在有线网中具有良好的传输性能, 但在异构网络中, 由于存在信号衰减, 目标移动, 信道容量小等特点, 使得异构网络系统呈现非线性, 不可预测性, 因此 TCP 协议在异构网络中的传输性能大大减弱, 传统有线网中的分析方法在异构网络中的准确性也随之降低。

鉴于异构网络系统的复杂性, 需要一种能较好地处理非线性, 无序, 不可预测性系统的方法来进行分析, 从不同的角度入手, 使用新方法从系统的层面来对异构网络系统进行认知控制。在分析复杂系统方面, 近年来兴起的混沌学在这方面取得了巨大成就。混沌系统的固有特性是非线性、无序中的有序、对初值敏感(蝴蝶效应)、长期的不可预测性等<sup>[3-4]</sup>。Zhao 等人用混沌理论中的相空间重构的方法来检测 TCP 初始序列号中的隐蔽信道, 解决了隐蔽信道难检测的问题<sup>[5]</sup>。JS. Wang 等人验证了 RED-AQM 中表现出的分岔混沌特性, 证明 RED-AQM 拥塞控制存在一个通信延时的阈值来决定系统是否稳定<sup>[6]</sup>。Veres 指出了当前网络模型的弊端, 即: 当前网络模型假定 TCP 拥塞控制总表现出周期性可预测性, 并且证明了 TCP 在有线网中的混沌特性<sup>[7]</sup>。

然而关于 TCP 在异构网络中是否具有混沌性质以及用混沌理论来提高 TCP 在异构网络中性能还没有研究涉及。若用混沌理论来改善 TCP 在异构网络中性能, 其前提条件是要确定 TCP 在异构网络中具有混沌特性, 因此本文针对 TCP 在异构网络系统中是否存在混沌进行研究, 得到在瓶颈链路带宽较大情况下将 TCP 拥塞控制将表现出混沌特性的结论。同时通过分析 TCP 在异构网络中的周期性, 得到在带宽较小的情况下, 网络系统有较好的周期性, 而且在异构网络系统中, TCP 死锁现象消失。通过分析异构网络系统对系统初值的敏感性, 以及系统在相平面内奇异吸引子, 提出合适的系统初值能使复杂的混沌系统转变为一个简单、容易分析的简单系统, 为提高 TCP 在异构网络下的性能提供了一个新的方向。

## 1 混沌理论与异构网络的关系

一个系统若表现出随机性、非线性、无序中的有序、决定性、对系统初值的敏感性(蝴蝶效应)等特征, 则称该系统是混沌的系统。

随机性是指一个系统的混沌状态是由体系内部动力学随机性产生的不规则性行为导致, 因此也称为内随机性。一个系统如果被非线性的函数控制, 则它的运行就呈现非线性, 这点在混沌系统中是显而易见的。而无序中的有序可以解释为微观上的无序, 宏观上的有序, 是由一种时空宏观有序的耗散结构失去稳定性而出现的宏观上无序的现象。决定性表现为混乱中的决定性, 正是由于混乱与多样, 因此在走出混沌时通常会得到最好的结果, 比如生物进化。“蝴蝶效应”即系统演化轨迹的初值敏感性, 是指系统运行过程中一个微小的变化会导致系统与原系统的差异呈现指数速度的分离。

另外, 还可以从分维这个角度来分析系统的混沌性质。分维性常用奇异吸引子来描述, 奇异吸引子也叫混沌吸引子, 是混沌系统在其相空间中经过一定时间的演化后, 最终会产生的规则有形的运动轨迹。它表现为系统状态点在相空间中的集合, 具有固定的复杂几何结构, 在时序上具有无序和自相似的特点。

对于异构网络系统, 比如典型的有线无线混合系统, 由于无线链路存在严重的衰落特性、有限的带宽特性、高延时特性和终端移动性等缺陷, 其传输特性比有线网络更容易受到传输环境的影响。此外, 由于自然环境和人为的信号变换所带来的影响经常是突发的、短暂的、随机的、强度不均的, 因此, 网络流量不均衡就成了网络传输中的突出问题, 而由此引发网络瓶颈中拥塞的发生和网络整体带宽资源利用率的下降, 严重制约了互连网络传输性能和服务质量的提高。

诸多不确定的因素导致 TCP 拥塞控制在异构网络中性能下降, 各种干扰因素表现出的随机性, 也导致了系统的不确定性, 其与混沌系统表现的出

的性质相近。

鉴于异构网络表现出一定的混沌性质, 使用混沌系统的验证方法对异构网络系统性质进行分析。

## 2 异构网络系统的周期性与有序性

分析某个系统性质时, 首先要确定该系统是否是周期的, 有序的。Mathis, Padhye 等人基于一个假设来分析网络模型性质, 即: TCP 拥塞控制在有线网中能表现出良好的周期性与有序性。下面验证 TCP 在异构网络环境下的是否存在周期性与有序性。

首先, 分析一个系统的演变情况, 一般的方法是观察这个系统的相空间轨迹图。系统相空间图是一个多维的图形, 每一维都代表系统中的某一个变量, 所有的变量组成了整个系统, 相空间中的每一个点都能唯一标识系统的某一时刻的状态。在相空间内画系统的演变轨迹时, 假如当前系统轨迹运行到之前轨迹上的某个点, 如果系统是周期性的, 那么当前系统轨迹将会沿着此点已经存在的轨迹继续运行。因此, 如果一个系统的变化是周期的, 它的相空间轨迹图应该是一个闭合的重复的轨迹。反之, 如果相空间轨迹图是闭合的回环, 则可以确定这个系统变化具有周期性。

### 2.1 周期性与有序性

下面验证 TCP 在异构网络下是否表现出周期性与有序性。网络拓扑如图 1 所示, S 代表发送端, AP 代表最后一跳的一个无线接入点,  $W_0$  和  $W_1$  分别表示两个无线接收端。S 与 AP 之间通过有线链路连接,  $W_0$  和  $W_1$  采用 WLAN802.11 接入 AP。

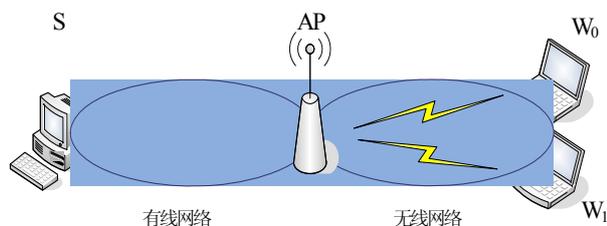


图 1 异构网络拓扑结构

在 NS-2 仿真软件下对上述拓扑进行模拟实

验。使用 TCP-NewReno 协议, 链路参数设置为: 瓶颈链路带宽  $C=0.2\text{Mbps}$ , 链路时延  $d=20\text{ms}$ , 链路队列长度为 10 packets。数据流从有线节点 S, 经过有线链路到达无线接入点(AP), 然后分别向  $W_0$  和  $W_1$  2 个无线节点。2 条 TCP 流分别用  $TCP_0$ ,  $TCP_1$  表示, 其发送窗口大小记为  $\text{cwnd}(0)$  与  $\text{cwnd}(1)$ 。2 个流同时从 0.1 s 开始发送数据, 数据流的  $\text{cwnd}$  的变化图如图 2 所示, 可以看到系统运行的初始阶段, 二者表现出无序性, 运行一段时间之后, 2 个 TCP 数据流的  $\text{cwnd}$  变化呈现周期性, 在同一个周期内, 前半个周期二者同时增大, 同时减小, 共同经历着慢启动, 拥塞避免阶段, 且  $\text{cwnd}(0)$  比  $\text{cwnd}(1)$  的值要大, 后半周期呈现相同的变化趋势, 但是  $\text{cwnd}(1)$  比  $\text{cwnd}(0)$  的值要大, 之后二者表现出周期性的变化。

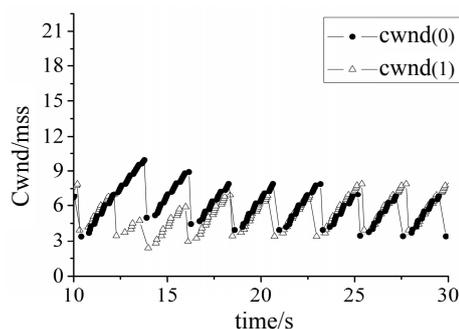


图 2 两条 TCP 数据流  $\text{cwnd}$  变化图

一个完整的系统相空间轨迹图必定是多维的。然而即使在只有 2 个 TCP 数据流的系统中, 完整轨迹图的维数也在三维以上, 其可视效果差而且不易绘制。为了解决这个问题, 常用的做法是选取若干系统重要变量来绘制, 从局部反正出整体的特征。本文选取拥塞窗口( $\text{cwnd}$ )来描述, 因为  $\text{cwnd}$  间接的表示了 TCP 的数据发送速率以及网络当前的拥塞状况。

仿真过程中, 每隔 10 ms 记录一下 2 条数据流的发送窗口大小。图 3 显示了利用  $\text{cwnd}$  表述系统相空间内的变化图。其中 2 个坐标轴  $\text{cwnd}(0)$ ,  $\text{cwnd}(1)$  分别代表系统中 2 条数据流  $\text{cwnd}$  在某一时刻的值, 可以看出系统稳定以后拥塞窗口的相空间

轨迹呈现出阶梯状的封闭轨迹,因此可以确定系统处于周期性的变化,并且这种周期性十分的稳定,即使在异构网络中存在随机丢包,或改变一些初值大小(这里选取改变两条数据流的开始的时间)的情况下,系统运行到稳定状态后,仍会进入到这个稳定的周期阶段,并且不会出现死锁现象。

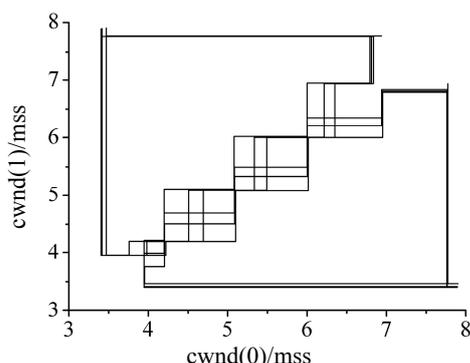


图 3 cwnd 相空间内变化图

## 2.2 有线网 TCP 死锁现象

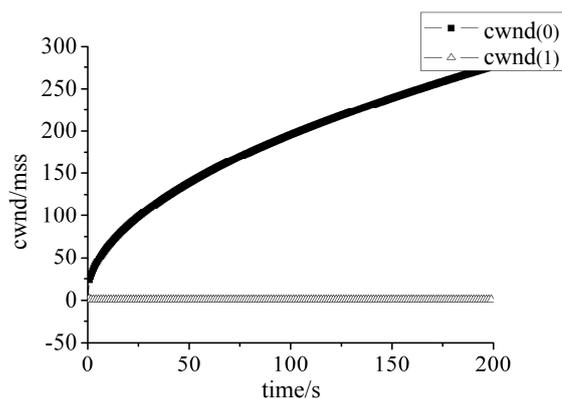
死锁是周期性与有序性的一个反面现象,它是 RFC2309 指出的一种 TCP 极其不公平的现象。其描述如下:当多条 TCP 数据流共存时,某一条数据流发送速率一直增大,所占带宽极大,而一些数据流所占带宽极小,并且一直丢包, TCP 数据流之间的公平性被破坏。但是 RFC2309 并没有说明死锁产生的原因,其认为是网络同步造成的。

若将图 1 拓扑中 AP 与无线节点  $W_0$ ,  $W_1$  中间的链路换成有线链路,其他条件不变。当数据流 TCP<sub>0</sub> 从 0.1 s 开始发送,数据流 TCP<sub>1</sub> 从 5 s 开始发送,就会出现死锁现象。如图 4(a)所示,  $cwnd(0)$  的值一直处于较大值,而且还保持增大的趋势,然而  $cwnd(1)$  一直处于很小的状态,此时数据流之间的公平性很差,数据流 TCP<sub>1</sub> 的发送速率接近于 0 值。

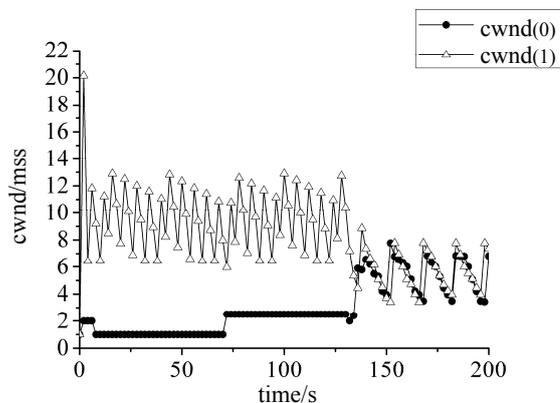
但在图 1 所示实验拓扑结构中,则不会出现死锁现象,两条数据流的  $cwnd$  变化情况如图 4(b)所示,其公平性较好。分析其原因,文献[8]提出死锁现象的必要条件是占用带宽较大的数据流(即:强 TCP 流)不发生超时。因此本文得出在相对比较稳定的有线环境中,在可用带宽较好的情况下,

TCP 流一般不会发生超时,因此容易产生死锁现象。而在环境相对复杂的异构网络下,即存在无线误码丢包,不论是发送速率很大或者发送速率很小的数据流都可能存在误码丢包,这样就打破了强 TCP 流不发生超时的这个条件,当强 TCP 流发生误码丢包时, TCP 拥塞控制导致其发送速率会减小,因此解除了死锁现象。

如上分析,可以看到在瓶颈链路带宽较小的情况下, TCP 在异构网络下表现出来良好的周期性以及稳定性,即使改变系统初值条件,系统初始阶段也只是出现微小的差别,但是运行稳定以后都会进入稳定的周期性阶段。在随后实验中发现这种特性并不是一直存在的,其在带宽增大的时候被打破,下文将详细介绍瓶颈链路带宽较大情况下系统表现出的特性。



(a) 有线网死锁现象



(b) 无线网无死锁现象

图 4 死锁现象

### 3 异构网络系统的奇异吸引子

奇异吸引子是指当时间趋于无穷大时, 在任何一个有界集上出发的非定常流的所有轨道都趋于它的一个集合。因此, 可以通过分析系统某一维度的系统吸引子, 间接地证明一个系统的混沌特性<sup>[9-10]</sup>。

由于异构网络系统在瓶颈链路带宽较小的情况下显示出了良好的周期性与稳定性, 并没有表现出混沌状态特性, 但是若修改一些系统参数, 比如增大瓶颈链路带宽, 此时由于系统的复杂性, cwnd 相平面将不再呈现出周期性与稳定性, 反而表现出了“无序性”。而混沌的一个特性就是无序中的有序, 具备一些隐藏性质, 这需要进一步的证明。

由于 cwnd 只是整个系统大量参数其中一个投影, 且 cwnd 并不是连续的, 这就意味在比较复杂的系统(瓶颈链路带宽较大)中它并不能有效的显示出系统一些性质特别是隐藏的系统性质。因此需要对 cwnd 进行进一步的处理, 使之能更加精准的描述系统此时的运转状况。文献[11]提出一种时间平移算法, 通过该算法可以对系统某一参数的相空间进行重构, 能更好的显示出复杂系统的隐藏性质。公式(1), (2)描述了时间平移算法处理 cwnd 的方法。

$$x[i] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{cwnd}_x[i-j] \quad (1)$$

$$y[i] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{cwnd}_y[i-j] \quad (2)$$

上述公式中:  $x$ ,  $y$  表示两条 TCP 数据流;  $n$  表示控制统计范围,  $n$  值越大, 重构相空间的效果越好。这个方法有以下两点好处:

(1) 若用  $w$  表示统计出来的 cwnd 值的数量, 用该方法处理后 cwnd 相空间平面的可能点的数量从  $w^2$  增大到  $(nw-n)^2$ 。

(2) 处理后  $x[i]$  与  $x[i+1]$  之间的间距更小, 确切的应该说应该不超过  $(2 \times w - 2)/n$ 。因此是用该平移算法比只使用 cwnd 更连续, 能更好的显示出系统性质。

系统初值条件  $C=0.5$  Mbps,  $d=10$  ms,  $B=20$  packets, 这里  $N$  值选取 100, 用上述公式处理 cwnd

并在相空间内作图, 如图 5,  $x[i]$ ,  $y[i]$  代表系统某一时刻两条数据流的 cwnd 经过公式(1), (2)处理后的一对值, 可以看到出现吸引子。此时吸引子表现良好, 并且系统运行时间足够长。

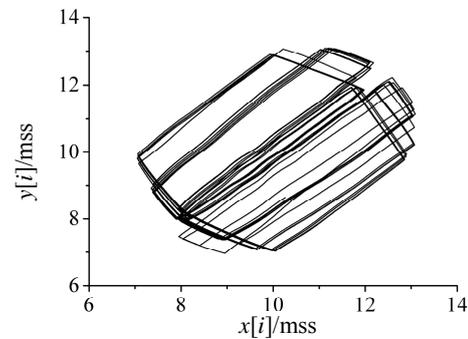


图 5 cwnd 相平面吸引子

奇异吸引子是混沌运动的主要特征之一, 通过证明奇异吸引子可以证明系统的混沌特性。而确定奇异吸引子的常用方法就是确定该吸引子是否具有分形结构<sup>[12]</sup>。下面通过盒维数的方法来计算该吸引子的分形维数。假定  $S$  表示边长为  $\Delta$  的正方形(规模为  $R^2$  的盒子),  $F (< R^2)$  为非空有界集, 记  $N(F)$  表示  $F$  与  $S$  相交的正方形个数, 则该图形盒维数  $D(F)$  记为如公式(3)所示。

$$D(F) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(F)}{\lg(1/\Delta)} \quad (3)$$

$$y = kx + b \quad (4)$$

公式(3)中记  $y = \lg N(F)$ ,  $x = \lg(1/\Delta)$ , 根据盒维数的定义,  $y$  和  $x$  之间的线性关系, 用最小二乘法进行拟合, 得到该吸引子的盒维数  $D(F) = k \approx 2.3371$ 。盒维数是非整数维, 说明该吸引子具有分形结构, 具有分形结构的吸引子我们称之为奇异吸引子。奇异吸引子是混沌运动的主要特征之一, 从这个角度证明此时系统运行行为混沌。

### 4 异构网络系统的初值敏感性

初值敏感性是指系统中的一个微小的变化导致系统以后的演化产生巨大差异, 这也是混沌系统的一个重要的性质之一, 即蝴蝶效应。下面通过仿真验证 TCP 拥塞控制在异构网络系统中表现出对

系统初值的敏感性。使用图 1 的拓扑, 瓶颈链路带宽  $C$  设置为 2 Mbps, 其他条件保持不变。仿真通过四组实验进行对比, 每一组  $TCP_0$  都从 0.1 s 开始

发送数据, 而  $TCP_1$  分别从 0.1 s, 0.5 s, 1 s, 5 s 开始发送, 每隔 10 ms 记录  $cwnd$  的值。实验结果如图 6 所示。

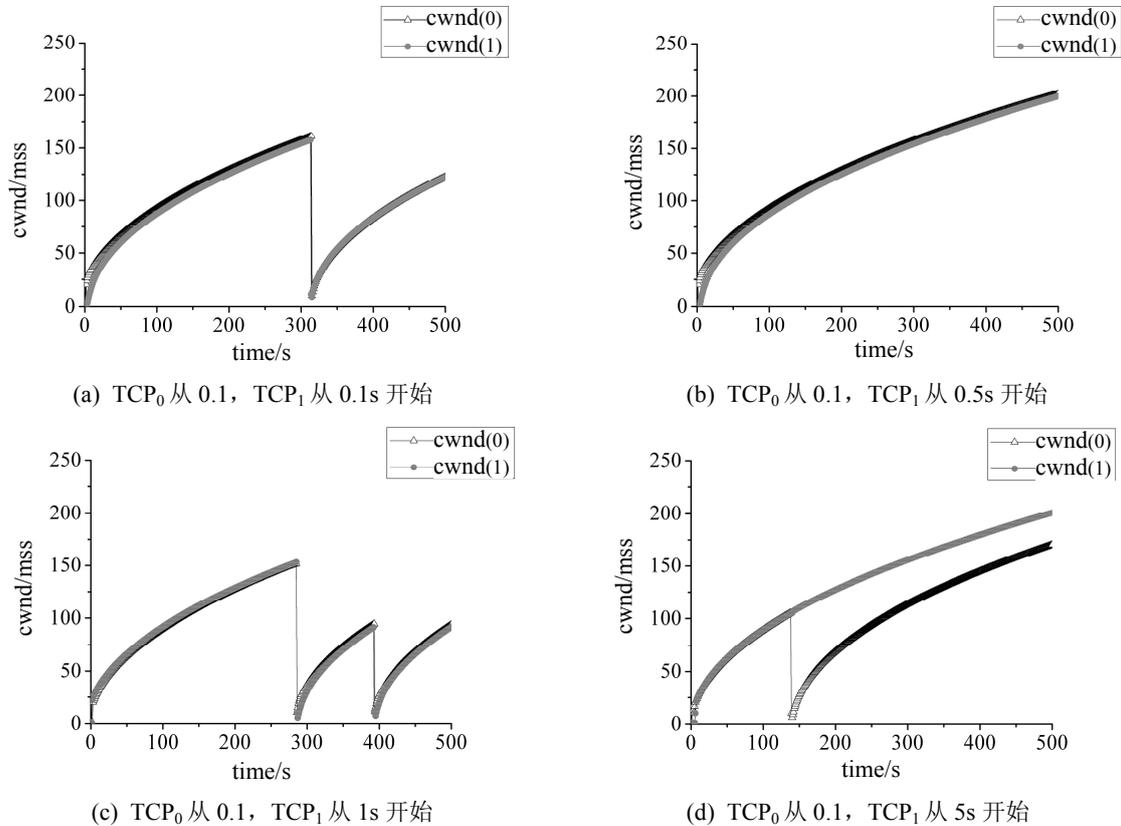


图 6 两条流从不同时间开始发送

图 6 显示了不同情况下, 系统处于前 500 s 2 个  $cwnd$  的变化情况。可以看出, 对于不同的初值, 虽然只是微小的变化, 但是导致的系统之后的演变存在很大的差异。长时间运转该系统, 通过观察两条数据流的  $cwnd$ , 并没有发现规律性, 系统此时表现出混沌的复杂特性。

为了进一步说明异构网络对初值的敏感性, 接下来的实验中我们把 TCP 总数据流的数量增加到 30 个 ( $C=1$  Mbps,  $d=15$  ms,  $B=60$  packets)。起初让系统运行一段时间, 在系统运行时间到达 50 s 时, 把其中一个数据流的  $cwnd$  的值增加 1, 并与改变之前的系统进行对比, 通过对比 2 个系统之间的差异, 可以看到系统对微小变化的敏感性(蝴蝶效应)。为了直观的显示出改动前后 2 个系统存在的差异, 这里定义了  $cwnd$  相空间的欧式距离, 通

过两个系统  $cwnd$  欧式距离的差值来显示出这种差异及系统状态变化。

$$Ed(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w^{orig}(i,t) - w^{pert}(i,t))^2} \quad (5)$$

公式(5)中  $w^{orig}(i,t)$  表示  $cwnd$  的值未改变时的原始系统在  $t$  时刻、第  $i$  条数据流的  $cwnd$  大小,  $w^{pert}(i,t)$  表示  $cwnd$  的值改变后的系统在  $t$  时刻、第  $i$  条数据流的  $cwnd$  大小。 $N$  表示 TCP 数据流的数量, 此时  $N=30$ 。图 7 为两个系统在  $cwnd$  相平面的差异值随时间变化情况, 可以看到 2 个系统在  $cwnd$  改变之前(前 50 s), 2 个系统的在  $cwnd$  相平面的欧式距离为 0, 说明 2 个系统此时完全相同。在 50 s 对系统做了稍微改动后, 看到系统之后的演变与之前的已经完全不同。说明系统存在蝴蝶效应, 而蝴蝶效应也是混沌系统的重要指标之一。

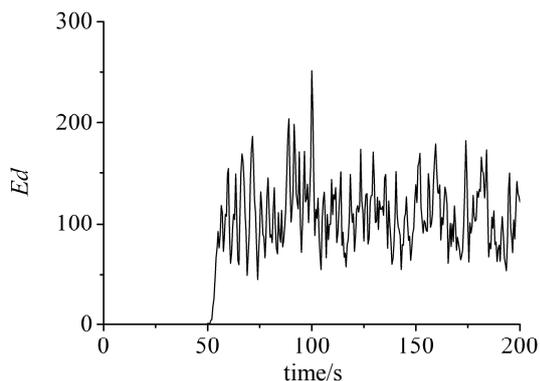


图 7 变动前后系统差异

此外, 由图 6 可以看出, 在 6(b) 情况下, 系统并没有发生丢包现象, 2 个 TCP 数据流几乎同步的保持在较高的发送速率。而在其他的情况下, 系统都有不同程度的拥塞现象, 数据包丢失后, 通过 TCP 的拥塞控制机制, 导致发送端速率明显下降, 系统传输效率变低, 从这一点可以看出不同的系统初值对系统性能的影响较大。图 6(b) 中, 系统变得更为简单, 效率更高, 因此设置适当的系统初值可以让一个复杂的系统转换为一个比较简单的系统, 提高系统效率, 并且使系统更易控制, 这也是下一步研究的一个方向。

## 5 结论

为了研究 TCP 在异构网络下是否存在混沌特性, 通过运用混沌系统分析方法对仿真数据进行处理分析, 证实了 TCP 在特定异构网络系统中表现出混沌特性。此外, 仿真结果显示 TCP 协议在异构网络下不会出现死锁, 并且在瓶颈链路带宽较低的条件表现出了明显的周期性与稳定性。

由于系统对初值的敏感性, 本文提出选定一组特定的系统初值能使一个复杂的混沌无序的异构网络系统变为一个简单, 有规律性, 容易让人们进行操作的系统。未来的工作将着重于研究如何选取一组系统初值, 让系统处于良好的运行状态, 具有较好的公平性或者较大的带宽利用率, 提高 TCP 在异构网络中的性能。

## 参考文献:

- [1] M Mathis, J Semske, J Mahdavi, *et al.* The Macroscopic Behavior of the TCP Congestion Avoidance Algorithm [J]. *Computer Communication Review* (S0146-4833), 1997, 27(3): 67-82.
- [2] J Padhye, V Firoiu, D Towsley, *et al.* Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation [J]. *Proceedings of SIGCOMM' 98* (S0146-4833), 1998, 28(4): 303-314.
- [3] William D, Toshinori M. Principles and applications of chaotic systems [J]. *Communications of the ACM* (S0001-0782), 1995, 38(11): 96-102.
- [4] Liu F, Guan ZH, Wang HO. Stability and Hopf bifurcation analysis in a TCP fluid model [J]. *Nonlinear Analysis-Real World Applications* (S1468-1218), 2011, 12(1): 353-363.
- [5] Zhao H, Shi Y Q. Detecting Covert Channels in Computer Networks Based on Chaos Theory [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* (S1556-6013), 2013, 8(2): 273-282.
- [6] Wang J S, Yuan R X, Gao Z W, *et al.* Hopf bifurcation and uncontrolled stochastic traffic-induced chaos in an RED-AQM congestion control system [J]. *Chinese Physics B* (S1674-1056), 2011, 20(9): 353-363.
- [7] Veres A, Boda M. The chaotic nature of TCP congestion control [C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Tel Aviv, Israel: IEEE Computer Society, 2000: 1715-1723.
- [8] 姜文刚, 孙金生, 王执铨. TCP 拥塞控制中的死锁与混沌[J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(4): 453-457.
- [9] Komatsubara Shigeyuki, Suzuki Ryoichi, Mogi Kazuo, *et al.* Internet traffic analysis based on chaos attractors [J]. *NTT R & D* (S0915-2326), 1998, 47(3): 341-346.
- [10] Cristina Morel, Marc Bourcerie, Francois Chapeau-Blondeau. Generating independent chaotic attractors by chaos anticontrol in nonlinear circuits [J]. *Chaos, Solitons and Fractals* (S0960-0779), 2005, 26(2): 541-549.
- [11] N H Packard, J P Crutchfield, J D Farmer, *et al.* Geometry from a Time Series [J]. *Phys. Rev. Lett.* (S0031-9007), 1980, 45(9): 712-716.
- [12] Sheikholeslam Arash. A chaos based encryption method using dynamical systems with strange attractors (C). [C]// *ICETE 2009 International Joint Conference on e-Business and Telecommunication*. Milan, Italy: INSTICC Press, 2009: 259-265.