

考虑举报机制的SIMR谣言传播模型

邹永镇, 王友国*, 孙先莉

南京邮电大学理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年8月4日; 录用日期: 2024年8月28日; 发布日期: 2024年9月4日

摘要

近年来, 社交网络的流行使谣言的扩散性显著增强, 谣言泛滥给政府相关部门带来了新的挑战。因此, 研究社交网络中的谣言传播意义重大。考虑到社交网络中举报机制对谣言传播的影响, 针对现实生活中谣言传播者可能被他人举报而暂时无法传播谣言的现象, 在SIR谣言模型中引入被禁言者, 提出了一种考虑举报机制的SIMR谣言传播模型。首先, 构建了该谣言模型在同质与异质网络上的平均场方程。其次, 讨论了模型在同质与异质网络中谣言的传播阈值, 并利用Routh-Hurwitz准则分析了模型在无谣言平衡点处的局部渐进稳定性。最后, 利用龙格库塔法求出了系统的数值解, 并通过蒙特卡洛方法分别在WS网络、BA网络以及Facebook网络中进行仿真, 研究举报机制及具体参数对谣言传播的影响。结果表明, 在WS、BA以及Facebook网络中举报机制均能有效抑制谣言传播; 举报率越高, 谣言传播峰值越小; 提高转化率或者降低恢复率不仅能降低谣言传播峰值还能缩短谣言消亡时间。

关键词

社交网络, 谣言传播, 举报机制, SIMR, 蒙特卡洛方法

SIMR Rumor Propagation Model of Considering Reporting Mechanism

Yongzhen Zou, Youguo Wang*, Xianli Sun

School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Aug. 4th, 2024; accepted: Aug. 28th, 2024; published: Sep. 4th, 2024

Abstract

In recent years, the popularity of social networks has significantly enhanced the spread of rumors, posing new challenges to government departments. Therefore, studying the spread of rumors in social networks is of great significance. Considering the impact of the reporting mechanism on

*通讯作者。

rumor spread in social networks, where rumor spreaders may be reported by others and temporarily unable to spread rumors in real life, a SIMR rumor spread model considering the reporting mechanism is proposed by introducing the muted in the SIR rumor model. Firstly, the average field equations of the model on homogeneous and heterogeneous networks are constructed. Secondly, the rumor spread threshold of the model on homogeneous and heterogeneous networks is discussed, and the local asymptotic stability of the model at the rumor-free equilibrium point is analyzed. Finally, the numerical solution of the system is obtained by the Runge-Kutta method, and the impact of the reporting mechanism and specific parameters on rumor spread is studied by Monte Carlo simulations on WS small-world networks, BA scale-free networks, and Facebook networks. The results show that the reporting mechanism can effectively suppress the spread of rumors in WS, BA, and Facebook networks; the higher the reporting rate, the smaller the peak value of rumor spread; increasing the conversion rate or reducing the recovery rate can not only reduce the peak value of rumor spread but also shorten the time for rumor extinction.

Keywords

Social Networks, Rumor Spreading, Reporting Mechanism, SIMR, Monte Carlo Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着互联网技术的不断发展,像 Twitter、Facebook 等社交网络平台已经在全球范围内流行。社交网络的存在让信息传播变得更加便捷,但同时也为谣言传播创造了有利条件。谣言的广泛传播不仅能够迷惑公众,甚至能够引发社会信任危机损害政府公信力[1][2]。因此,研究谣言传播并提出有效的控制策略以减少谣言所带来的危害具有重要意义。

由于谣言传播与病毒感染的过程具有很高的相似性,经典的谣言传播模型大多基于传染病模型。最早的传染病传播模型是由 Kermack 等[3]在研究黑死病时所提出的 SIR 传染病模型。基于 SIR 传染病模型, Daley 和 Kendal [4]提出了 DK 谣言传播模型,随后 Maki 和 Thomson [5]考虑到两个传播者接触时,只有最初的传播者会变成遏制者状态,对 DK 模型进行了改进提出了 MK 模型。至此以后,许多学者通过不同角度改进传染病模型来描述谣言传播。例如, Zhao 等[6]基于遗忘和记忆机制,在 SIR 谣言传播模型上进行拓展新增了冬眠者 H 状态,建立了 SIHR 谣言传播模型。Yu 等[7]考虑到社交网络中信息传播途径的不同,在 SIR 模型中引入了营销号的个体状态,建立了 SIMR 谣言传播模型。吕心怡等[8]同时考虑媒体效应和个人心理因素的问题,提出了新的谣言传播模型,并根据仿真实验阐述了媒体效应和个人的犹豫、遗忘心理因素对社交网络中谣言传播的影响。Zhang 等[9]在 SIR 谣言模型的基础上,通过添加真实信息的传播者,建立了 SITR 谣言传播模型,仿真结果表明,真实信息传播者的初始值越高,谣言传播者的峰值越小,谣言消亡时间更短。Hosni 等[10]针对在线社交网络中的上瘾心理,在谣言传播过程中引入了上瘾者,拓展了 SIR 模型,研究结果表明成瘾心理会扩大谣言的影响,在特定情况下会加速谣言传播。

上述研究对谣言传播领域做出了重要的贡献,但鲜有模型考虑到现实社交网络中举报机制对谣言传播过程的影响。目前,举报机制有关的研究常与食品安全、信息安全、环境治理等[11]-[13]相关。例如,毛晓庆等[11]对引入有奖举报机制前后企业在 Cournot 竞争策略下的博弈分析,最后提出建立有奖举报机制遏制食品安全问题。王忠等[12]通过建立博弈模型,比较了在有无激励的情况下,个人与隐私保护组织

举报行为的收益水平,分析不同举报机制的效果。李玲等[13]通过建立中介效应模型,探究了公众环保举报对大气治理的影响,结果表明公众环保举报对大气污染治理具有直接促进作用。在社交网络中,举报机制是用于净化网络环境的方式之一,它使得公众能够行使举报权利参与网络信息治理[14][15]。例如,在QQ、Twitter及Facebook等社交网络平台上,每个正常用户都可以对其它用户所发的信息进行判别并享有举报权利,若举报成功则被举报的用户可能会受到禁言或封号等处罚从而暂时无法传播信息。因此,受前人研究的启发,本文考虑到社交网络中举报机制对谣言传播过程的影响,针对谣言传播过程中谣言传播者可能会被举报而暂时无法传播谣言的现象,对SIR模型进行拓展,新增了被禁言者的个体状态,构建了一种考虑举报机制的SIMR谣言传播模型。引入了系统的动力学方程,讨论了同质网络与异质网络上谣言的传播阈值,并通过Routh-Hurwitz准则分析了模型在同质网络中无谣言平衡点处的局部渐近稳定性。通过龙格库塔法给出了模型的数值解,利用蒙特卡洛方法进行仿真,研究了举报机制以及具体参数对谣言传播的影响。

2. 考虑举报机制的SIMR谣言传播模型

在考虑举报机制的SIMR谣言传播模型中,将社交网络中用户的个体状态分为以下四类:未知者S、传播者I、被禁言者M、免疫者R。模型的传播规则如下:

(1) 当未知者与传播者接触时,部分的未知者可能会相信谣言,以感染率 λ 变为传播者;而另外的未知者可能不相信谣言,以拒绝率 β 变为免疫者。

(2) 由于免疫者之前接触过谣言,并且不相信谣言或者对谣言不感兴趣。当传播者与免疫者进行接触时,免疫者可能会对谣言传播者进行举报导致传播者以举报率 φ 变为被禁言者;另外,传播者可能存在对谣言失去兴趣或者遗忘谣言的现象,传播者将以移出率 α 转变为免疫者。

(3) 考虑在现实生活中被禁言者能以申诉或其它方式进行解封的情况,一部分被禁言者将以恢复率 ξ 重新转变为传播者;另一部分被禁言者由于被举报后意识到谣言的危害,不再传播谣言,以转化率 θ 转变为免疫者。

根据以上的传播规则,得到其谣言传播模型的状态转移图如图1所示。

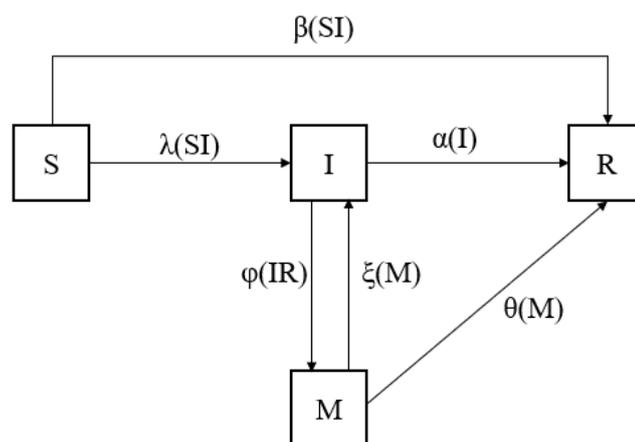


Figure 1. State transition diagram of SIMR rumor propagation model considering reporting mechanism

图1. 考虑举报机制的SIMR谣言传播模型状态转移图

2.1. 同质网络中考虑举报机制的SIMR谣言传播模型

由于同质网络中的度分布服从泊松分布,因此利用平均度 $\langle k \rangle$ 代替同质网络中节点的度。设 $S(t)$ 、 $I(t)$ 、

$M(t)$ 、 $R(t)$ 分别代表 t 时刻未知者、传播者、被禁言者以及免疫者的密度，其密度和在任何时刻都满足 $S(t) + I(t) + M(t) + R(t) = 1$ 。假设在谣言传播的初始时刻，网络中只有一个传播节点而其余节点均为未知者，网络节点数为 N ，则谣言传播开始时刻满足 $S(0) = N - 1/N \approx 1$ ， $I(0) = 1/N \approx 0$ ， $M(0) = 0$ ， $R(0) = 0$ 。基于以上假设及谣言传播规则，在同质网络中建立考虑举报机制的 SIMR 谣言模型的平均场方程为：

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -(\lambda + \beta)S(t)I(t)k \\ \frac{dI(t)}{dt} = \lambda S(t)I(t)k - \varphi I(t)R(t)k + \xi M(t) - \alpha I(t) \\ \frac{dM(t)}{dt} = \varphi I(t)R(t)k - \xi M(t) - \theta M(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \beta S(t)I(t)k + \alpha I(t) + \theta M(t) \end{cases} \quad (1)$$

2.2. 异质网络上的 SIMR 谣言传播模型

由于异质网络的网络拓扑结构具有异质性，因此假设 $S_k(t)$ 、 $I_k(t)$ 、 $M_k(t)$ 、 $R_k(t)$ 分别表示 t 时刻的度为 k 的未知者、传播者、被禁言者以及免疫者的密度，则满足 $S(t) = \sum_k S_k(t)P(k)$ ， $I(t) = \sum_k I_k(t)P(k)$ ， $M(t) = \sum_k M_k(t)P(k)$ ， $R(t) = \sum_k R_k(t)P(k)$ ，其中 $P(k)$ 表示网络中的度分布。基于以上假设及谣言传播规则，在异质网络中建立考虑举报机制的 SIMR 谣言模型的平均场方程为：

$$\frac{dS_k(t)}{dt} = -(\lambda + \beta)kS_k(t)\Theta(t) \quad (1)$$

$$\frac{dI_k(t)}{dt} = \lambda kS_k(t)\Theta(t) + \xi M_k(t) - \varphi kI_k(t) \sum_{k'} P(k'|k)R_{k'}(t) - \alpha I_k(t) \quad (2)$$

$$\frac{dM_k(t)}{dt} = \varphi kI_k(t) \sum_{k'} P(k'|k)R_{k'}(t) - \xi M_k(t) - \theta M_k(t) \quad (3)$$

$$\frac{dR_k(t)}{dt} = \beta kS_k(t)\Theta(t) + \theta M_k(t) + \alpha I_k(t) \quad (4)$$

其中 $\Theta(t) = \sum_{k'} P(k'|k)I_{k'}(t)$ ，表示 t 时刻任意度 k 的节点连接到度为 k' 的传播者的概率， $\sum_{k'} P(k'|k)R_{k'}(t)$ 表示 t 时刻任意度为 k 的节点连接到度为 k' 的免疫者的概率。

3. 同质网络上的动力学分析

3.1. 阈值分析

在初始时刻，网络中只存在一个传播者，其它的节点为未知者。假设谣言在系统中爆发，在传播过程中，被禁言者以及传播者的密度都是先增加，处于峰值后下降，最终为零。而未知者密度保持着下降趋势，免疫者密度保持着上升趋势，最后都趋于稳定。当网络中传播者以及被禁言者的密度为零时，谣言不再传播，系统处于稳定状态。因此，本文从初始条件来讨论传播阈值条件，从而分析系统稳定性[16]。

$$s(0) = -(\lambda + \beta)\langle k \rangle \frac{N-1}{N^2} \quad (5)$$

$$i(0) = \lambda \langle k \rangle \frac{N-1}{N^2} - \frac{\alpha}{N} \quad (6)$$

$$m(0)=0 \quad (7)$$

$$r(0)=\beta\langle k\rangle\frac{N-1}{N^2}+\frac{\alpha}{N} \quad (8)$$

其中 $s(0)$ 、 $i(0)$ 、 $m(0)$ 、 $r(0)$ 分别为初始时刻的未知者、传播者、被禁言者、免疫者的瞬时变化率。在谣言传播初始时刻，未知者的密度将会下降，而其它状态的密度将会上升，此时有 $s(0)<0$ ， $|s(0)|>|m(0)+r(0)|$ ， $m(0)=0$ ， $r(0)\geq 0$ 。

根据式(6)到(9)可得：

$$s(0)+i(0)+m(0)+r(0)=0 \quad (9)$$

因此：

$$i(0)=\lambda\langle k\rangle\frac{N-1}{N^2}-\frac{\alpha}{N}>0 \quad (10)$$

当 $N\rightarrow\infty$ 时，可得：

$$\lambda>\frac{\alpha}{\langle k\rangle} \quad (11)$$

因此，谣言传播阈值为 $\lambda_c=\frac{\alpha}{\langle k\rangle}$ ，当 λ 满足式(12)时，谣言可以在系统中传播。

3.2. 无谣言平衡点的稳定性分析

当系统中的传播者以及被禁言者的密度为 0 时，谣言停止传播，系统达到稳定状态，此时存在无谣言平衡点 $E_0=(S,0,0,R)$ 且 $S+R=1$ 。系统(1)在无谣言平衡点 E_0 处的 Jacobi 矩阵为：

$$J(E_0)=\begin{bmatrix} 0 & -(\lambda+\beta)S\langle k\rangle & 0 & 0 \\ 0 & \lambda S\langle k\rangle-\varphi R\langle k\rangle-\alpha & \xi & 0 \\ 0 & \varphi R\langle k\rangle & -\xi-\theta & 0 \\ 0 & \alpha+\beta S\langle k\rangle & \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

设 μ_i ($i=1,2,3,4$) 为矩阵 $J(E_0)$ 的特征值，则系统(1)在无谣言平衡点处的特征方程为：

$$\mu^2\left[(\lambda S\langle k\rangle-\varphi R\langle k\rangle-\alpha-\mu)(-\xi-\theta-\mu)-\xi R\varphi\langle k\rangle\right]=0 \quad (13)$$

显然 $\mu=0$ 是特征方程的二重根，因此接下来只需要考虑另外两个特征根的正负情况。令 $\sigma=\lambda S\langle k\rangle-\varphi R\langle k\rangle-\alpha$ ，则式 (14)右半部分可化简为：

$$\mu^2+(\xi+\theta-\sigma)\mu-\xi\varphi R\langle k\rangle-(\xi+\theta)\sigma=0 \quad (14)$$

可求得该特征方程的判别式 $\Delta=(\xi+\theta+\sigma)^2+4\xi R\varphi\langle k\rangle$ ，而各参数均为大于 0 的正数，因此该特征方程存在两个实根。根据韦达定理求其根的正负情况，当 $\mu_1^*\mu_2>0$ ， $\mu_1+\mu_2<0$ 时，此时特征根均为负。即：

$$\mu_1^*\mu_2>0\Rightarrow\frac{\lambda S\langle k\rangle(\xi+\theta)+\xi R\varphi\langle k\rangle}{(\xi+\theta)(R\varphi\langle k\rangle+\alpha)}<1 \quad (15)$$

$$\mu_1+\mu_2<0\Rightarrow\frac{\lambda S\langle k\rangle(\xi+\theta)+\xi R\varphi\langle k\rangle}{(\xi+\theta)(R\varphi\langle k\rangle+\alpha)}<1+\frac{(\xi+\theta)^2+\xi R\varphi\langle k\rangle}{(\xi+\theta)(R\varphi\langle k\rangle+\alpha)} \quad (16)$$

结合式(16)与式(17)易得, 当 $\frac{\lambda S\langle k\rangle(\xi+\theta)+\xi R\varphi\langle k\rangle}{(\xi+\theta)(R\varphi\langle k\rangle+\alpha)} < 1$ 时, 其特征值均为负; 反之, 则存在不为负的特征值。因此根据 Routh-Hurwitz 准则[17]可知, 当 $\frac{\lambda S\langle k\rangle(\xi+\theta)+\xi R\varphi\langle k\rangle}{(\xi+\theta)(R\varphi\langle k\rangle+\alpha)} < 1$ 时, 系统(1)在无谣言平衡点 E_0 处局部渐进稳定, 反之则不稳定。

4. 异质网络上的动力学分析

在初始时刻, 假设网络中只存在一个度为 k 的传播者, 因此, $S_k(0) = N - 1/N \approx 1$, $I_k(0) = 1/N \approx 0$, $M_k(0) = 0$, $R_k(0) = 0$ 。设 $q(k') = P(k'|k) = k'P(k')/\langle k \rangle$, 定义如下辅助函数:

$$\begin{cases} \phi(t) = \int_0^t \sum_k q(k) I_k(t') dt' = \int_0^t \langle I_k(t') \rangle dt' \\ \gamma(t) = \int_0^t \sum_k q(k) M_k(t') dt' = \int_0^t \langle M_k(t') \rangle dt' \end{cases} \quad (17)$$

其中 $\langle O(k) \rangle = \sum_k q(k) O(k)$ 。

对方程(2)直接积分可得:

$$S_k(t) = e^{-(\lambda+\beta)k\phi(t)} \quad (18)$$

令方程(3)~(4)分别乘上 $q(k)$, 对 k 求和, 再对 t 进行积分可得:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi(t)}{dt} &= \frac{\lambda}{\lambda+\beta} \left[1 - \langle e^{-(\lambda+\beta)k\phi(t)} \rangle \right] + \xi \int_0^t \langle M_k(t') \rangle dt' \\ &\quad - \varphi \int_0^t \langle kI_k(t') \rangle \langle R_k(t') \rangle dt' - \alpha\phi(t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = \varphi \int_0^t \langle kI_k(t') \rangle \langle R_k(t') \rangle dt' - (\xi+\theta) \int_0^t \langle M_k(t') \rangle dt' \quad (20)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d\gamma(t)}{dt} = 0$, 设 $\phi_\infty = \phi(\infty)$, 因此联立式(20)、(21)可得:

$$\frac{\lambda}{\lambda+\beta} \left[1 - \langle e^{-(\lambda+\beta)k\phi_\infty} \rangle \right] - \frac{\theta\varphi}{\xi+\theta} \int_0^\infty \langle kI_k(t') \rangle \langle R_k(t') \rangle dt' - \alpha\phi_\infty = 0 \quad (21)$$

对方程(3)~(5)分别求积分可得:

$$I_k(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\beta} \left[1 - e^{-(\lambda+\beta)k\phi(t)} \right] + \xi \int_0^t M_k(t') dt' - \varphi \int_0^t kI_k(t') \langle R_k(t') \rangle dt' - \alpha \int_0^t I_k(t') dt' \quad (22)$$

$$M_k(t) = \varphi \int_0^t kI_k(t') \langle R_k(t') \rangle dt' - (\xi+\theta) \int_0^t M_k(t') dt' \quad (23)$$

$$R_k(t) = \frac{\beta}{\lambda+\beta} \left[1 - e^{-(\lambda+\beta)k\phi(t)} \right] + \theta \int_0^t M_k(t') dt' + \alpha \int_0^t I_k(t') dt' \quad (24)$$

用常微分方程法对式(24)求解, 可得:

$$\int_0^t M_k(t') dt' = \varphi \int_0^t e^{(\xi+\theta)(t-t')} \left(\int_0^{t'} kI_k(u) \langle R_k(u) \rangle du \right) dt' \quad (25)$$

将式(26)代入式(23)并对 φ 求高阶无穷小可得:

$$\int_0^t I_k(t') dt' = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+\beta} \left[1 - e^{-(\lambda+\beta)k\phi(t')} \right] e^{\alpha(t'-t)} dt' + o(\varphi) \quad (26)$$

将式(26)以及式(27)分别代入式(23)、(25)可得:

$$I_k(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \beta} [1 - e^{-(\lambda + \beta)k\phi(t)}] - \alpha \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + \beta} [1 - e^{-(\lambda + \beta)k\phi(t')}] e^{\alpha(t'-t)} dt' + o(\varphi) \tag{27}$$

$$R_k(t) = \frac{\beta}{\lambda + \beta} [1 - e^{-(\lambda + \beta)k\phi(t)}] + \alpha \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + \beta} [1 - e^{-(\lambda + \beta)k\phi(t')}] e^{\alpha(t'-t)} dt' + o(\varphi) \tag{28}$$

令 $\phi(t) = \phi_\infty f(t)$, $f(t)$ 为有限函数, 因此式(28)、(29)可化简得:

$$I_k(t) = \lambda k \phi_\infty \left(f(t) - \alpha \int_0^t f(t') e^{\alpha(t'-t)} dt' \right) + o(\varphi) + o(\phi_\infty^2) \tag{29}$$

$$R_k(t) = k \phi_\infty \left(\beta f(t) + \alpha \int_0^t \lambda f(t') e^{\alpha(t'-t)} dt' \right) + o(\varphi) + o(\phi_\infty^2) \tag{30}$$

将式(30)~(31)代入式(22)并化简可得:

$$\lambda \langle \langle k \rangle \rangle \phi_\infty - \frac{\lambda(\lambda + \beta)}{2} \langle \langle k \rangle \rangle \phi_\infty^2 - \frac{\theta \varphi \lambda}{\xi + \theta} \langle \langle k^2 \rangle \rangle \langle \langle k \rangle \rangle \phi_\infty^2 C - \alpha \phi_\infty + o(\varphi^2) + o(\phi_\infty^3) = 0 \tag{31}$$

其中 $C = \int_0^\infty \left(f(t') - \alpha \int_0^{t'} f(t'') e^{\alpha(t''-t')} dt'' \right) \left(\beta f(t') + \alpha \int_0^{t'} \lambda f(t'') e^{\alpha(t''-t')} dt'' \right) dt'$ 为一个有限且正定的积分。易发现, 式(32)其中一个解为 $\phi_\infty = 0$, 另一个解为:

$$\phi_\infty = \frac{\lambda \langle \langle k \rangle \rangle - \alpha}{\frac{\lambda(\lambda + \beta)}{2} \langle \langle k \rangle \rangle + \frac{\theta \varphi \lambda}{\xi + \theta} \langle \langle k^2 \rangle \rangle \langle \langle k \rangle \rangle C} \tag{32}$$

当 $\lambda \langle \langle k \rangle \rangle - \alpha > 0$ 时, ϕ_∞ 存在正解且 $\langle \langle k \rangle \rangle = \frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle}$, 因此可以得到异质网络中的阈值为:

$$\lambda_c = \frac{\alpha \langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \tag{33}$$

当感染率 $\lambda > \frac{\alpha \langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle}$ 时, 谣言可以在异质网络上传播。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $R_k(\infty) = 1 - S_k(\infty)$, 其谣言的最终规模(稳定时免疫者的密度)为

$$R = \sum_k P(k) R_k(\infty) = \sum_k P(k) (1 - e^{-(\lambda + \beta)k\phi_\infty}) \tag{34}$$

5. 仿真实验

利用龙格库塔法[18]求出了考虑举报机制的 SIMR 谣言模型在同质网络上的数值解, 并利用蒙特卡罗模拟在 BA 无标度网络、WS 小世界网络以及 Facebook 网络上进行了仿真实验, 各网络的详细参数如表 1 所示。所有的仿真实验结果都是 100 次独立仿真后得到的平均结果。

Table 1. Detailed parameter table of each network

表 1. 各网络详细参数表

参数	WS 小世界网络	BA 无标度网络	Facebook 网络
节点数	5000	5000	4039
边数	15,000	14,994	88,234
平均度	6	5.998	43.691
最大度	12	263	1045

续表

最小度	3	3	1
平均路径长度	5.2926	4.0349	3.6925
平均聚类系数	0.0811	0.0101	0.6055

5.1. 考虑举报机制的 SIMR 模型谣言传播过程

图 2 中(a)表示模型在同质网络上的数值解, (b)、(c)、(d)分别表示模型在 WS 小世界网络、BA 无标度网络和 Facebook 网络中的谣言传播过程。其中, 模型参数设置为感染率 $\lambda=0.6$, 拒绝率 $\beta=0.4$, 移出率 $\alpha=0.3$, 举报率 $\varphi=0.4$, 恢复率 $\xi=0.2$, 转化率 $\theta=0.2$, 且在谣言传播开始时刻只有一个节点为传播者, 其它节点都为未知者。根据图 2 可知, 在传播过程中, 传播者与被禁言者的密度都是先处于上升的趋势, 在达到峰值后下降, 谣言传播结束时都为 0, 且被禁言者的峰值要比谣言传播者更晚出现; 未知者密度一直处于下降趋势, 免疫节点密度一直处于上升趋势, 谣言传播结束时都处于稳定状态。通过比较图 2 中(b)、(c)、(d)可知, Facebook 网络要比其它网络更快达到谣言峰值, 而 WS 网络到达谣言峰值所花的时间最长; Facebook 网络中的谣言传播峰值和谣言最终规模最小, 而 BA 网络的谣言最终规模要小于 WS 网络。这种现象是因为 hub 节点有更多的邻居节点, 当 hub 节点为传播者时能使更多的邻居节点接触到谣言, 从而加速了谣言传播, 但当 hub 节点转化为免疫者时, 通过举报机制能使得更多的邻居节点从传播者转变为被禁言者, 从而降低了谣言峰值。而 Facebook 网络中的 hub 节点最多, 因此 Facebook 网络中的谣言传播最快, 也最早衰落, 其谣言传播峰值也最小。

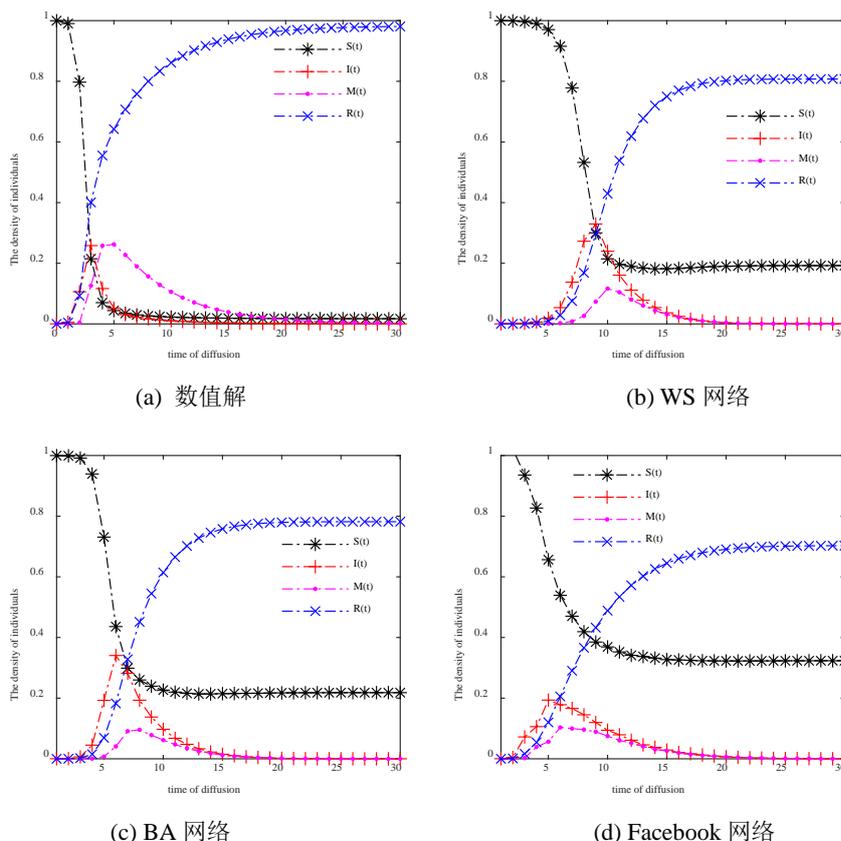


Figure 2. Rumor propagation process of SIMR model in different networks

图 2. SIMR 模型在不同网络中的谣言传播过程

5.2. 举报机制对谣言传播的影响

图3表示SIR与SIMR谣言传播模型在WS小世界网络、BA无标度网络以及Facebook网络中的谣言传播者以及免疫者密度演化过程。从图中可以看出，在保证原有参数不变的情况下考虑举报机制后，三个网络当中的谣言最终规模有明显的降低，谣言的峰值也有所减少，这表明举报机制能有效的抑制谣言传播。因此在现实社交网络中，相关部门可以加大对举报机制相关内容的宣传力度，提高公众对举报机制的认识，进一步提高举报机制在谣言治理的作用，以此降低谣言所带来的危害。

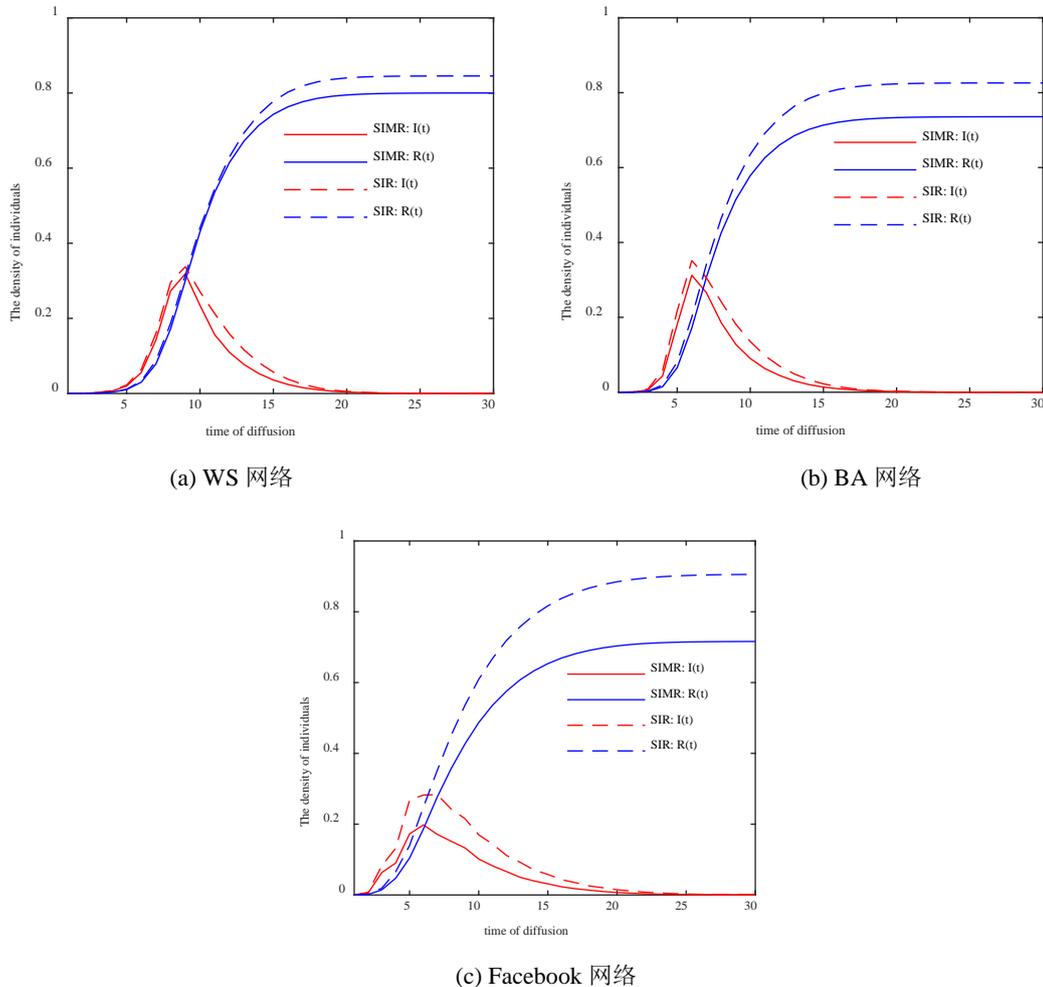


Figure 3. The comparison between SIR and SIMR rumor propagation process
图3. SIR与SIMR谣言传播过程对比图

5.3. 具体参数对谣言传播的影响

图4表示当其它参数不变，举报率发生改变时，SIMR谣言模型在不同网络中传播者密度的变化状况。从图中可以看出，当举报率 ϕ 增加时，谣言的峰值在逐渐减小。这是因为当举报率增加时，谣言传播者更可能被举报从而转变为被禁言者，导致谣言峰值下降。因此，在现实网络中可以加大对辟谣信息的宣传力度以及举报奖励力度让公众更有意愿进行举报操作，从而增加举报率，降低谣言的影响力。

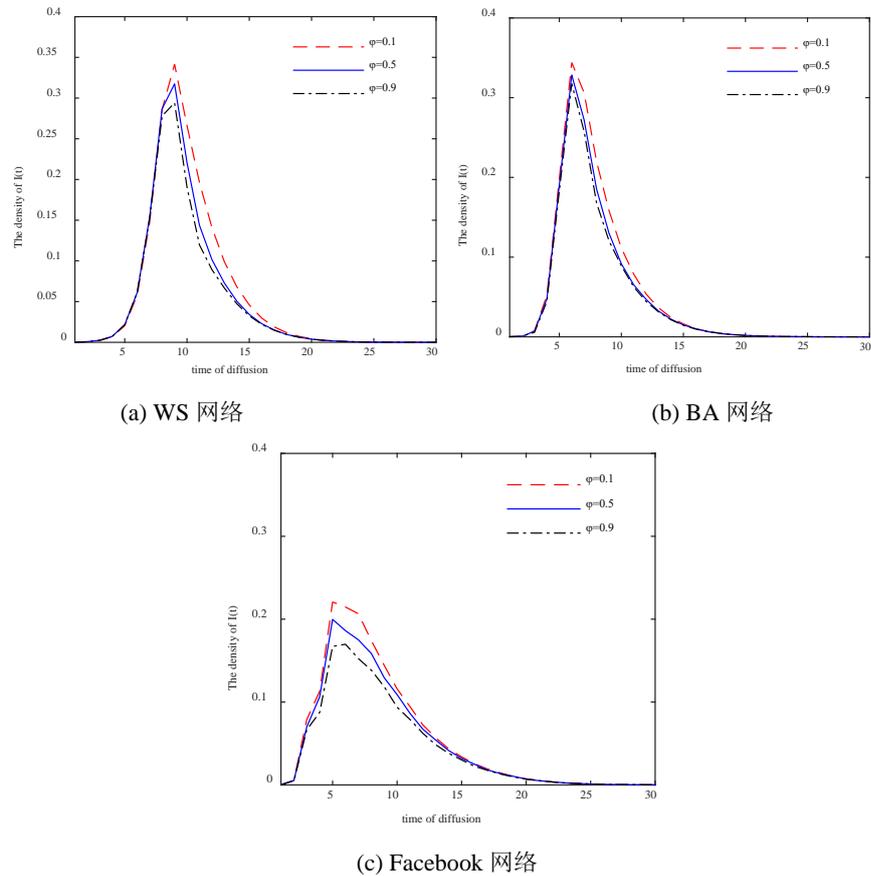
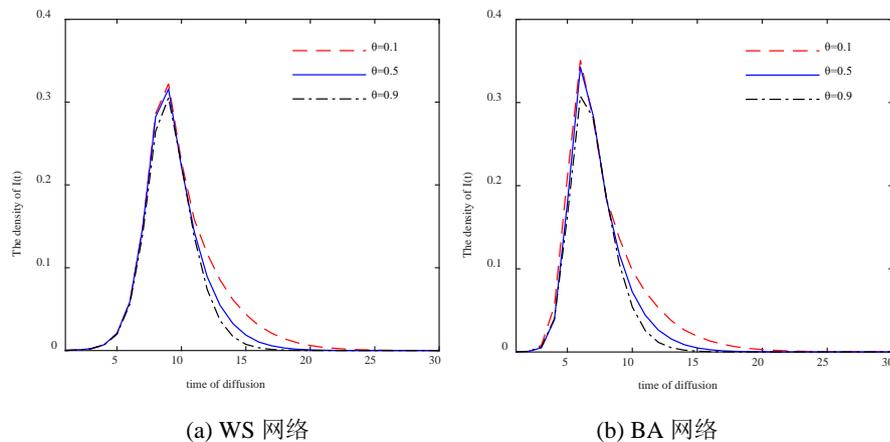
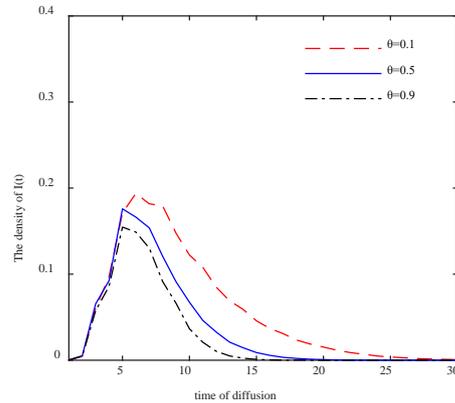


Figure 4. The change of transmitter density in different networks with the change of reporting rate
图 4. 举报率变化时不同网络中传播者密度变化情况

图 5 表示其它参数不变，转化率变化时，SIMR 模型在不同网络中传播者密度的变化状况。从图中可以看出，当转化率提高时，谣言的峰值在不断下降，且谣言消亡时间逐渐缩短。这是因为当转化率增加时，被禁言者解封时会更可能转化为免疫者，并且转化的免疫者可以对传播者进行举报，导致传播者密度下降以及谣言消亡时间缩短。因此，在现实网络中可以通过对被禁言者进行自动发送谣言危害的科普知识以及加大对谣言传播的惩罚力度，使得被禁言者更可能转化为免疫者，从而降低谣言的峰值和缩短谣言消亡时间。



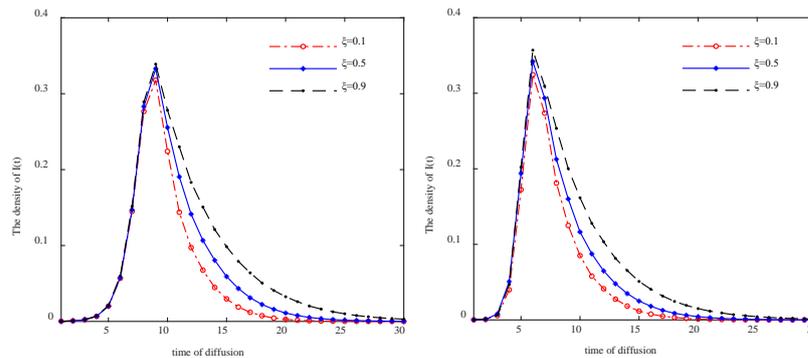


(c) Facebook 网络

Figure 5. Change of spreader density in different networks when recovery rate changes

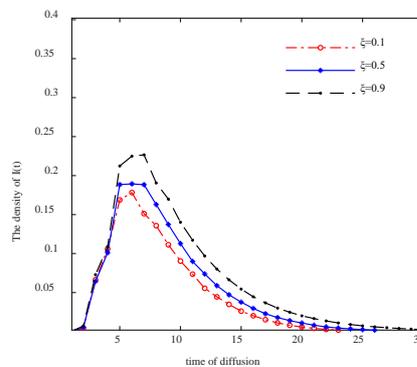
图 5. 恢复率变化时不同网络中传播者密度变化情况

图 6 表示其它参数不变，恢复率变化时，SIMR 模型在不同网络中传播者密度的变化状况。从图中可以看出，当恢复率逐渐增加时，谣言的峰值在不断的变大，谣言的消亡时间也有明显的延迟。因为当恢复率增加时，被禁言者解封时会更可能重新恢复为传播者，导致传播者密度增加，而由于举报机制的存在新增的传播者可能再次被举报，导致谣言消亡时间延长。因此，在现实网络中可以通过加大谣言所带来的负面影响的宣传力度以及谣言传播的惩罚力度，从而降低恢复率，降低谣言所带来的负面影响。



(a) WS 网络

(b) BA 网络



(c) Facebook 网络

Figure 6. The change of transmitter density in different networks when conversion rate changes

图 6. 转化率变化时不同网络中传播者密度变化情况

6. 结论

本文考虑到社交网络中举报机制对谣言传播的影响,对 SIR 模型进行拓展,建立了一种考虑举报机制的 SIMR 谣言传播模型。构建了模型在同质及异质网络上的平均场方程,并讨论了同质网络与异质网络上的谣言传播阈值,根据 Routh-Hurwitz 准则分析了同质网络中无谣言平衡点处的局部渐近稳定性。通过龙格库塔法求出了模型的数值解,并通过蒙特卡洛方法在 WS 网络、BA 网络以及 Facebook 网络中进行了仿真实验,分析了举报机制和各参数对谣言传播过程的影响。仿真结果表明,Facebook 网络中的谣言传播速度最快,在 SIR 模型中考虑举报机制后,谣言传播的峰值以及谣言的最终规模都有所减小;通过提高举报率与转化率、降低恢复率都能够不同程度地抑制谣言的传播。因此,政府部门或社交平台可以加大对谣言传播者的惩罚力度和及时宣传辟谣信息来强化举报机制在谣言传播中的作用,从而抑制谣言的传播。本文建立的模型主要考虑了谣言传播过程中举报机制的影响,然而在现实社交网络中网络拓扑结构变化也会对谣言传播产生影响,因此在未来的研究中将网络拓扑结构变化进一步考虑到模型中,建立更加符合现实的谣言传播模型。

基金项目

国家自然科学基金(62071248)。

参考文献

- [1] 赵勇胜, 侯强, 张磊. 具有交叉传播的 SIMR 谣言传播模型的动力学分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2023, 48(8): 26-32.
- [2] Guo, H. and Yan, X. (2023) Dynamic Modeling and Simulation of Rumor Propagation Based on the Double Refutation Mechanism. *Information Sciences*, **630**, 385-402. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.10.095>
- [3] Kermack, W.O. and McKendrick, A.G. (1927) A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London*, **115**, 700-721.
- [4] Daley, D.J. and Kendall, D.G. (1964) Epidemics and Rumours. *Nature*, **204**, 1118. <https://doi.org/10.1038/2041118a0>
- [5] Maki, D.P. (1973) *Mathematical Models and Applications, with Emphasis on the Social, Life, and Management Sciences*. Pearson College Division.
- [6] Zhao, L., Wang, J., Chen, Y., Wang, Q., Cheng, J. and Cui, H. (2012) SIHR Rumor Spreading Model in Social Networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **391**, 2444-2453. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.008>
- [7] Yu, Y., Liu, J., Ren, J. and Xiao, C. (2022) Stability Analysis and Optimal Control of a Rumor Propagation Model Based on Two Communication Modes: Friends and Marketing Account Pushing. *Mathematical Biosciences and Engineering*, **19**, 4407-4428. <https://doi.org/10.3934/mbe.2022204>
- [8] 吕心怡, 黄贤英, 刘小洋. 融合媒体效应和心理因素的社交网络谣言传播模型[J]. 计算机仿真, 2022, 39(10): 342-348, 419.
- [9] Zhang, J., Guo, H., Jing, W. and Jin, Z. (2019) Dynamic Analysis of Rumor Propagation Model Based on True Information Spreader. *Acta Physica Sinica*, **68**, Article 150501. <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190191>
- [10] Hosni, A.I.E., Li, K. and Ahmad, S. (2020) Analysis of the Impact of Online Social Networks Addiction on the Propagation of Rumors. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **542**, Article 123456. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123456>
- [11] 毛晓庆. 引入有奖举报机制解决食品安全问题的博弈分析[J]. 企业导报, 2012(16): 84.
- [12] 王忠. 大数据时代个人数据隐私泄露举报机制研究[J]. 情报杂志, 2016, 35(3): 165-16879.
- [13] 李玲, 张晓萌, 李洁仪, 等. 公众环保举报对大气污染治理的影响机制研究——基于中介效应模型[J]. 计量经济学报, 2022, 2(3): 703-714.
- [14] 王姝蒙. 新时代优化网络舆论治理的策略研究[J]. 大陆桥视野, 2022(3): 70-72.
- [15] 尹嘉希, 王霁霞. 网络信息举报的规范逻辑与权利边界[J]. 北京警察学院学报, 2020(3): 16-23.

-
- [16] 仓林青. 复杂社交网络上 Si-SIR 谣言传播模型的建模与研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [17] 冉茂洁, 刘超, 黄贤英, 等. 基于个体兴趣度差异和辟谣机制的谣言传播模型[J]. 计算机应用, 2018, 38(11): 3312-3318.
- [18] Bonabeau, E. (2002) Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **99**, 7280-7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>