

基于第二价拍卖理论的 P2P 网络组播节点激励机制研究

王浩云¹ 徐焕良¹ 任守纲¹ 张 晨²

(南京农业大学信息科技学院 南京 210095)¹ (解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)²

摘 要 P2P 组播在面对 P2P 节点不合作行为和恶意行为时无法保障服务的可靠性。针对上述问题,提出了基于市场模型的组播模型框架,其利用第二价拍卖理论进行网络资源分配;分析了不同类型组播节点的策略和收益矩阵以及组播节点策略的调整条件,提出了组播节点激励机制。理论分析和仿真实验结果证明了所提组播节点激励机制的有效性。

关键词 P2P 网络,组播,第二价拍卖,激励机制

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Incentive Mechanisms for Multicast Nodes Based on Second-price Auction Theory in P2P Network

WANG Hao-yun¹ XU Huan-liang¹ REN Shou-gang¹ ZHANG Chen²

(School of Information Science & Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)¹

(Institute of Command Automaiton, PLA Science and Technolgy, Nanjing 210007, China)²

Abstract The reliability of P2P multicast performance can't be ensured when facing non-cooperation strategies and malicious behaviours of P2P nodes. The market model based framework of P2P multicast was proposed, which uses second-price auction for network resource allocation. The strategies and payoff matrixes of various multicast nodes were analyzed, as well as the conditions of strategy adjustment. Then the incentive mechanisms were designed for multicast nodes. Theoretical analysis and simulation results demonstrate its effectiveness.

Keywords Peer-to-peer network, Multicast, Second-price auction, Incentive mechanism

1 引言

P2P 网络在原有物理网络的基础上,通过构造一个虚拟网络,屏蔽了物理网络的异构性和不确定性,在动态异构的物理网络环境下提供了个性化、能适应业务变化且满足即时需求的服务。P2P 网络通常由一组 P2P 节点构成,而 P2P 节点又是从基础网络层中的物理节点中选取和部署的。与传统的 Client/Server 模式不同,每个 P2P 节点都能够同时作为服务的请求方和提供方。

应用层组播^[1,2]利用 P2P 网络技术,将组播功能从路由器移到 P2P 节点上,由 P2P 节点完成诸如成员管理、数据包复制和分发等功能。与传统 IP 组播^[3]相比,它的优势在于:组播服务的部署相对容易;具有较高的可靠性和可扩展性,可以动态地适应网络环境的变化,实现服务定制。现有 P2P 网络组播协议^[4-7]和算法通常是针对特定的全局优化目标,为所形成的组播拓扑链路分配带宽。如: Narada 算法^[5]通过网络拓扑中形成最小生成树的方法,保证所得的组播树具有较低的端到端延时; SplitStream 算法^[7]为单个源节点构造了多个多播树,提高了网络吞吐量。还有研究建议,将数据分解后

从不同路径传输,以明显提高组播服务的性能。

由于 P2P 网络高度的动态性,集中控制存在众多问题,对 P2P 网络分布式地管理成为必然。在分布式管理模式下, P2P 网络中隶属于不同的物理网络和用户的各个 P2P 节点都可以自我控制、自我管理和自我优化。然而,由于 P2P 节点的自私性^[8],为了追求自身利益的最大化,其不考虑全局优化目标,因而导致服务性能恶化。此外,由于 P2P 节点的自主性允许节点可以选择自身的行为策略,导致 P2P 网络组播很容易受到节点恶意行为的危害,如:搭便车 FR(Free-Riding)^[9]、伪造攻击^[10]、共谋(Collusion)^[11]和背叛^[12]等。

传统方式是利用加密和认证来保障组播的安全性和可靠性,但这两种方式在面对 P2P 组播节点的不合作行为和恶意行为时无法发挥作用。许多文献开始研究如何利用博弈理论中的激励机制^[13,14]和分布式定价模型^[15]来协调网络节点的行为,其研究的目的是在保证节点自身利益的同时提高整网的效益。但以往研究结果大多需要假设节点能够知道网络中其他节点的分布以及当前整网资源的使用情况,而这种假设并不现实,因此大多数激励机制在实现网络环境中并不能起到预期的作用。同时,现有算法并未针对组播节点非理性的

到稿日期:2012-02-07 返修日期:2012-04-30 本文受南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ2010022),国家科技部农业成果转化重大项目(2011GB2C100001),国家科技部重大科技支撑计划项目(2011BAK21B05-3),江苏省科技支撑计划重大项目(BE2011398),江苏省科技支撑计划项目(BE2011339),江苏省工业和信息产业转型升级专项引导资金项目(2011C1)资助。

王浩云(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为 P2P 网络、物联网、CPS 相关协议和机制优化设计等, E-mail: why_583@163.com; 徐焕良(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为物联网关键技术;任守纲(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为农业物联网应用技术;张 晨(1980-),男,硕士,讲师,主要研究方向为移动通信。

恶意行为设计相应的激励机制,因此无法保证组播能够在恶劣的 P2P 网络环境中正常工作。

本文提出了一种基于第二价拍卖理论^[16]的 P2P 网络组播节点激励机制。首先利用市场模型对 P2P 网络组播进行建模,并利用第二价拍卖对网络资源进行分配。同时,分析了该框架中各类型组播节点的行为策略和收益矩阵以及节点策略的调整条件,并在此基础上提出了相应的激励机制。理论分析和仿真试验结果证明,所提 P2P 组播节点激励机制能够对组播节点的各种恶意行为进行遏制,激励善意组播节点的合作行为,保证组播服务的有效性。

2 组播模型框架

在 P2P 网络组播中,上游节点将数据转发给下游节点,其转发行为可以看作是组播树中各节点间交易货物,因此本文将引入市场模型来对组播协议进行建模。其中,上游节点和它相邻的下游节点分别为市场中的卖方和买方。如果组播树中的节点同时接收和转发组播数据,则该节点就同时具备卖方和买方的双重身份。由于网络中最主要的资源是网络带宽,因此本文设定市场模型中货物的数量是指上游节点向下游节点进行数据传输时所分配的带宽。买卖双方在交易货物的同时,卖方将向买方收取一定的费用,即所交易货物的价格与数量的乘积,而货物的价格是由市场模型中的定价机制决定的。第二价拍卖机制是一种极为有效的定价机制,相比第一价拍卖机制,它更能够激励用户为了自身收益合理出价,从而避免用户的欺骗行为所造成的“囚徒困境”,因此很多学者研究了其在具有自私节点的网络中的应用。本文中组播市场模型将采用第二价拍卖的方式来制定市场的交易价格。组播树中的下游节点将根据自身需求动态地选择相应的竞价,并提交给相邻的上游节点。上游节点根据定价机制,选择合适的下游节点建立连接,并为数据传输分配带宽资源。

假设节点 j 提交二维竞价 $s_j(t) = (q_j(t), p_j(t))$ 以表示其对资源的需求。其中 $q_j(t)$ 是节点 j 期望获得的带宽分配, $p_j(t)$ 为节点 j 愿为所获带宽支付的单位价格。每个上游节点 i 收到的所有下游节点 $j \in D_i(t)$ 所提交的竞价集合为: $s^i(t) = (s_j(t))_{j \in D_i(t)}$ 。上游节点 i 收到所有下游节点 $j \in D_i(t)$ 的竞价后,将其按照从高到低的顺序进行排列,并选择第二高的竞价 $p_{sec}^i(t)$ 作为交易价格。每个上游节点 i 根据竞价排名从高到低依次给相应的下游节点 $j \in D_i(t)$ 分配带宽 $q_j^i(t)$, 并收取费用 $P_j^i(t) = q_j^i(t) \cdot p_{sec}^i(t)$, 直到上游节点 i 的出口带宽被分配完毕。设定节点 i 发送数据的最大速率为 $C_{i, out}$, 接收数据的最大速率为 $C_{i, in}$ 。根据上述假设,存在如下的约束条件:

$$\sum_{j \in D_i(t)} q_j^i(t) \leq C_{i, out} \quad (1)$$

3 组播节点策略模型

P2P 组播节点按照其本质可以分为两种类型,善意节点 G(Good node)和恶意节点 B(Bad node)。在上述组播模型中,由于 P2P 节点的自主性,其在提交竞价和分配带宽的过程中能够根据自身类型采取不同的策略。

3.1 善意组播节点的行为策略

善意组播节点能够采取的策略有:合作 C(Cooperation)和非合作策略 N(Non-cooperation)。采取合作策略的善意组播节点在向其上游节点提交竞价时将按照自己的实际需求诚

实报价,并根据其下游节点的竞价分配相应的带宽。而采取非合作策略的善意节点将不向其上游节点提交竞价,同时也向其下游节点传输数据,即不参与组播。

3.2 恶意组播节点的行为策略

恶意组播节点能够采取的策略有:合作 C、非合作 N 和共谋策略。不同于善意节点的合作和非合作策略,采取合作策略的恶意组播节点在向其上游节点提交竞价时将压低报价,企图降低上游节点发送数据所获得的收益,同时节点内部将伪造数据或者病毒发送给其下游节点;而采取非合作策略的恶意组播节点在向其上游节点提交竞价时将抬高报价,从而抬高所有下游节点获取组播数据的成本,而节点内部则对数据流量进行丢弃,使其下游节点无法收到源端节点组播的数据。

同时,上游节点的多个恶意下游节点间能够采取共谋策略。即其中部分恶意节点采取合作策略而其它恶意节点采取非合作策略,从而在企图降低其上游节点收益的同时,抬高其它下游节点正常接收组播数据的成本,从而进一步扩大其对组播服务的破坏作用。

3.3 组播节点博弈的收益分析

本节将首先讨论各类型组播节点的收益函数,然后在此基础上对组播节点的策略进行分析。组播节点的收益函数由价值函数和费用函数共同构成。其中,费用函数是节点发送或接收组播数据所获得或支付的费用,价值函数则是指节点接收或发送组播数据所获得的或损失的价值。考虑到带宽是衡量组播服务的重要指标,本文假定组播服务的价值是组播数据的内容和节点所分配到带宽的函数。

表 1 和表 2 分别显示了善意上游节点 $G_{i,U}$ 、善意下游节点 $G_{j,D}$ 和恶意下游节点 $B_{j,D}$ 博弈的收益矩阵。收益矩阵中的收益组合分别代表节点 $G_{i,U}$ 和节点 $G_{j,D}$ 或节点 $B_{j,D}$ 采取不同策略进行博弈时各自的收益。

表 1 善意节点间博弈的收益矩阵

		G _{j,D} (单位收益)	
		C	N
G _{i,U} (单位收益)	C	$u_{i,U}(t), u_{j,D}(t)$	0,0
	N	0,0	0,0

表 1 中:

$$u_{i,U}(t) = \theta_{i,U} \log(1 - \frac{q_j^i(t)}{C_{i, out}}) + q_j^i(t) \cdot p_{sec}^i(t) \quad (2)$$

$$u_{j,D}(t) = \theta_{j,D} \log(1 + \frac{q_j^i(t)}{C_{j, in}}) - q_j^i(t) \cdot p_{sec}^i(t) \quad (3)$$

式(2)和式(3)分别给出了善意上游节点 i 和善意下游节点 j 共同采取合作策略博弈时各自的收益函数。上述两式中,前半部分为价值函数,后半部分为费用函数,且价值函数满足单调、凹性和可微的数学特性。参数 $\theta_{j,D}$ 和 $\theta_{i,U}$ 分别与下游节点 j 所接收的组播数据和上游节点 i 所提供的组播数据相关。而相同的数据内容对不同的上下游节点的价值是不同的,因此参数 $\theta_{j,D}$ 和 $\theta_{i,U}$ 的设置通常也不同。

表 2 善意上游节点和恶意下游节点博弈的收益矩阵

		B _{j,D} (单位收益)	
		C	N
G _{i,U} (单位收益)	C	$u_{i,U}(t), u_{j,D}(t)$	$u_{i,U}(t), u_{j,D}(t)$
	N	0,0	0,0

表 2 中:

$$u'_{i,U}(t) = \theta_{i,U} \log(1 - \frac{q'_i(t)}{C_{i,out}}) + q'_j(t) \cdot p'_{sec}(t) \cdot \alpha_j \quad (4)$$

$$u'_{j,D}(t) = \theta_{j,D} \log(1 + \frac{q'_j(t)}{C_{j,in}}) - q'_j(t) \cdot p'_{sec}(t) \cdot \alpha_j \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别给出了善意上游节点 i 采用合作策略和恶意下游节点 j 采用非合作策略博弈时各自的收益函数。其中, α_j 表达的是采取非合作策略的恶意下游节点对成交价格抬高的程度,也反映出节点 j 的恶意程度。

表 3 显示的是恶意上游节点 $B_{i,U}$ 和善意下游节点 $G_{j,D}$ 博弈的收益矩阵。收益矩阵中的收益组合代表节点 $B_{i,U}$ 和节点 $G_{j,D}$ 采取不同策略进行博弈时各自的收益。其中:

$$u''_{i,U}(t) = q'_j(t) \cdot p'_{sec}(t) \quad (6)$$

$$u''_{j,D}(t) = -\theta_{j,D} \log(1 + \frac{q'_j(t)}{C_{j,in}}) - q'_j(t) \cdot p'_{sec}(t) \quad (7)$$

表 3 恶意上游节点和善意下游节点博弈的收益矩阵

		G _{j,D} (单位收益)	
		C	N
B _{i,U} (单位收益)	C	$u''_{i,U}(t), u''_{j,D}(t)$	0,0
	N	0,0	0,0

如果下游节点 j 收到的组播数据是伪造数据或者病毒时,价值参数应为负数;而如果恶意上游节点 i 发送恶意数据时,参数 $\theta_{i,U}$ 为 0。

由表 1—表 3 可得,同时作为下游节点和上游节点的善意节点 G_j 采取合作策略和非合作策略的收益函数分别为:

$$u_j^{G|C}(t) = \theta_{j,U} \log(1 - \frac{\sum_{k \in D_j^{G|C}(t)} q'_k(t)}{C_{j,out}}) + \sum_{k \in D_j^{G|C}(t)} q'_k(t) \cdot p'_{sec}(t) + \theta_{j,U} \log(1 - \frac{\sum_{k \in D_j^{B|N}(t)} q'_k(t)}{C_{j,out}}) + \sum_{k \in D_j^{B|N}(t)} q'_k(t) \cdot p'_{sec}(t) \cdot \alpha_k + \theta_{j,D} \log(1 + \frac{\sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t)}{C_{i,in}}) - \frac{\sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t) \cdot p'_{sec}(t) - \theta_{j,D} \log(1 + \frac{\sum_{i \in U_j^{B|C}(t)} q'_i(t)}{C_{i,in}}) - \frac{\sum_{i \in U_j^{B|C}(t)} q'_i(t)}{C_{i,in}} - \sum_{i \in U_j^{B|C}(t)} q'_i(t) \cdot p'_{sec}(t)}{C_{i,in}} \quad (8)$$

$$u_j^{G|N}(t) = 0 \quad (9)$$

而同时作为下游节点和上游节点的恶意节点 B_j 采取合作策略和非合作策略的收益函数分别为:

$$u_j^{B|C}(t) = \sum_{k \in D_j^{G|C}(t)} q'_k(t) \cdot p'_{sec}(t) + \theta_{j,D} \log(1 + \frac{\sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t)}{C_{i,in}}) - \sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t) \cdot p'_{sec}(t) \quad (10)$$

$$u_j^{B|N}(t) = \theta_{j,D} \log(1 + \frac{\sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t)}{C_{i,in}}) - \sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t) \cdot p'_{sec}(t) \cdot \alpha_j \quad (11)$$

式中, $U_j(t)$ 表示节点 j 的上游节点集合, $D_j(t)$ 表示节点 j 的下游节点集合, $U_j^{G|C}(t)$ 表示节点 j 的上游节点中是善意节点且采用合作策略的节点集合,其它以此类推。

3.4 组播节点博弈的策略分析

由式(8)和式(9)可知,若 $u_j^{G|C}(t)$ 大于 0,则善意节点 G_j 将采用合作策略,否则将采用非合作策略。但由于信息不对称,善意节点无法判断其上游节点和下游节点的类型,因此无

法根据周围节点的历史行为记录预测下个时间段节点的策略。而“一报还一报”^[17]已经被证明是在恶劣局势中能够鼓励合作、惩罚恶行的常用策略模式,因此善意节点将采取这种方式调整自身的行为策略,保障自身的利益最大化。其策略调整算法:

- 善意节点 i 在加入组播时采取合作策略;

- 如果善意节点 i 在时间段 t 内的收益 $u_i(t)$ 大于 0,则在时间段 $t+1$ 内继续采取合作策略;

- 如果善意节点 i 在时间段 t 内的收益 $u_i(t)$ 小于 0,则在时间段 $t+1$ 内采取非合作策略,退出组播;但为了尽可能获取收益,节点 i 将在时间段 $t+2$ 内尝试再次重新加入。

而对于恶意组播节点来说,由式(10)和式(11)可得,当满足条件 $\sum_{k \in D_j^{G|C}(t)} q'_k(t) \cdot p'_{sec}(t) > \sum_{i \in U_j^{G|C}(t)} q'_i(t) \cdot p'_{sec}(t) \cdot (1 - \alpha_j)$ 时,善意节点 j 将采用合作策略,否则将采用非合作策略。同时,上游节点 i 的多个恶意下游节点 $D_i(t)$ 间能够采取共谋策略,从而进一步扩大其对整个组播服务的破坏作用。否则,如果该上游节点 i 的所有恶意下游节点 $D_i(t)$ 都趋向于采取同一种策略,将无法同时保证对上游节点 i 和后续节点 $D_{j \in D_i(t)}(t)$ 的危害程度最大化。恶意下游节点 $D_i(t)$ 间将通过利益补偿方式实现共谋,即采取优势策略的共谋节点同采取劣势策略的共谋节点共享收益。

4 组播节点激励机制

为了防止恶意下游节点 $j \in D_j^{B|C}(t)$ 采取合作策略压低报价,上游组播节点 i 有权调整自身的最大发送速率 $C_{i,out}$,以保证上游善意组播节点 i 的收益 $u_{i,U}(t) \geq 0$ 。当下游节点的最低报价远低于所有下游节点报价的平均值时,上游善意节点将减少 $C_{i,out}$,从而避免给报价过低的下游节点建立连接并分配带宽资源。

机制 1 如果 $\min(p_{j \in D_i(t)}(t)) < \text{avg}(p_{j \in D_i(t)}(t))/2$,则 $C_{i,out}(t+1) = C_{i,out}(t)/2$ 。

机制 1 中,符号 avg 表示均值。而当下游节点总体报价恢复正常水平时,上游善意节点将逐步恢复原有 $C_{i,out}$ 值,以增加与下游节点的连接。

机制 2 如果

$$\min(p_{j \in D_i(t)}(t+1)) \geq \text{avg}(p_{j \in D_i(t)}(t+1))/2$$

则 $C_{i,out}(t+2) = 1.5 \times C_{i,out}(t+1)$ 。

为了防止恶意上游节点 i 采取非合作策略,其下游善意节点 $j \in D_j^G(t)$ 在收到上游恶意节点所发送的伪造数据或病毒时,将采用“一报还一报”的策略在 $t+1$ 时刻退出组播,而在 $t+2$ 时刻再次重新加入。

机制 3 如果 $u''_{j \in D_i^G(t),D}(t) < 0$,则 $j \in D_j^{B|N}(t+1)$,且 $j \in D_j^{G|C}(t+2)$ 。

本节将继续讨论恶意组播节点面对上述激励机制时的行为策略。当下游恶意组播节点采用合作策略时,上游善意节点将根据相应的激励机制减少其最大发送速率,大部分恶意节点都将因报价过低而无法与上游善意节点建立连接。考虑到下游节点间存在共谋,原先共谋节点中采取合作策略的恶意节点将趋向采用非合作策略。而采用非合作策略的恶意节点的下游善意节点将根据相应的激励机制断开与其上游节点的连接,重新选择其他节点作为上游节点。综上所述,本文所提 P2P 组播节点激励机制能够对组播节点的各种恶意行为进行遏制,激励善意组播节点的合作行为,保证组播服务的有效性。

5 仿真及分析

5.1 仿真环境

本文利用 C 语言模拟了 P2P 网络中基于第二价拍卖理论的组播服务,以验证所提激励机制的有效性。仿真中,节点 0 为根节点,为其它节点提供服务,其它组播节点分为善意和恶意两类。每个仿真回合结束后,各类组播节点将根据本回合收益来决定下回合所采取的策略;而当 5 个仿真回合结束后,若组播节点的综合收益低于背叛门限值,将改变自身的节点类型。为了简化仿真实验,组播节点的其它参数设置基本相同,如表 4 所列。

表 4 仿真参数列表

参数	描述	初始值
N_{total}	节点总数	500(个)
$N_{neighbor}$	初始邻居节点数	5(个)
G_p	善意节点初始比例	30%, 70%
R	仿真回合数	200, 500(回合)
$M_{initial}$	节点初始金额	500
B_t	背叛门限	10
θ_U, θ_D	服务内容参数	1, 10
$C_{i,in}$	节点最大接收速率	5(Mbps)
$C_{i,out}$	节点最大发送速率	5(Mbps)

本文同时对相同网络环境中无激励机制时的组播服务进行仿真,并对两种仿真场景下组播节点类型的演化、节点策略的演化以及组播节点收益的演化进行对比分析,以评估所提激励机制的有效性。

5.2 结果及分析

图 1 显示的是不同初始条件下施加激励机制和无激励机制时组播节点类型的演化趋势。可以看出,当 G_p 初始值为 0.3 和 0.7 时,施加激励机制能够使善意节点占有所有节点数量的比例提高 10% 左右。这同时也意味着恶意节点所占比例将会对应下降。

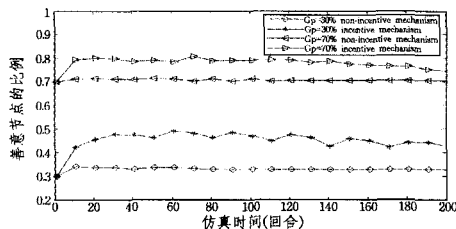


图 1 善意节点类型的演化趋势

图 2 显示的是不同初始条件下施加激励机制和无激励机制时各类组播节点不同策略的演化趋势。可以看出,当 G_p 初始值为 0.3 和 0.7 时,施加激励机制能够使得更多的善意节点倾向采用合作策略。这样能够鼓励善意节点参与组播,从而提高组播的服务性能。而且,当 G_p 初始值较低时,施加激励机制所起到的作用更为明显,这说明本文所提激励机制能够适用于较为恶劣的网络环境。

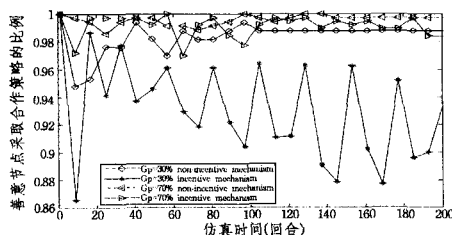


图 2 善意节点采取合作策略的演化趋势

图 3 和图 4 显示的是不同初始条件下施加激励机制和无激励机制时各类型组播节点平均收益的演化趋势。图 3 中,当无激励机制时,不同初始条件下,网络稳定后善意节点的平均收益均不超过 0,而施加激励机制后,善意节点的平均收益要超过不采用激励机制的情况,且初始条件越差,平均收益提高的程度越好。

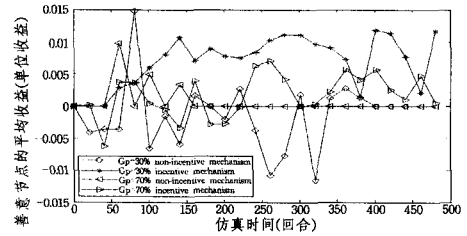


图 3 善意节点平均收益的演化趋势

图 4 中,施加激励机制后,恶意节点的平均收益开始下降,且初始恶意节点所占比例越多,其平均收益下降幅度越大。这说明,本文所提激励机制能够遏制恶意节点收益,从而迫使恶意节点背叛。

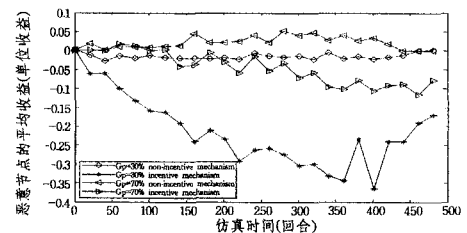


图 4 恶意节点平均收益的演化趋势

结束语 本文所提出的基于第二价拍卖理论的 P2P 网络组播节点激励机制能够对组播节点的各种恶意行为进行遏制,激励善意组播节点的合作行为,保证组播服务在面对 P2P 组播节点复杂行为策略时的可靠性。理论分析和仿真实验验证了所提激励机制的有效性,为进一步设计高效可靠的 P2P 组播协议提供了理论依据。

参考文献

- [1] Yang D Y, Liao W J. On Bandwidth-Efficient Overlay Multicast [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(11): 1503-1515
- [2] Zhang W Z, Zheng Q H, Li H F, et al. An Overlay Multicast Protocol for Live Streaming and Delay-guaranteed Interactive Media [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(1): 20-28
- [3] Perlman R. Models for IP Multicast [C]// 12th IEEE International Conference on Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004: 678-682
- [4] Kang H J, Oh H R, Song H. Overlay Real-Time Video Multicast System [J]. IEICE Transactions on Communication, 2010, 93(4): 879-888
- [5] Feng L X, Yan B P, Luo W M. Overlay Multicast Network Optimization and Simulation Based on Narada Protocol [C]// 10th International Conference on Advanced Communication Technology. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008: 2215-2220
- [6] Tan X R, Datta S. Building Multicast Trees for Multimedia Streaming in Heterogeneous P2P Networks [C]// Systems Communications 2005. 2005: 141-146

(下转第 53 页)

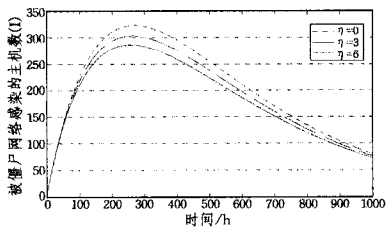


图3 被僵尸网络感染的主机数随时间的变化图

图3中, $\eta=0$ 对应的曲线即为经典的感染率为常数的情况。显然当 $\eta=3$ 和6时,被感染主机的最大值要小于 $\eta=0$ 时的感染数。因此具有常量感染率的模型在预测僵尸网络的传播行为时会高估感染规模。

最后,为了观察预先免疫措施对模型的影响,取参数 $\delta=0$,其它参数值与图3的取值相同。得到的模拟结果如图4所示。

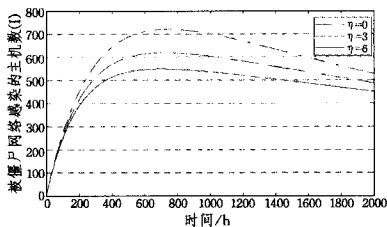


图4 被僵尸网络感染的主机数随时间的变化图

对比图3和图4发现,在考虑预先免疫措施的模型中,感染的最大主机数远远小于不考虑免疫措施的模型,而且被感染主机的减少速度也远远大于不考虑免疫措施的模型。说明不考虑预先免疫措施的模型会高估被感染主机数,而且会低估主机的恢复速度。

结束语 僵尸网络作为一种有组织的网络攻击平台,已经对网络安全造成了很大的威胁。数学建模对研究已有僵尸网络传播的特性以及预测未来僵尸网络的传播动力学是一种非常有效的手段。本文结合僵尸网络传播的特点以及Internet的实际情况,提出了新的具有变化感染率的僵尸网络传播模型。模型同时考虑了预先免疫措施对僵尸网络传播的影

响。模拟实验对比了本文提出的考虑时区因素和变化感染率的模型与已有模型的差异。结果表明,具有变化感染率的僵尸网络传播模型能更准确地反映实际Internet上僵尸病毒的传播特性。因而本文提出的模型对预测未来僵尸网络的传播行为有很好的指导意义。网络安全人员可以根据模型中相关参数反映的情况,采取相应的对策来维护网络安全。今后将结合网络拓扑结构的特点对模型进行进一步改进。

参考文献

- [1] Song L P, Jin Z, Sun G Q. Modeling and analyzing of botnet interactions [J]. *Physica A*, 2011, 390(2): 347-358
- [2] 江健, 诸葛建伟, 段海新, 等. 僵尸网络机理与防御技术[J]. *软件学报*, 2012, 23(1): 82-96
- [3] 邓君, 张兆心, 张淼, 等. 基于僵尸网络的攻击验证模型研究[J]. *微计算机信息*, 2011, 27(1): 187-189
- [4] 李润恒. 大规模网络中僵尸网络分析技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010
- [5] 杜勤, 吕光丽, 苏忠, 等. P2P僵尸网络研究与进展[J]. *计算机科学*, 2011, 38(10A): 66-71
- [6] 诸葛建伟, 韩心慧, 周永林, 等. 僵尸网络研究[J]. *软件学报*, 2011, 19(3): 702-715
- [7] 方滨兴, 催翔, 王威. 僵尸网络综述[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(8): 1315-1331
- [8] Barford P, Yegneswaran V. A Inside Look at Botnet [J]. *Malware Detection*, 2007, 27: 171-191
- [9] Dagon D, Zou C C, Lee W. Modeling Botnet Propagation Using Time Zones [C] // *Proceedings of 13th Annual Network and Distributed System Security (NDSS'06)*. 2006
- [10] Bridwell L M, Tippett P. ICSA Labs 9th Annual Computer Virus Prevalence Survey [M]. ICSA Labs, 2004
- [11] 冯丽萍, 王鸿斌, 冯素琴. 改进的SIR计算机病毒传播模型[J]. *计算机应用*, 2011, 31(7): 1891-1893
- [12] 冯丽萍, 王鸿斌, 冯素琴. 基于生物学原理的计算机网络病毒传播模型[J]. *计算机工程*, 2011, 37(11): 155-157
- [13] 马知恩, 周义仓. 传染病动力学的数学建模与研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [14] 孙玉星, 赵燕飞, 李娅, 等. 基于概率博弈的无线自组网信任推荐激励策略的研究[J]. *计算机科学*, 2011, 38(4): 65-71
- [15] Xie F, Liu F M, Yang R R, et al. Game-Based Incentive Mechanism for Cooperation in P2P Networks [C] // *Fourth International Conference on Natural Computation*. Computer Society, 2008: 498-501
- [16] 林玉清, 朱琦, 朱洪波. 认知Ad hoc网络中基于市场的三级频谱分配方案[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(3): 643-648
- [17] Forges F, Orzach R. Core-stable Rings in Second Price Auctions with Common Values [J]. *Journal of Mathematical Economics*, 2011, 47(6): 760-767
- [18] Amor D R, Fort J. Effects of Punishment in a Mobile Population Playing the Prisoner's Dilemma Game [J]. *Physical Review*, 2011, 84(6): 1-10
- [19] Venkataraman V, Yoshida K, Francis P. Chunkyspread: Heterogeneous Unstructured Tree-Based Peer-to-Peer Multicast [C] // *14th IEEE International Conference on Network Protocols*. IEEE, 2006: 2-11
- [20] Hales D. From Selfish Nodes to Cooperative Networks-Emergent Link-based Incentives in Peer-to-Peer Networks [C] // *Fourth International Conference on Peer-to-Peer Computing*. IEEE, 2004: 151-158
- [21] Feldman M, Papadimitriou C, Chuang J. Free-riding and White-washing in Peer-to-Peer Systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(5): 1010-1019
- [22] Yang M, Feng Q, Dai W F. A Multi-dimensional Reputation System Combined with Trust and Incentive Mechanisms in P2P File Sharing Systems [C] // *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. IEEE, 2007: 29-29
- [23] Lian Q, Zhang Z, Yang M. An Empirical Study of Collusion Behavior in The Maze P2P File-sharing System [C] // *27th International Conference on Distributed Computing Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007: 56-56
- [24] Fedotova N, Veltri L. Byzantine Generals Problem in The Light of P2P Computing [C] // *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services*. IEEE, 2006: 1-5

(上接第44页)