

一种流模拟与包模拟结合的新网络模拟技术

韩 进 蔡圣闻 谢俊元

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

摘 要 随着网络应用的发展,网络的结构、规模日趋复杂化,包模拟技术难以适应大规模网络的模拟任务,而流模拟技术虽然有较高的模拟效率,但其模拟精度不如包模拟技术。使用流模拟实现对模拟系统中背景流的模拟,使用包模拟实现对特定网络行为的精确模拟,从而实现了一种包模拟与流模拟相结合、兼顾包精确度与效率的新模拟技术。与其它同类方法相比,该模拟技术将数据包映射为流,实现了背景流与前景流相互作用的准确模拟,从而达到良好的模拟精度与模拟效率。

关键词 流模拟,包模拟,网络模拟技术整合,背景流

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

New Network Simulation Approach Based on Integration of Fluid Simulation and Package Simulation

HAN Jin CAI Sheng-wen XIE Jun-yuan

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract With the development of network application, the structure and size of modern network become more complicated. Nowadays package simulation can't be competent for the network simulation tasks with those networks which has large size and high transit speed. Though fluid simulation has higher simulation efficiency, it has less simulation precision. In this paper, the fluid simulation was used to simulate network systems' background data fluid, and the package simulation was used to simulate the specific network actions. Based on this method, a new network simulation approach was presented, which realizes the integration of fluid simulation and package simulation and leverages the strong points of both simulation approaches. Compared with other similar approaches, the approach converts packages flow into a fluid flow, by this way, it gets precise simulation results come from the interaction of front data fluids and background fluids, and has more simulation precision and efficiency.

Keywords Fluid simulation, Package simulation, Integration of network simulation approach, Background fluid

随着网络应用的发展,现代网络的结构、规模日趋复杂化,给传统的网络模拟带来了挑战。由于网络规模不断增长,需要仿真的网络节点数目、协议种类不断增长,此外高速网络设备,如千兆网络设备等,使得传统网络仿真技术需要的硬件资源越来越多,甚至根本无法满足^[1]。应对这种情况的方法主要有:提高仿真设备的运行性能,采用并行计算的方式执行模拟任务,还有就是流模拟技术^[2](fluid simulation)。传统的网络仿真技术采用模拟数据包传递的方式,又称为包模拟技术(package simulation)。

流模拟技术对网络的建模是将网络中传递的数据视为数据流,而不是数据包,网络的终端与服务器被视作数据源,而网络中的路由器、交换机则被视作数据流的接收与处理节点。与包模拟技术相比,流模拟技术提高了网络建模的抽象程度,也就相应减少了建模与模拟所需的计算量,但是流模拟技术也存在着一些弱点,如仿真精确度的问题,流模拟对网络建模的高抽象程度必然给仿真数据带来某种程度的失真,此外还

有波动效应的问题。

由于模拟系统中有部分网络行为的模拟不需要很高的精确度,因而可采用流模拟来实现对这些背景流的模拟,以提高模拟效率。而针对模拟目标采用包模拟技术则可以实现较高的模拟精度。由此本文使用包模拟与流模拟相结合的方式,实现了一种兼顾模拟效率与精度的模拟技术。与其它同类方法相比,本文采用前景流与背景流独立模拟方式,通过将包映射为流,使得本文模拟技术实现了背景流与前景流更好地融合,从而达到良好的模拟精度与模拟效率。

本文首先是流模拟中数据流与设备建模相关的描述;第 2 节是流模拟及其与包模拟相结合的实现规则;第 3 节是算法实现部分;第 4 节是实验与对比分析;最后是本文总结。

1 本文的流模拟模型

流模拟技术中包括的模型一般有 2 个。

1) 数据源:数据源是对网络终端设备的建模,如用户终端

到稿日期:2009-11-30 返修日期:2010-01-20 本文受国家自然科学基金(60503021, 60721002, 60875038),江苏省高新技术计划(BG2007038)资助。

韩 进(1974—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为网络安全、安全协议分析与设计等, E-mail: hjhaohj@126.com; 蔡圣闻(1974—),男,博士生,主要研究方向为网络安全、网络仿真与模拟等; 谢俊元(1961—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能系统、智能信息处理等。

及服务器。与其它流模拟技术^[6]是不同的,本文的数据源有2个状态:开/测试。当数据源处于开的状态时,即以一定的流率发送数据流;当数据源与目标服务器失去链接时,其处于测试状态,即每隔一定的时间间隔测试与目标服务器的链接情况。

2)网络设备:网络设备的建模包括交换机、路由器等数据传输与交换的中间设备,这些设备的建模通过设备缓冲区、输入汇总流率、最大输出流率来表述。

对于背景流数据,本文引入数据任务概念来描述模拟目标网络中的主要业务数据流。

定义1 针对某一业务数据流,其数据任务为

$$\langle \gamma, M, p, t \rangle \quad (1)$$

式中, γ 为完成该数据任务的数据流, t 为 γ 数据流发生的时间,而 M 为数据流 γ 一共传输的数据量, p 为 γ 数据流所经的网络路径。此外,对于 γ 数据流的流率由式(2)计算:

$$\gamma(\alpha) = \frac{\sum size(p_i)}{\Delta t} \quad (2)$$

式(1)的 $size(p)$ 为数据流 γ 发送的数据包大小,而 Δt 为数据流持续的时间。由于主流业务的流率会随时间不断变化,因此采样时间内流率采用其均值来表示,不同采样时间的同一主流业务切分成两个不同的数据任务来建模。由此,本文将模拟系统中的离散事件与网络业务数据流都转换成数据任务,并可按任务发生时间排成模拟系统的背景事件列表,由列表执行对攻击对抗系统的背景模拟。其中模型相关属性如表1所列。

表1 模型属性描述符号

模型	属性名	符号	描述
数据任务	流	γ	完成数据任务的数据流
	输入流率	$\gamma(\alpha)$	流对于某设备的输入流率
	输出流率	$\gamma(\beta)$	流对于某设备的输出流率
	任务发生时间	t	数据流发生时间
网络设备	任务数据量	$\gamma(M)$	数据源需要发送的数据量
	缓冲区容量	N	网络设备的缓冲区容量
	缓冲区空余量	$N(t)$	t 时刻设备缓冲区剩余容量
	输入汇总流率	$x(t)$	t 时刻设备输入流的总流率
设备	输出最大流率	B	网络设备最大输出流率

表1中网络设备的 N, B 都是由目标网络中实际设备的参数获取。基于上述的符号,对于本文所建系统中的某网络设备的相关数据以“设备标识:属性名标识”表示,如“ $p_i: N$ ”。对于某个 γ 流经过某网络设备则由“ $<$ ”符号来表示,如 $\gamma < P_i$ 。

2 流模拟的实现及其与前景流的融合

2.1 流模拟的实现

由上述可知,模拟系统中某个数据任务或离散事件发生后,将在模拟系统中形成数据流,并将对该流所经过的网络设备或组件的状态产生影响。此外还会影响到其它经过同一设备的业务流与数据包状态。以下将数据流的发生、数据任务的完成及其引发的整个系统各模拟部件状态的变化,称之为模拟事件。对于任一模拟事件,模拟系统都要给予响应与调整。表2中描述了本文所建的模拟系统针对不同网络事件的响应与调整规则。对表2的规则说明如下。

1)规则1:在 t 时刻,若设备的输入缓冲区为空,且其输入总流率小于其输出最大流率,则任一进入该设备的流的输入

流率等于输出流率。

2)规则2:在 t 时刻,设备的输入缓冲区不为空但未满,其输入总流率大于其输出最大流率,则进入该设备的流的输出流率等于该流输入流率占总输入流率的比乘以设备的最大输出流率。此时设备缓冲区的占用量将逐步增加。

3)规则3:当设备的缓冲区为满且总输入流率大于设备最大输出流率时,设备处于阻塞的状态,各输入的数据流会出现相互竞争。本文使用 $test(\gamma)$ 采用概率的形式来判定流的竞争结果,任一流竞争成功的概率为 $\rho = \gamma(\alpha) / p_i : x(t)$,即流竞争成功的可能性取决于其流率占设备输入总流率的比例大小。若流竞争失败,则该流与设备的链接将中断,需要重新创建链接。

4)规则4:当设备的输入总流率小于其最大输出流率,且输入缓冲区不为空时,各流的输出流率仍是规则2定义的比例计算所得流率,显然设备的缓冲区占用量将随时间而减少。规则4描述了一个流的输出流率可能大于其输入流率。

表2 流模拟事件响应规则

规则	条件	动作
规则1	$\exists p_i, t, p_i \in NA \wedge p_i : N(t) = 0 \wedge p_i : x(t) \leq p_i : B$	$\forall \gamma, \gamma < p_i, \gamma(\alpha) = \gamma(\beta)$
规则2	$\exists p_i, t, p_i \in NA \wedge p_i : N(t) \neq 0 \wedge p_i : N(t) \leq p_i : N \wedge p_i : x(t) \geq p_i : B$	$\forall \gamma, \gamma < p_i, \gamma(\beta) = \frac{\gamma(\alpha)}{p_i : x(t)} \times B$ $p_i : N(t') = p_i : N(t) + (p_i : x(t) - p_i : B) \times (t' - t)$
规则3	$\exists p_i, t, p_i \in NA \wedge p_i : N(t) = p_i : N \wedge p_i : x(t) \geq p_i : B$	$\forall \gamma, \gamma < p_i, test(r) = false \wedge r(\alpha) = 0$
规则4	$\exists p_i, t, p_i \in NA \wedge p_i : N(t) \neq 0 \wedge p_i : x(t) \leq p_i : B$	$\forall \gamma, \gamma < p_i, \gamma(\beta) = \frac{\gamma(\alpha)}{p_i : x(t)} \times B$ $p_i : N(t') = p_i : N(t) + (p_i : x(t) - p_i : B) \times (t' - t)$

上述规则定义了模拟系统中网络设备在模拟事件发生时在输入流率、缓冲区状态发生的变化。基于这些规则,通过设备模拟系统的设备及其链路,以及相关的数据任务列表,就可以实现对模拟系统背景流的流模拟计算。

2.2 背景流与前景流的事例

从上述的规则可以看出,背景流与离散事件主要是通过模拟设备的输入缓冲区占用来影响整个模拟系统的网络行为。因此本文所提的模拟方法中将前景流与背景流分成两个独立的模拟部分,这两个部分分别采用流模拟与包模拟,共同作用于模拟系统中模拟设备的缓冲区。当模拟设备在接收到一个数据包后,将按以下的规则来修改模拟设备中的缓冲区容量:

1)当包到达某一设备时,该设备的缓冲区占用容量为零,则其缓冲区占用量为该数据包的大小,直到模拟设备处理完该包之后,缓冲区的占用量将减去该包长度。

2)若包在 T 时刻到达模拟设备时,该设备缓冲区的剩余容量 $N(T)$ 大于该包长度,则缓冲区剩余容量减去数据包长度;设备按当前输出流率处理包到达前缓冲区剩余容量所需时间 $\Delta t = N(t) / B$,当时间 $T' = T + \Delta t$ 时,开始处理此包。

3)若缓冲区的剩余容量小于包长度,由模拟设备将包映射成流,由式(1)计算数据包所属于的流率,并将该流率提交给流模拟器,流模拟器以该流率进行竞争。如果竞争失败,则该前景流与目标设备的链路中断;如果成功,则按计算所得的包对应流率计算包入缓冲区时间 $\Delta t = size(p) / \gamma(\alpha)$,并在时间 $T' = [N(T) + x(T) * \Delta t] / B$ 时处理该数据包。

3 算法实现

由上述可知,本文实现的模拟技术中流模拟与包模拟是独立运行的。其与包模拟的结合是通过模拟设备将包映射成流,转换成新的流及其流率,加入流模拟来实现的,因此本文

的模拟技术更关注对数据流的模拟实现。本文的模拟算法中称上述的规则触发的动作为模拟事件,然后通过循环处理事件队列,来实现对数据流的模拟。其中事件队列中的事件类型有多种,主要的事件类型及其处理如表 3 所列。

表 3 模拟事件及其处理流程

事件类型	处理流程	说明
新生成流	for each $P_i, \gamma < P_i$ { insertFluid(P_i, γ); Update_fluid($P_i, \gamma, \gamma(\alpha)$); }	若有新数据任务,事件队列插入新生成流事件,在该流路径的设备中插入该流,并更新模拟设备中各流流率。
删除流	for each $P_i, \gamma < P_i$ { Update_fluid($P_i, \gamma, 0$); deleteFluid(P_i, γ); }	若有流竞争失败或完成任务,则在该流经过的模拟设备中将其流率设为 0,更新该设备中各流流率,删除该流。
流率变动	for each $P_i, \gamma < P_i$ {Update_fluid($P_i, \gamma, \gamma(\alpha)$); }	当有某个流的流率发生变动时,则更新其经过的模拟设备中该流的流率以及其它流的流率。
流测试事件	if(test(P_i, γ) == false){ γ .state = test; enter_Event_Queue(fluidTest, γ); for each $\gamma < P_i$ {Update_fluid($P_i, \gamma, 0$); } }	当某个流在竞争中失败后,该流状态变成测试状态,在事件队列中插入下一次测试事件,并将其流过的设备中对应该流的流率置为 0。
模拟时间调整	Update_Buffer(P_i); for each $\gamma < P_i$ {if(receive(γ) == $\gamma(M)$) enter_Event_Queue(deleteFluid, γ); }	一个模拟时间单位结束时,流模拟器更新所有设备缓冲区占用容量,并检查每个流对应的目标服务器设备所接收到的该流数据量。如果该流任务已完成,将其删除。

在数据流的模拟中,表 2 规则的实现是核心内容,以下即为本文所实现流模拟事件响应规则算法。

```

a. Produce Update(p,  $\gamma, \gamma(\alpha)$ )
b. Begin
c.   InitStack(S);
d.   if(p;N(t) == 0  $\wedge$  p;x(t) ≤ B){
e.     Update(next( $\gamma$ ),  $\gamma, \gamma(\alpha)$ );
f.   }else if(p;N(t) ≥ 0  $\wedge$  p;N ≥ p;N(t)  $\wedge$  p;x(t) ≥ B){
g.     S.push(p);
h.      $\gamma(\beta) = [\gamma(\alpha)/p;x(t)] * \gamma(\alpha)$ ;
i.     Update(next( $\gamma$ ),  $\gamma, \gamma(\beta)$ );
j.   }else if(p;N(t) ≥ 0  $\wedge$  p;N = p;N(t)  $\wedge$  p;x(t) ≥ B){
k.     for each  $\gamma, \gamma < p$ {
l.       if(test( $\gamma$ ) = false) Update(p,  $\gamma, 0$ ); }
m.   }
n.   while(S != null){
o.     S.pop();
p.     for each  $\gamma, \gamma < p$ {
q.       Update(p,  $\gamma, \gamma(\alpha)$ ); }
r.   }
s. End.

```

4 实验与分析

4.1 模拟实验

本文以图 1 所示的一个组织内部网络为例,该组织有 4 个部门、1 台 FTP 服务器、1 台数据库服务器以及 2 台 Web 服务器。其中 1 台是业务服务器,1 台是门户网站服务器。该网络中有 5 台路由器,这些路由器的参数如表 4 所列。该组织的数据流主要有 4 个:Router1 至 Router3,即 Fluid:1-0-3,Router1 至 Router2,即 Fluid:1-0-3-2,Router4 至 Router3,即 Fluid:4-0-3,Router4 至 Router2,即 Fluid:4-0-3-2。通过采集的网络数据,由式(2)可得图 2 所示的以上各数据流的流率变化情况。

表 4 模拟路由器参数

路由器	缓冲区	最大包吞吐率	最大输出流率
Router 0	1024M	1Mpps	64Mbps
Router 1	526M	100kpps	6.4Mbps
Router 2	526M	100kpps	6.4Mbps
Router 3	1024M	200kpps	12.8Mbps
Router 4	526M	100kpps	6.4Mbps

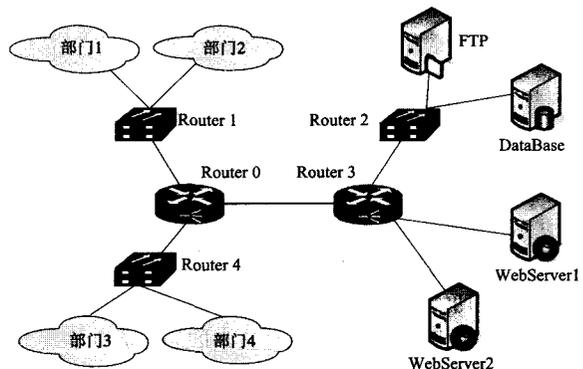


图 1 模拟网络结构图

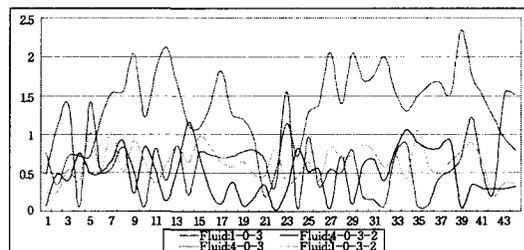


图 2 模拟网络的日常背景流

根据图 2 数据流情况,通过本文的流模拟方法模拟的各路由器缓冲区容量变化情况如图 3 所示。由于 Router1, Router2 在网络传输高峰期缓冲区出现拥塞,因此图 3 中只描绘了 Router1, Router2 缓冲区中可用容量的变化情况。从图中可以看出,虽然 Router1, Router2 出现了拥塞,但程度很轻,未对网络传输造成大的影响。

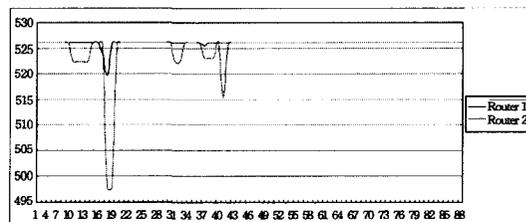


图 3 Router 1 与 Router 2 缓冲区占用情况

基于以上网络模拟场景,本文实现了针对该组织门户网

站的 Web 服务器的 DDOS 攻击,其模拟过程如下:

1) 将前景流 DDOS 攻击数据包转换成相应的流,如图 4 所示,显示的是从中午 10 点半开始至 12 点 20 分的 DDOS 攻击流率变化情况。

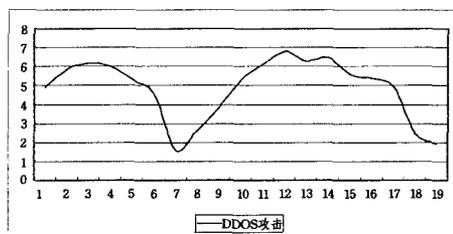


图 4 DDOS 攻击数据包映射所得的流

2) 在以上流模拟建立的基础上,添加该 DDOS 流之后,该组织网络中各路由器缓冲区的容量变化情况如图 5 所示。

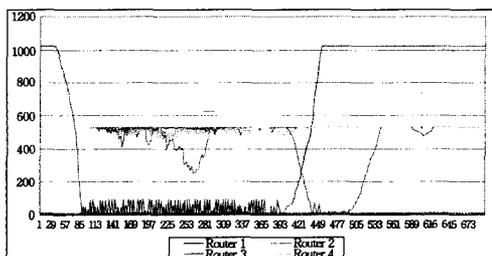


图 5 DDOS 攻击的模拟结果

从图 5 中可以看出,DDOS 发动之后,Router3 缓冲区很快被耗尽,因此各流之间采用概率的方式竞争路由资源,失败的流将会在两个时间片之后重新参与竞争。因此,尽管 Router3 的缓冲区被耗尽,但一旦正常的业务流竞争到 Router3 之后,由于 Router3 的输出流率很大,因此由 Router3 到 Router2 的业务流仍可得到继续服务。因此,从上图中体现为其它的几个路由器在缓冲区容量上有一定变化,而没有耗尽它们的缓冲。但当 DDOS 攻击中止时,由于 Router3 到 Router2 的流在 Router3 中缓存了大量的数据,因此 Router3 全速发送缓存的数据,很快造成 Router2 的缓存被耗尽。从图中可以看出在 DDOS 攻击中断后 1h20min,网络恢复正常。

4.2 实验总结

本文采用 JAVA 语言,基于双核 1.7CPU、内存 1G、Windows 系统的计算机平台实现了以上模拟实验。实验中模拟时间片为 30s,日常网络数据的采集时间片为 15min。通过以上实验总结如下:

(1) 在对日常网络行为的模拟的第一个实验中,路由器缓冲区容量的变化情况与模拟的数据基本吻合,体现了流模拟对背景流模拟具有一定的精确度。此外,对正常情况模拟时,流模拟的速度非常快。实验用时 5.3s 就完成了对整个工作日的网络行为的模拟,这与文献[5]的结论相似。

(2) 在第二个实验中,流模拟的模拟速度有很大的降低,主要原因是路由器阻塞情况下,各流之间竞争,以及竞争后整个网络数据流变化情况的处理耗费了大量的运算资源。随着阻塞情况的加剧,竞争失败的流不断地进行链接测试,又进一步耗费了运算资源,因此流模拟的波动效应^[2]十分明显。以至于第二个实验系统中,必须对 DDOS 攻击的流量加以一定的限定,使其降低到上图中所示的流率,但仍耗时 13min22s 才完成第二个实验。

结束语 针对流模拟的模拟效率高但模拟精度不够,包

模拟的模拟精度高但效率低的特点,本文提出一种新的模拟技术,即将两者相结合,利用流模拟方法模拟网络背景流、网络离散事件,而特定模拟目标采用包模拟的方式,实现了一种兼顾模拟效率与精度的模拟技术。

本文引入数据任务概念,统一描述背景流与网络离散事件的方式,建立了流模拟的相应规则及其与前景流的整合方法,并通过实验验证了本文的模拟技术。与其它同类模拟方法相比,本文提出的模拟技术主要有以下特点:

1) 提出了数据任务作为背景流与离散事件的模型,从而实现将实际网络数据流转换成背景流的途径,因此达到对背景流更精确的模拟。

2) 在模拟模型上,对于数据源模型的状态与其它流模拟方法不同,大多数流模拟是采用文献[1,2],文献[6]泊松分布的开/关状态数据。本文则采用数据任务,数据源为了完成任务而处于开/测试两个状态,使得背景流的建模更为准确。

3) 在文献[3]中,流模拟与包模拟结合中只考虑了流模拟对包模拟的影响,但没有考虑包模拟对于流模拟的影响。本文则通过将包模拟对应的包映射成流,添加到流模拟器中,使不同模拟技术实现的数据流相互影响,从而达到更准确的模拟效果。

4) 本文提出的前景流映射成流,整合背景流与前景流的实现方式,使得前景流与背景流的模拟独立实现,前景流与背景流模拟实现互不影响,因此本文的模拟技术具有很好的扩展性。

通过文中的实验可以看出,流模拟很适用于网络模拟中的背景流的模拟,但流模拟的波动效应对模拟效率也造成很大的影响。在后继工作中,将进一步对流模拟算法进行优化,降低波动效应给流模拟带来的影响,从而提高流模拟的效率。

参考文献

- [1] Liu Yong, Presti F L, Misra V, et al. Scalable fluid models and simulations for large-scale IP networks[M]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 2004, 14: 305-324
- [2] Liu B, Figueiredo D R, Yang J K, et al. Towsley. A study of networks simulation efficiency: Fluid simulation vs. packet-level simulation[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM, 2001:1244-1253
- [3] Liu B, Guo Y, Kurose J, et al. Fluid simulation of large scale networks: issues and tradeoff[C]// International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications PDPTA'99. Las Vegas, NV, 1999: 2136-2142
- [4] Riley G F, Jaafar T M, Fujimoto R M. Integrated Fluid and Packet Network Simulations[C]//Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, 2002:511
- [5] Nicol D M, Yan Guanhua. High-performance Simulation of Low-Resolution Network Flows[J]. Simulation, 2006, 82(1):21-42
- [6] Liu Guanhua, Figueiredo D R, Yang Guo J K, et al. A study of networks simulation efficiency: Fluid simulation vs. packet-level simulation[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM, 2001:1244-1253
- [7] Kiddle C, Simmonds R, Williamson C, et al. Hybrid Packet/Fluid Flow Network Simulation[C]//IEEE/ACM Workshop on Parallel and Distributed Simulation(PADS). 2003:143-152