

# 面向对等网络 SEInR 传播模型的理论分析

丁军平, 蔡皖东

(西北工业大学计算机学院, 710072, 西安)

**摘要:** 针对现有传播动力学模型不能准确描述对等(P2P)网络文件传播过程中的问题,对现有 SEIR 模型进行了改进,并为此建立了 SEInR 传播动力学模型.根据 SEInR 模型的动力学方程组建立了基本再生数的计算公式,用来研究传播模型的无病平衡点和有病平衡点,同时对平衡点的存在性和稳定性进行了详细的理论分析和数学证明.通过对模型中的各种参数变化的仿真分析表明,所提模型能够更准确地模拟 P2P 文件的传播过程,模型参数能够对 P2P 文件传播过程中的影响因素进行准确的描述.

**关键词:** 文件传播;传播动力学;SEInR 模型;基本再生数;平衡点

**中图分类号:** TP393.0 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0031-07

## Theoretical Analysis of SEInR Spreading Model on P2P Specific Information

DING Junping, CAI Wandong

(College of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Improvement of the current SEIR spreading dynamics model is studied and a SEInR spreading dynamics model is established, since the existing spreading dynamics model can not accurately describe P2P file spreading process. The formula of basic reproductive number is established based on the SEInR model dynamics equations. No-disease equilibrium point and disease equilibrium point of the spreading model are studied, and detailed analysis and provability are given to the existence and stability of these equilibrium points. Simulation analysis of each parameter variation in the model is performed. The simulation results show that the improved SEInR model can simulate P2P file spreading process more accurately, and that the influencing factors during the spreading of P2P file can also be accurately described by parameters in the model.

**Keywords:** file spreading; spreading dynamics; SEIR model; basic reproductive number; equilibrium point

随着对等(P2P)网络技术的发展,P2P 文件共享系统已成为互联网上文件发布和下载的主要技术,但是现有的 P2P 网络监控技术是一种整体监测和整体封堵的技术,难以对网络上传输的文件信息进行区分,也缺乏针对特定文件传播规律的研究.P2P 网络上的不良信息越来越多,所以网络监控亟待解决.

流行病传播的数学模型能够很好地描述复杂网

络的传播特性,是复杂网络传播动力学研究的基础.Kermack 等<sup>[1]</sup>为了研究黑死病及瘟疫的流行规律,构造了著名的 SIR 和 SIS 仓室模型,典型的传播模型包括 SI、SIS、SIR 及 SEIR 等<sup>[2-4]</sup>.SEIR 模型是由 Aron 等<sup>[5]</sup>最早提出的,Alves 等<sup>[6]</sup>着重讨论了 SEIR 模型的基本再生数,Chowell 等<sup>[7]</sup>运用 SEIR 模型模拟了 Ebola 病毒的传播并对其中的参数进行了深入的分析和估计.

传播动力学理论在 P2P 网络中的应用主要集

中在对病毒和蠕虫的分析上,冯朝胜等<sup>[8]</sup>对病毒在 P2P 网络中的传播进行了建模和分析,袁华等<sup>[9]</sup>建立了一种适合模拟 EMail 病毒在网络系统内扩散的 E-SEIR 模型,王方伟等<sup>[10]</sup>结合动力学方法提出了一种含有潜伏期且在潜伏期内和感染阶段均具有传染性的病毒模型.病毒和蠕虫是一种主动攻击技术,以上传播模型均属于主动传播模型,而 P2P 文件传播依赖于 P2P 用户的操作,其传播模型属于被动传播模型.

现有的 SEIR 模型所描述的传播过程与 P2P 文件传播过程相类似,如果直接利用现有 SEIR 模型对 P2P 文件传播过程进行分析,将存在以下问题:①在 P2P 文件传播中不能解决易感节点受潜伏节点感染的问题;②在 P2P 文件传播中不能解决部分潜伏节点转换为移除节点的问题;③在 P2P 网络中不能解决新节点的加入和旧节点的永久退出的问题;④不能区分感染者被治愈概率的问题.

综上所述,现有的传播动力学模型不能很好地模拟 P2P 系统节点在文件传播过程中的状态变化,为此本文对现有 SEIR 模型进行了改进,提出了 SEInR 模型,并利用所提模型对各种传播性质进行了详细的分析和证明,最后进行了仿真验证.

## 1 改进模型 的描述

SEInR 模型 的描述与 SEIR 模型类似,即所有个体被抽象为易染者 S、潜伏者 E、感染者 I 和治愈者 R,用  $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$  和  $R(t)$  表示在  $t$  时刻相应个体的数量,用  $N_B(t)$  表示所有个体数量的总和,用  $S_R(t)$ 、 $E_R(t)$ 、 $I_R(t)$  和  $R_R(t)$  表示相应个体数量占  $N_B(t)$  的比例.

对于 P2P 文件传播过程,各参数定义如下:①  $S(t)$  表示网络中还没有开始进行文件下载的节点数;②  $E(t)$  表示网络中正在进行文件下载的节点数;③  $I(t)$  表示网络中拥有完整的文件信息且在线共享并允许其他节点进行文件下载的节点数;④  $R(t)$  表示网络中拥有部分或全部文件信息但停止下载和共享的节点数;⑤  $I(0)$  表示网络中初始拥有文件信息并提供下载的节点数.

根据 P2P 文件传播特点,需要对 SEIR 模型进行改进,使之能够更精确地反映 P2P 文件传播过程中的状态变化.改进后的模型为 SEInR 模型,主要改进内容如下.

- (1)建立潜伏者对易感者的感染机制.
- (2)单位时间内,潜伏者以概率  $p_{ER}$  直接转换为

移除者,以概率  $p_{EI}$  转换为感染者.

(3)考虑新节点的加入和旧节点的退出,新加入的节点均为易感节点,加入概率与退出概率同为  $p_F$ .

(4)根据不同的 P2P 节点对文件信息共享时间的不同,将感染节点  $I$  划分为  $n_I$  个子类  $I_1, I_2, \dots, I_{n_I}$ ,每个子类被治愈的概率为  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n_I}$ .

SEInR 模型的转换过程如图 1 所示.

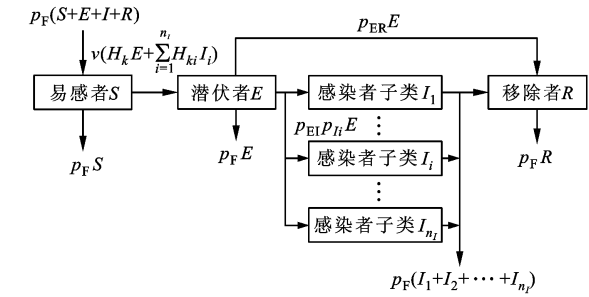


图 1 SEInR 模型传播过程

通过模型转换可获得如下的 SEInR 模型的 动力学方程组

$$\begin{cases} \frac{dS_R}{dt} = p_F - \nu S_R (H_k E_R + \sum_{i=1}^{n_I} H_{ki} I_{Ri}) - p_F S_R \\ \frac{dE_R}{dt} = \nu S_R (H_k E_R + \sum_{i=1}^{n_I} H_{ki} I_{Ri}) - (p_{EI} + p_{ER} + p_F) E_R \\ \frac{dI_{Ri}}{dt} = p_{EI} p_{Ei} E_R - (\delta_i + p_F) I_{Ri} \\ \frac{dR_R}{dt} = p_{ER} E_R + \sum_{i=1}^{n_I} \delta_i I_{Ri} - p_F R_R \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\nu$  为感染概率,体现 P2P 文件被关注的程度;  $H_k$  为潜伏节点的度分布函数;  $H_{ki}$  为  $I_i$  中的节点度分布函数;  $I_{Ri}$  为  $I_i$  中的节点数量占所有节点的比例;  $p_{Ei}$  表示一个新感染节点属于  $I_i$  的概率(进入概率),  $1 \leq i \leq n_I$ , 并且  $I_R = \sum_{i=1}^{n_I} I_{Ri}$ ,  $\sum_{i=1}^{n_I} p_{Ei} = 1$ .

用 SEInR 模型及方程组来描述 P2P 文件传播过程的内容如下.

- (1)易感节点通过发送文件请求来获取节点列表,节点列表中包含潜伏节点和感染节点;易感节点通过与返回节点的连接和文件传输状态转变为潜伏节点.  $dS_R/dt$  表示易感节点的变化.
- (2)潜伏节点既可下载文件,也可上传文件.在文件下载的过程中,潜伏节点以概率  $p_{ER}$  失去下载需求并转变为治愈节点,以概率  $p_{EI}$  完成下载后转变为感染节点.  $dE_R/dt$  表示潜伏节点的变化.
- (3)感染节点对文件进行共享,共享完成后转变

为治愈节点,  $I_i$  根据子类的平均共享时间计算该类的被治愈概率  $\delta_i (1 \leq i \leq n_I)$ ,  $dI_{Ri}/dt$  表示感染者子类的变化。

(4)  $dR_R/dt$  表示治愈节点的变化。

通过以上描述可以看出,用 SEInR 模型及相应动力学方程组可以准确、合理地描述 P2P 文件的传播过程。

## 2 模型性质分析

对于复杂网络的传播动力学模型,应从传播的最终稳态和传播的动态过程进行研究。由于在易感节点、潜伏节点、感染节点的变化过程中未考虑治愈节点的变化因素,所以略去有关治愈节点的变化方程并不影响对整个系统的研究。

记集合  $D_C = \{(S_R, E_R, I_{Ri}) \mid S_R \in [0, 1], E_R \in [0, 1], I_{Ri} \in [0, 1], 1 \leq i \leq n_I\}$ , 显然  $D_C$  是简化动力学方程组的一个正向不变集,所以以下仅在集合  $D_C$  内对方程组进行分析。

模型中的基本再生数  $r_0$  是分析传播动力学模型性能的重要参数。根据文献[11]中的方法可以推导出 SEInR 模型的基本再生数

$$r_0 = \frac{v}{(p_{EI} + p_{ER} + p_F)} \left( H_k + \sum_{i=1}^{n_I} \frac{p_{EI} p_{li} H_{ki}}{(\delta_i + p_F)} \right) \quad (2)$$

### 2.1 平衡点的存在性

系统处于平衡点时,所有仓室中节点数的变化率为 0。利用  $E_R$  表示  $S_R$  和  $I_{Ri}$ , 可得

$$J_{SEInR}(E_0) = \begin{pmatrix} -p_F & -vH_k & -vH_{k1} & \cdots & -vH_{kn_I} \\ 0 & vH_k - (p_{EI} + p_{ER} + p_F) & vH_{k1} & \cdots & vH_{kn_I} \\ 0 & p_{EI}P_{I1} & -(\delta_1 + p_F) & \cdots & 0 \\ 0 & p_{EI}P_{I2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & P_{EI}P_{I(n_I-1)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{EI}p_{ln_I} & 0 & \cdots & -(\delta_{n_I} + p_F) \end{pmatrix}$$

令  $\omega_E = p_{EI} + p_{ER} + p_F$ ,  $p_{Eli} = p_{EI} p_{li}$ ,  $\omega_{li} = \delta_i + p_F$ 。在  $J_{SEInR}(E_0)$  中,其中一个特征根为  $-p_F$ , 另外 2 个特征根均为以下矩阵的特征根

$$\begin{pmatrix} vH_k - \omega_E & vH_{k1} & \cdots & vH_{kn_I} \\ p_{EI1} & -\omega_{I1} & \cdots & 0 \\ p_{EI2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{EI(n_I-1)} & 0 & \cdots & 0 \\ p_{Eln_I} & 0 & \cdots & -\omega_{ln_I} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} S_R = 1 - \frac{(p_{EI} + p_{ER} + p_F)}{p_F} E_R = 1 - \frac{\omega_E}{p_F} E_R \\ I_{Ri} = \frac{p_{EI} p_{li} E_R}{(\delta_i + p_F)} = \frac{p_{Eli}}{\omega_{li}} E_R \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),计算后可得

$$\begin{cases} E_R^* = \left( 1 - \frac{\omega_E}{v(H_k + \sum_{i=1}^{n_I} \frac{H_{ki} p_{Eli}}{\omega_{li}})} \right) \frac{p_F}{\omega_E} = \left( 1 - \frac{1}{r_0} \right) \frac{p_F}{\omega_E} \\ S_R^* = 1 - \frac{\omega_E}{p_F} E_R^* = 1 - \frac{\omega_E}{p_F} \left( 1 - \frac{1}{r_0} \right) \frac{p_F}{\omega_E} = \frac{1}{r_0} \\ I_{Ri}^* = \frac{p_{Eli}}{\omega_{li}} E_R^* = \frac{p_{Eli} p_F}{\omega_{li} \omega_E} \left( 1 - \frac{1}{r_0} \right) \end{cases} \quad (4)$$

当  $r_0 > 1$  时,  $I_{Ri} > 0$ , 相应地  $S_R > 0$ ,  $E_R > 0$ ,  $R_R > 0$ , 表示模型存在有病平衡点  $E^* = (S_R^*, E_R^*, I_{Ri}^*)$ 。

**定理 1** SEInR 传播动力学模型总有无病平衡点  $E_0 = (S_R = 1, E_R = 0, I_{Ri} = 0)$ , 当  $R_0 > 1$  时,除了存在无病平衡点以外,还存在着有病平衡点  $E^* = (S_R^*, E_R^*, I_{Ri}^*)$ 。

### 2.2 传播网络的稳定性

**定理 2** 当  $r_0 \leq 1$  时,SEInR 传播动力学模型的无病平衡点  $E_0 = (S_R = 1, E_R = 0, I_{Ri} = 0)$  是局部渐进稳定的;当  $r_0 > 1$  时,  $E_0$  是不稳定的。

**证明** 对模型的动力学方程组进行 Jacobian 矩阵求解,并带入  $E_0$  得

对该矩阵进行  $n_I$  次初等列变换,对第  $i+1 (1 \leq i \leq n_I)$  列乘以系数  $p_{Eli}/\omega_{li}$  并加到第 1 列上,再将第 1 列中除第 1 行以外的元素置为 0,可得

$$\begin{pmatrix} (vH_k - \omega_E) + \sum_{i=1}^{n_I} \frac{p_{Eli} vH_{ki}}{\omega_{li}} & vH_{k1} & \cdots & vH_{kn_I} \\ 0 & -\omega_{I1} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -\omega_{ln_I} \end{pmatrix}$$

当  $r_0 \leq 1$  时,  $vH_k + \sum_{i=1}^{n_I} p_{EI} vH_{ki} / \omega_{li} \leq \omega_E$ , 所有特征根均不存在正实部, 因此  $E_0$  是局部稳定的;

当  $r_0 > 1$  时,  $vH_k + \sum_{i=1}^{n_I} p_{EI} vH_{ki} / \omega_{li} - \omega_E > 0$ , 至少有一个具有正实部的特征根, 因此  $E_0$  是不稳定的.

**定理 3** 当  $r_0 \leq 1$  时, SEInR 传播动力学模型的无病平衡点  $E_0$  是全局渐进稳定的.

**证明** 构造 Liapunov 函数

$$V_R(t) = p_{EI} E_R + (p_{EI} + p_{ER} + p_F) \sum_{i=1}^{n_I} I_{Ri}$$

$$J_{SEInR}(E_0) =$$

$$\begin{pmatrix} -a_{11} & -S_R^* \omega_E r_0 & -v S_R^* H_{k1} & \cdots & -v S_R^* H_{kn_I} \\ 0 & \frac{\omega_E}{a_{11}} (p_F(r_0 - 1) - 2r_0 \omega_E E_R^*) & \frac{p_F}{a_{11}} v S_R^* H_{k1} & \cdots & \frac{p_F}{a_{11}} v S_R^* H_{kn_I} \\ 0 & 0 & -(\delta_1 + p_F) & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -(\delta_{n_I} + p_F) \end{pmatrix}$$

式中:  $a_{11} = v(H_k E_R + \sum_{i=1}^{n_I} H_{ki} I_{Ri}) + p_F$ . 当  $r_0 > 1$  时, 在有病平衡点  $E^*$  上,  $E_R^* = (1 - 1/r_0) p_F / \omega_E > 0$ . 为了使  $E^*$  是局部渐进稳定的, 需要  $\omega_E (p_F(r_0 - 1) - 2r_0 \omega_E E_R^*) / a_{11} < 0$ . 通过反推法, 可得  $\omega_E (p_F(r_0 - 1) - 2r_0 \omega_E E_R^*) / a_{11} < 0 \Rightarrow p_F(r_0 - 1) < 2r_0 \omega_E E_R^* \Rightarrow p_F(r_0 - 1) < 2p_F(r_0 - 1) \Rightarrow 1 < 2$ .

由于  $1 < 2$  恒成立, 因此  $E^*$  是局部渐进稳定的.

**定理 5** 当  $r_0 > 1$  时, SEInR 传播动力学模型的唯一有病平衡点  $E^*$  是全局渐进稳定的.

**证明** 令  $E_R = E_R^* (1 + x_E)$ ,  $I_{Ri} = I_{Ri}^* (1 + y_{li})$ ,  $1 \leq i \leq n_I$ , 构造 Liapunov 函数

$$\begin{cases} V_R(t) = -V_0 + \sum_{i=1}^{n_I} V_i \\ V_0 = \frac{x_E^2}{2} \\ V_i = \frac{H_{ki} I_{Ri}^*}{\delta_i + p_F} (y_{li} - \ln(1 + y_{li})), \quad 1 \leq i \leq n_I \end{cases}$$

$$\frac{dV_R(t)}{dt} = -\left(p_F + \sum_{i=1}^{n_I} H_{ki} I_{Ri}^* (1 + y_{li})\right) x_E^2 -$$

$$\frac{dV_R(t)}{dt} = p_{EI} \frac{dE_R}{dt} + (p_{EI} + p_{ER} + p_F) \sum_{i=1}^{n_I} \frac{dI_{Ri}}{dt} = \omega_E p_{EI} E_R (r_0 S_R - 1)$$

由于  $0 \leq S_R \leq 1$ , 所以当  $r_0 \leq 1$  时,  $dV_R(t)/dt \leq 0$ , 且只有在无病平衡点  $E_0 = (S_R = 1, E_R = 0, I_R = 0)$  上  $dV_R(t)/dt = 0$ . 由 Lasalle 不变性原理和极限方程理论可知, 当  $r_0 \leq 1$  时, SEInR 传播动力学模型的无病平衡点  $E_0$  是全局渐进稳定的.

**定理 4** 当  $r_0 > 1$  时, SEInR 传播动力学模型的唯一有病平衡点  $E^*$  是局部渐进稳定的.

**证明** 将有病平衡点  $E^*$  代入 Jacobian 矩阵, 再经简化后得

$$E_R^* (1 + x_E) \sum_{i < j; i, j=1}^{n_I} \frac{v^2 p_{li} I_{Ri}^*}{(\delta_i + p_F)(1 + y_{li})(1 + y_{lj})} \frac{v^2 p_{lj} I_{Rj}^*}{(y_{lj} - y_{li})^2} \leq 0$$

只有在有病平衡点  $E^*$  上,  $x_E = 0, y_{li} = 0, 1 \leq i \leq n_I$ ,  $dV_R(t)/dt = 0$ . 由定理 4、Lasalle 不变性原理以及极限方程理论可知, 当  $r_0 > 1$  时, SEInR 传播动力学模型的有病平衡点  $E^*$  是全局渐进稳定的.

综合以上的 SEInR 模型分析, 结论如下: ①当  $r_0 \leq 1$  时, 模型存在无病平衡点  $E_0$ , 且  $E_0$  是全局渐进稳定的; ②当  $r_0 > 1$  时, 模型存在无病平衡点  $E_0$  和唯一的有病平衡点  $E^*$ , 其中  $E_0$  是不稳定的,  $E^*$  是全局渐进稳定的.

### 3 仿真分析

本文通过数据仿真对所提 SEInR 模型进行了分析. 感染节点  $I$  可划分为 3 个子类: 长时间共享子类  $I_1$ 、临时共享子类  $I_2$  和搭便车子类  $I_3$ . 当特定信息大小为 600 MB、节点平均下载速度为 100 kB/s、测量的单位时间为 10 min 时, 相应的参数设置如下:  $p_{EI} = 0.1$ ;  $v = 0.015$ ;  $H_k = 10$ ;  $p_{ER} = 0.001$ ;  $p_F = 0.001$ ;  $S(0) = 99.999$ ;  $I_i(0) = (1, 0, 0)$ ;  $H_{ki} = (20,$

10,2); $p_E=(p_{I1},p_{I2},p_{I3})=(0.01,0.39,0.6)$ ;  $\delta_i=(0.000\ 1,0.3,0.95)$ . 用感染概率  $v$  来代表 P2P 文件被关注的程度,在其他参数固定不变的情况下,将  $v$  值分别设置为 0.01、0.015、0.03,基本再生数  $r_0$  经过计算后分别为 2.90、4.35、8.71. SEInR 传播模型中  $I_R$  的变化如图 2 所示. 从图 2 可以看出,感染概率越大,感染高峰到来得越快,感染高峰值越大,感染高峰值下降的速率越快,到达平衡点所使用的时间越短,最终平衡点的  $I_R$  越大. 随着感染概率的增加,图形由平缓变得尖锐,高峰值与平衡点中  $I_R$  的差值越大. 这种情况说明,当感染概率  $v$  较大时, P2P 文件传播过程的变化幅度也比较大.

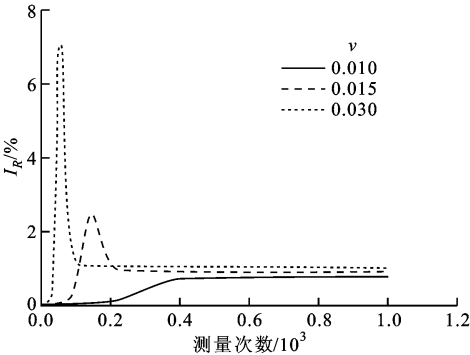


图 2 感染概率对模型的影响

为了分析初始感染节点数对模型的影响,在其他参数固定不变的情况下,将  $I_1(0)$  分别设置为 1、5、20,则模型中  $I_R$  的变化如图 3 所示. 从图 3 可以看出,随着初始感染节点的增加,传播过程中感染高峰出现的时间提前,但是高峰值的大小相同,高峰值出现后的传播过程是相同的. 这种情况说明,初始感染节点的数量只会影响  $I_R$  高峰值出现的时间,不会影响 P2P 文件的整体传播过程.

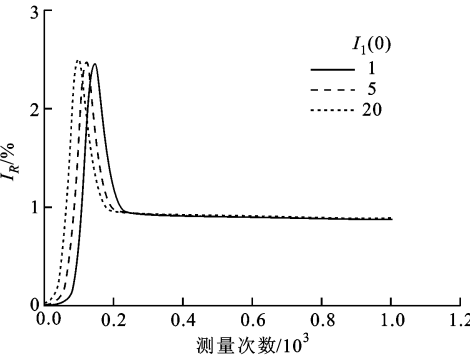


图 3 初始感染节点数对模型的影响

文件大小和下载带宽会影响模型中的参数  $p_{EI}$  和  $p_{ER}$ . 文件越大,节点在潜伏状态的时间越长,相

应的  $p_{EI}$  越小;下载带宽越大,下载时间越少,节点在潜伏状态的时间越短,相应的  $p_{EI}$  越大. 文件大小和下载带宽的比值越大,下载时间越长,提前终止下载的可能性越大,  $p_{ER}$  也就越大. 固定其他参数,将  $p_{EI}$  分别设置为 0.2、0.1、0.01,文件大小分别为 0.05、0.1、1 GB,  $p_{EI}$  对模型的影响如图 4 所示. 从图 4 可以看出,  $p_{EI}$  值越大,  $I_R$  高峰出现得越早,平衡点中  $I_R$  就越大,峰值的大小与  $p_{EI}$  无关,平衡点出现的时间与  $p_{EI}$  也无关. 这种情况说明,文件大小只会影响高峰值出现的时间和平衡点中  $I_R$  的大小. 假设文件下载需要 3 d,  $p_{EI}=0.002$ ,固定其他参数,将  $p_{ER}$  分别设置为 0.000 1、0.001、0.01、0.1、0.5,则  $p_{ER}$  对模型的影响如图 5 所示. 从图 5 可以看出,随着  $p_{ER}$  的增大,文件传播范围越小,平衡点中的  $I_R$  也就越小. 特别是,当  $p_{ER}=0.5$ 、 $r_0=0.31$  时, P2P 文件的传播趋向于无病传播.

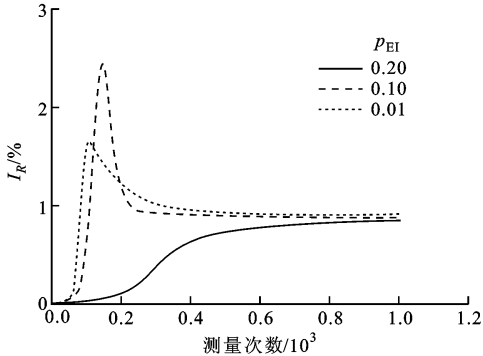


图 4  $p_{EI}$  对模型的影响

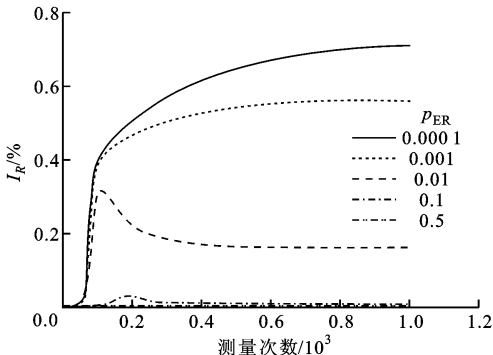


图 5  $p_{ER}$  对模型的影响

不同的感染者子类具有不同的治愈概率和不同的进入概率. 当治愈概率  $\delta_i=(0.000\ 1,0.3,0.95)$  时,进入概率  $p_i$  对模型的影响如图 6 所示. 从图 6 可以看出,当  $p_{I1}$  提高时,传播模型平衡点中的  $I_R$  随之提高,原因是,  $p_{I1}$  的提高,导致长时间在线节点增加,这些节点将以较小的概率转换为治愈节点,使得易感节点的感染率增加,从而导致感染节点的比例

提高.

当进入概率  $p_{li} = (0.01, 0.39, 0.6)$  时,治愈概率  $\delta_i$  分别为  $(0.000\ 1, 0.3, 0.95)$ 、 $(0.01, 0.5, 0.96)$ 、 $(0.1, 0.7, 0.99)$ ,其对模型的影响如图 7 所示.从图 7 可以看出,随着治愈概率  $\delta_i$  的提高,  $I_R$  峰值降低,平衡点中的  $I_R$  迅速降低,特别是当  $\delta_i \geq 0.01$  时,平衡点中的  $I_R \rightarrow 0$ ,模型近似处于无病传播状态.这种情况说明,为了提高 P2P 文件的传播范围,需要增加感染节点的在线时间,特别是长期在线节点的在线时间.

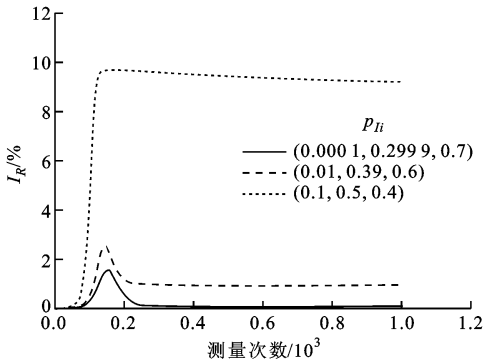


图 6  $p_{li}$  对模型的影响

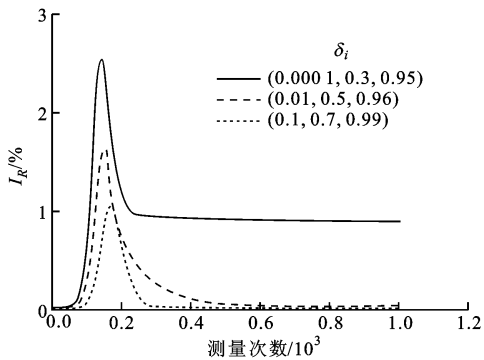


图 7  $\delta_i$  对模型的影响

为了验证 SEInR 传播模型是否能够准确地描述 P2P 文件的传播过程,本文用 NS2 仿真平台进行了模拟,并将传统 SEIR 模型与 SEInR 模型的传播过程进行了比较,结果如图 8 所示.从图 8 可以看出,传统 SEIR 模型的模拟结果与实际情况差距较大,而 SEInR 模型能够较为准确地模拟 P2P 文件的传播过程,且可分析 P2P 文件的传播规律.

## 4 结 论

随着 P2P 网络的不断扩展,需要对 P2P 网络上的特定不良信息进行监测和封堵.P2P 文件的传播过程与传染病的传播过程相类似,所以利用传播动力学理论对 P2P 文件的传播规律进行研究,是 P2P

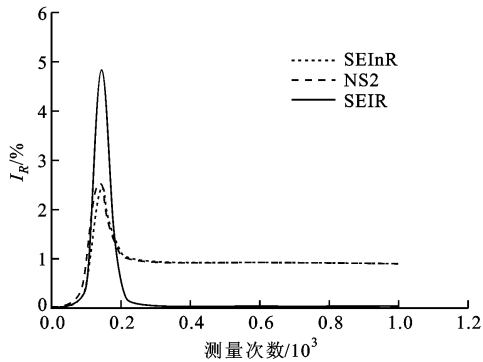


图 8 SEInR 模型效果验证

传播领域的最新研究方向.本文针对 P2P 文件的传播特点,对现有 SEIR 模型进行了改进,提出了 SEInR 模型.该模型的改进内容为:将传统的感染者分为  $n$  个子类,每个子类赋予不同的模型参数,同时应用数学理论对模型的各种性质进行了详细的分析和证明,用仿真的方法对模型进行了验证.结果表明:SEInR 模型能够准确地描述 P2P 文件的传播过程,模型中的参数能够对 P2P 文件传播过程中的影响因素进行准确的描述.

## 参考文献:

- [1] KERMACK W, MCKENDRICK A. Contributions to the mathematical theory of epidemic [J]. Proc Roy Soc, 1932, A13:55-83.
- [2] 马知恩,周义仓,王稳地,等. 传染病动力学的数学建模与研究 [M]. 北京: 科学出版社 2004.
- [3] 张达敏,蔡绍洪,周海平,等. 复杂网络上的一种综合型 SIRS 模型 [J]. 兰州大学学报, 2009, 45(3): 122-126.
- [4] ZHANG Damin, CAI Shaohong, ZHOU Haiping, et al. A unified SIRS model on complex networks [J]. Journal of Lanzhou University, 2009, 45(3): 122-126.
- [5] 史旻,齐勇,杨斌侠. 一种基于子网保护的蠕虫传播模型及其应用 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 788-790.
- [6] SHI Yi, QI Yong, YANG Binxia. Local network based worm propagation model and its application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 788-790.
- [7] ARON J, SCHWARTZ I. Seasonality and period-doubling bifurcations in an epidemic model [J]. Journal of Theoretical Biology, 1984, 110(4): 665-679.
- [8] ALVES D, HAAS V, CALIRI A. The predictive power of  $R_0$  in an epidemic probabilistic system [J].

Journal of Biological Physics, 2003, 29(1): 63-75.

[7] CHOWELL G, HENGARTNER N, CASTILLO-CHAVEZ C, et al. The basic reproductive number of Ebola and the effects of public health measures: the cases of Congo and Uganda [J]. Journal of Theoretical Biology, 2003, 229(1): 119-126.

[8] 冯朝胜, 秦志光, LAURENCE C, 等. P2P 文件中病毒传播建模 [J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1812-1815.

FENG Chaosheng, QIN Zhiguang, LAURENCE C, et al. Modeling of virus propagation in peer-to-peer file-sharing networks [J]. Computer Applications, 2008, 28(7): 1812-1815.

[9] 袁华, 陈国青. 电子邮件病毒传播仿真模型及影响因素模拟 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(11): 1914-1916.

YUAN Hua, CHEN Guoqing. Simulation model of E-mail virus propagation and simulation of its influence factors [J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(11): 1914-1916.

[10] 王方伟, 张运凯, 王长广, 等. Witty 蠕虫的传播模型与分析 [J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(2): 50-54.

WANG Fangwei, ZHANG Yunkai, WANG Chang-guang, et al. Witty worm propagation modeling and analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(2): 50-54.

[11] 刘浩. P2P 网络的若干关键问题研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

面向元信息分类的支持向量机改进技术. 2011, 45(8): 37-42.

一种高效的对等网络流媒体数据调度算法. 2011, 45(6): 20-26.

一种提高云存储中小文件存储效率的方案. 2011, 45(6): 59-63.

应用 BP 神经网络的二次反应清洁汽油辛烷值预测. 2010, 44(12): 82-86.

采用异或算子和椭圆曲线的混合加密机制. 2010, 44(12): 28-31.

一种可定制模块化的闪存转换层的设计与实现. 2010, 44(8): 42-47.

多层前向小世界神经网络的逼近与容错性能. 2010, 44(7): 59-63.

多 P2P 覆盖网络的带宽分配方法. 2010, 44(4): 5-8.

内容寻址网络的 P2P 语义 Web 服务组合系统架构. 2010, 44(2): 6-10.

CorsairFS: 一种面向校园网的分布式文件系统. 2009, 43(8): 43-47.

多输入多输出的异构无线传感器网络时分多址调度算法. 2008, 42(11): 1402-1407.

一种基于子网保护的蠕虫传播模型及其应用. 2008, 42(6): 788-790.

利用统计特征的网络应用协议识别方法. 2009, 43(2): 43-47.

基于复杂网络理论的流程工业系统安全性分析. 2007, 41(7): 806-810.

基于小世界网络的复杂系统故障传播模型. 2007, 41(3): 334-338.

应用控制的 Web 服务器磁盘缓冲方法. 2007, 41(2): 153-157.

[本刊相关文献链接]

采用节点优先级的对等网络流媒体请求量分配算法. 2011, 45(12): 10-15.

(编辑 苗凌)

[文摘预登]

协作通信中联合信道-网络编码的性能分析与资源分配

吕政<sup>1</sup>, 余志军<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网络与通信重点实验室, 200050, 上海;  
2. 无锡物联网产业研究院, 214135, 江苏无锡)

针对无线网络中用户到协作节点和目的节点的上行链路不可靠的问题, 研究了协作通信系统中具有特定协作节点的协作方案. 在用户到协作节点的上行链路不可靠的情况下, 将信道编码、网络编码同时引入到协作通信系统, 建立了基于联合信道-网络编码的协作通信机制, 并推导出系统中断概率的表达式; 以中断概率作为系统性能的衡量标准, 研究了能量分配、码率分配对系统性能的影响, 给出了合适的分配方法. 仿真实验表明, 即使用户到协作节点的上行链路不可靠, 所提协作机制也能获得空间分集, 从而提高了网络的性能.

