

面向时间感知的微博传播模型研究

王振飞 张利莹 张行进 李伦

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘要 随着在线社交网络的快速发展,提取信息传播特征和构建传播模型已成为研究热点。针对传统微博网络传播模型未考虑用户的不完整阅读、潜伏期和直接免疫等行为难以准确识别免疫节点的缺陷,通过分析用户的行为特征,提出增加传播的个体分类和完善传播途径的微博网络传播算法(MSILR)。该算法可以使用户根据微博信息的传播特性及时获得、传播和屏蔽信息,根据模型反映的社会关系和在线社会行为完善社交网络的功能。以新浪微博为例,分析微博网络的传播机理和网络参数对信息传播过程的影响,完善动力学演化方程组,刻画信息传播过程随时间的演化规律。在真实微博网络数据集上进行测试,并与传统算法进行比较,实验结果表明了MSILR算法的有效性和可行性。

关键词 微博,信息传播,SIR模型,不完整阅读,潜伏期

中图分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.046

Research on Temporal Perception-oriented Microblog Propagation Model

WANG Zhen-fei ZHANG Li-ying ZHANG Xing-jin LI Lun

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract With the rapid development of online social networks, extracting information propagation characteristics and building the propagation model have become hot research topics. The traditional propagation models of the microblog network have not considered the users' incomplete reading behavior, the incubation period and direct immunization at the same time, so they couldn't accurately identify the immune nodes. In view of these defects, by analyzing the behavior characteristics of the users, the paper proposed a MSLIR which increases the classification of spread individuals and improves the propagation path. The users can get, spread and shield information timely according to the propagation characteristics of microblog information by the algorithm, the function of social network will be improved according to the model response of social relations and online social behaviors. Taking sina microblog as an example, the paper analyzed the effect of the propagation mechanism and network parameters on the processes of information spreading, deduced the dynamic evolution equations and elaborated the temporal evolution rules of the processes of information spreading. Based on the real user datasets of sina microblog, the MSLIR algorithm and its dynamical evolution equations were utilized in the computer simulation for the process of microblog information propagation. Compared with several other representative algorithms, the simulation results show the effectiveness and feasibility of the MSLIR algorithm.

Keywords Microblog, Information propagation, SIR model, Incomplete reading, Incubation period

1 引言

近年在线社交网络(如 Facebook、Twitter、微博、微信、腾讯 QQ 等)表现出非常强劲的发展态势^[1],成为覆盖用户最广、传播影响最大、商业价值最高的 Web2.0 业务。社交网络在人们的生活中扮演着重要的角色,作为人们生活的一部分,其向用户提供多模式信息交流服务^[2],对人们的信息获得、思考和生活产生着重大影响。鉴于社交网络在消息传播中的重

要地位,研究社交网络消息的传播与控制方法具有很强的现实意义。相对于传统的信息传播媒介,例如电视、报纸等,人们只能被动地接受信息,在小范围内进行讨论传播,影响力有限。而对于社交网络,人们不仅能被动地接受所看到的信息,参与讨论互动,并且能作为信息的传播者转发信息,从而主动地传播信息,使好友粉丝能看到自己的观点和意见而发生连锁反应,进而使越来越多的人参与到信息的传播过程中。社交网络兼具媒体发布平台与用户交流平台两大属性,信息可

到稿日期:2016-01-23 返修日期:2016-03-30 本文受郑州大学新媒体公共传播学科招标课题阶段性成果(XMTGGCBJSZ11),河南省科技攻关项目(142102310531)资助。

王振飞(1973—),男,博士,副教授,CCF会员,主要研究方向为社交网络、大数据,E-mail:iezfwang@zzu.edu.cn;张利莹(1988—),女,硕士生,主要研究方向为社交网络、数据挖掘;张行进(1973—),男,博士生,主要研究方向为大数据、机器学习,E-mail:ieixzhang@zzu.edu.cn(通信作者);李伦(1978—),男,博士生,主要研究方向为云计算。

以在社交网络上裂变式传播,速度和广度远远高于传统媒体,因此提取、分析社交网络中信息的传播特征,构建传播模型,有着十分重要的理论价值和现实意义。

在过去的研究中,人们更多地关注了疾病、舆论和谣言等传播现象,并建立了各种网络传播模型。自 Kermack 和 McKendrick 提出经典的传染病动力学模型(Susceptible Infected Removed, SIR)^[3]后,不同领域的研究者根据自己的研究场景对 SIR 模型进行相应的改进,提出了著名的易感感染模型(Susceptible Infected, SI)、易感受感染模型(Susceptible Infected Susceptible, SIS)和易感受感染的易感模型(Susceptible Infected Removed Susceptible, SIRS)等。文献[4-5]提出在社交网络中信息的传播过程和传染病的传播过程极为类似,因此认为 SIR 模型也适用于社交网络中信息的传播。文献[6]建立基于 SIR 模型的在线社交网络信息传播模型,把 SIR 模型应用于在线社交网络的信息传播过程中。文献[7]将传播时间序列聚类分析的结果应用于信息传播的预测。文献[8]考虑到在实际微博信息传播过程中某些粉丝由于信息的即时更新和时间限制而不能看到博主发布的微博内容,在 SIR 模型的基础上提出不完整的阅读行为,进一步细化 SIR 模型中的易感者,提出了 Mb-SIR 模型。文献[9]考虑到微博实际信息的传播过程中易感者与免疫者交互信息时,有一部分易感者可以直接变为免疫者的实际情况,提出了直接免疫的改进 SIR 模型。文献[10-11]在考虑遗忘机制的情况下构造 SIR 模型,用于讨论新媒介的信息传播动力学。文献[12]在考虑直接免疫和遗忘记忆机制的情况下,提出了改进的 SIHR 模型(Susceptible Infected Hibernator Removed, SIHR)来分析在线社交网络的信息传播过程。文献[13]在 SIR 模型的基础上引入一个接触个体,建立 SCIR 传播模型(Susceptible Contacted Infected Removed),分析微博网络中的舆情话题传播过程。文献[14]考虑到潜伏节点多次与传播节点接触而变为传播节点的情况,提出一个具有潜伏期的在线社交网络谣言传播模型——SEIR 模型。

上述的文献研究利用了经典的传染病模型,在 SIR 模型的基础上根据在线社交网络的实际传播情况进行了相应的改进,构建不同的在线社交网络信息传播模型,不仅为微博网络中信息传播过程的进一步研究奠定了很好的基础,也促进了微博信息传播的研究。但上述文献存在不同方面的缺点。如文献[8]在考虑不完整阅读行为的同时忽视了易感者与传播者接触直接变为免疫者的可能性,以及一部分粉丝知道博主内容刚开始不传播但随着好友的多次传播而转变为传播节点的可能性,而在微博的实际传播过程中这种情况是很常见的。文献[9]忽略了微博实际情况的不完整行为和潜伏态节点的可能性。文献[14]虽考虑了潜伏节点的存在,但忽略了微博用户的不完整阅读行为和直接免疫情况等。上述文献或未全面考虑信息在微博中的传播途径,或忽略了潜伏用户的存在。

为了更为真实地反映微博网络中的信息传播规律,结合微博信息传播的实际情况,本文提出一种能更真实地反映微博信息传播过程的 MSLIR 模型(Microblog Susceptible Lurked Infected Removed)。该模型不仅考虑粉丝阅读的不完整阅读行为和直接免疫的情况,而且还考虑粉丝的潜伏传

播情况,增加传播个体分类的同时完善了信息的传播途径。通过对 MSLIR 模型的研究,可以使用户根据信息在微博中传播的特性及时获得、传播和屏蔽信息,例如为了避免不完整阅读行为,用户可以设置对感兴趣用户的特别关注等。同时也可以根据模型中用户的行为特征推测人们的社会关系以及各种在线社会行为完善社交网络的功能,从而促进社交网络的发展。以新浪微博为例,通过相应的数据模拟和抓取,进一步验证 MSLIR 模型的有效性和合理性。

2 传统 SIR 模型

自从 Kermack 与 McKendrick 用动力学的方法建立 SIR 传染病模型以来, SIR 模型便在传染病动力学中得到了广泛的应用。Sudbury 最早借鉴流行病 SIR 模型研究谣言的传播^[3], SIR 模型将个体分为以下 3 类:易感者(susceptibles),其数量记为 $S(t)$,表示 t 时刻未染病但有可能被该类疾病传染的人数;感染者(infectives),其数量记为 $I(t)$,表示 t 时刻已被感染成为病人而且具有传染力的人数;恢复者(recovered),其数量记为 $R(t)$,表示 t 时刻已从染病者中移出的人数。易感者不具有传染能力,但可能被与之相邻的感染者传染而转变为感染者,进而传染他人;感染者可能被治愈而成为恢复者,恢复者不会再次染病,也不会再传染他人。设个体总数为 $N(t)$,则有:

$$N(t) = S(t) + I(t) + R(t) \quad (1)$$

SIR 模型的建立基于以下 3 个假设:

(1) 不考虑人口的出生、死亡、流动等种群动力因素。个体总量始终保持一个常数,即 $N(t) \equiv K$ 。

(2) 一个病人一旦与易感者接触,就必然具有一定的传染力。假设 t 时刻单位时间内,一个病人能传染的易感者数目与此环境内易感者总数 $S(t)$ 成正比,比例系数为 β ,从而在 t 时刻单位时间内被所有病人传染的人数为 $\beta S(t) I(t)$ 。

(3) t 时刻,单位时间内从染病者中移出的人数与病人数量成正比,比例系数为 γ ,单位时间内移出者的数量为 $\gamma I(t)$ 。

在以上 3 个基本假设条件下,易感者从感染到恢复的过程框图如图 1 所示。

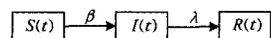


图 1 SIR 过程框图

随时间演化的传播模型可以用微分方程组(2)表示。

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta I(t) S(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta I(t) S(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (2)$$

由于微博的信息传播行为与传染病的传播非常类似,因此把传染病 SIR 模型应用于微博信息的传播过程。在微博网络中,用节点表示用户,用边表示用户之间的关系,用户发布信息后,信息只能沿着边传播,从而节点可以分为易感节点、传播节点和免疫节点。易感节点相当于能看到博主发布的信息,并且有可能成为传播者的节点;感染节点相当于能看到博主发布的信息,并且成为传播者的节点;免疫节点相当于能看到博主发布的信息但不传播信息的节点。

3 MSLIR 模型

在微博中,当一个博主发布信息时,一部分粉丝由于受网络或者时间的限制,不能实时刷新微博中的信息,因此会因信息的即时更新、信息的覆盖而不能看到博主发布的信息,称为不完整阅读行为;而看到此信息的粉丝往往会以一定的概率将此消息转发出去。一部分粉丝由于对博主发布的信息内容不感兴趣进而成为看到信息而不会传播的粉丝,称为直接免疫。一部分粉丝对博主发布的信息内容非常感兴趣进而成为看到信息而传播的粉丝。另一部分粉丝,一开始对博主发布的信息不感兴趣,在好友多次转发的情况下,能多次看到此条消息,当看到的次数达到一定数量时受到好友的影响而以一定的概率进行传播,称为潜伏期。

在传统的 SIR 传播模型中,易感染的个体成为感染者的机率是相同的,不受任何条件的影响。而在微博的传播过程中,微博博主根据自己的时间发布博文,信息即时更新。易感者由于受到时间或者网络的限制不能即时地看到所有的更新信息,因此易感者有可能看不到。

根据上述传播规律,本文改进传统的 SIR 微博传播模型,将传播的个体进行更细致的分类,同时完善信息传播途径。如图 2 所示,将博主的粉丝分为易感染者(S-Susceptible)、潜伏者(L-Lurked)、感染者(I-Infected)、免疫者(R-Removed)。易感者表示还没看到此条博文的粉丝;感染者表示看到了博主的博文,并且传播的粉丝;潜伏者表示看到博主的博文,但不传播的粉丝;免疫者表示看到了博主的博文,但永远不传播的粉丝;同时,还增加了不完整阅读行为和直接免疫的传播情况。

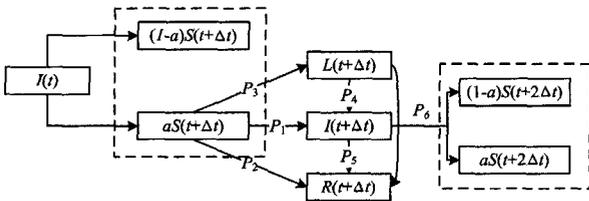


图 2 MSLIR 模型节点状态转移图

Δt 表示两次转发之间的时间间隔。为了简化研究,假设:1)一个用户看到博文后,只传播一次给他所有的粉丝;2)一个博主发布博文,他的粉丝在一个时间间隔里以 α 的概率能阅读到此条博文。

微博网络中信息在易感染者、感染者、潜伏者和免疫者之间转移遵循的传播规则如下:

1)一个阅读到此博文的易感者与感染者接触时,以 P_1 的概率成为感染者;2)一个阅读到此博文的易感者与感染者接触时,以 P_2 的概率成为免疫者;3)一个阅读到此博文的易感者与感染者接触时,以 P_3 的概率成为潜伏者;4)一个潜伏者与感染者接触时,以 P_4 的概率成为感染者;5)一个感染者与免疫者接触时,以 P_5 的概率成为免疫者,由于微博信息的即时效应,一个感染者不会一直传播信息;6)一个潜伏者与免疫者接触时,以 P_6 的概率成为免疫者;7)不考虑用户的增加、减少、流动等种群动力因素,即用户数量始终保持一个常数,即 $N(t) \equiv K$ 。

微博网络上的信息传播的动态过程与节点的度密切相关。本文定义微博网络中, $S(t)$ 表示在 t 时刻还没看到此条博文的粉丝节点占微博网络节点总数的比例,称为易感染节点密度; $I(t)$ 表示在 t 时刻看到博主的博文,并且传播的粉丝节点占微博网络节点总数的比例,称为感染节点密度; $L(t)$ 表示在 t 时刻看到博主的博文,但不传播的粉丝节点占微博网络中节点总数的比例; $R(t)$ 表示在 t 时刻看到博主的博文,但永远不传播的粉丝节点占微博网络节点总数的比例,称为免疫节点密度。显然

$$S(t) + I(t) + L(t) + R(t) \equiv 1 \tag{3}$$

MSLIR 模型可以用微分方程组(4)进行描述。

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -(P_1 + P_2 + P_3)\alpha S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = P_1\alpha S(t)I(t) + P_4L(t)I(t) - P_5I(t) \\ \frac{dL(t)}{dt} = P_3\alpha S(t)I(t) - P_4L(t)I(t) - P_6L(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = P_2\alpha S(t)I(t) + P_5I(t) + P_6L(t) \end{cases} \tag{4}$$

其中第一个式子表示易感染节点的节点密度随时间变化的关系;第二个式子表示感染节点的节点密度随时间变化的关系;第三个式子表示潜伏节点的节点密度随时间变化的关系;第四个式子表示免疫节点的节点密度随时间变化的关系。

4 实验结果分析

4.1 数据采集

选取新浪微博上的用户数据信息作为实验仿真数据集,利用新浪微博提供的 API 接口,采用 Web 爬虫技术进行数据采集,数据的采样时间段为 2015 年 4 月 1 日-2015 年 9 月 30 日。数据采集从某一微博用户出发,根据该用户的关注列表,逐层抓取用户间的关注关系以及每个用户在采样时间段内转发、评论和原创的微博总数。将用户作为节点,用户之间的关注关系作为连接两节点的边。利用抓取到的用户关系数据集,构建包含 1587 个用户节点的微博信息传播底图。利用 Ucinet 软件对该网络的拓扑特征进行分析,该网络的平均出度为 49.15,说明每个节点平均有 49 个关注对象;最大出度为 651,表示某些节点有多达 651 个关注对象;最大入度为 1541,表明某些节点有多达 1541 个“粉丝”;平均最短路径为 3.96,表明该网络具有明显的小世界特性。

4.2 实验结果和讨论

真实的微博信息传播过程受多种因素的影响,微博数据的可操作性比较差,数据仿真是研究网络信息传播的重要方法^[15]。本文使用 Matlab 仿真软件,在构建的微博信息传播底图上,对微博信息传播模型进行了实验仿真。经过 93 次迭代实验,微博网络中不同状态节点的传播演化过程已达到稳定状态,并得到以下实验仿真结果。

(1)各个节点的节点密度的变化

选取网络中出度值最大的节点作为初始传播节点,仿真时所用的参数 $N = 1587, P_1 = 0.02, P_2 = 0.01, P_3 = 0.15, P_4 = 0.006, P_5 = 0.008, P_6 = 0.002$ 。假设初始状态只有一个传播节点,即 $I(0) = 1, \alpha S(0) = N - 1, L(0) = 0, R(0) = 0$ 。图 3 示出了各个节点的节点密度随时间的变化的曲线。如图 3

所示,易感染节点 S 的节点密度随着时间的变化呈递减的趋势,直到最后逐渐趋向于零。潜伏节点 L 的节点密度和传播节点 I 的节点密度随着时间的变化呈先递增而后迅速衰减的状态,直到逐渐趋向于零。免疫节点 R 的节点密度随着时间的变化呈迅速递增趋势,直到最后逐渐趋向于 1。阅读率在微博的信息传播过程中起着重要作用,阅读率越高,易感染节点 S 的节点密度会在较短的时间内迅速地递减为零,传播节点 I 的节点密度会在较短的时间内先递增到最高点然后迅速递减为零。阅读率越高,信息传播的速度越快,参与信息传播的人越多。为了简化模拟真实微博的传播过程,设定阅读率为 1,以已阅读到的博主的粉丝为起点。

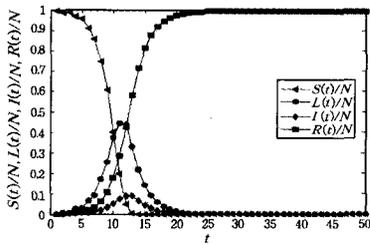


图3 不同节点的节点密度变化图

(2)MSLIR 模型与 SIR 模型和 SCIR 模型的对比

为了验证 MSLIR 模型比以往文献提出的模型更准确、有效地反映出微博的信息传播过程,在相同的数据和仿真条件下,对 MSLIR 模型、SIR 模型和 SCIR 模型进行仿真对比。图 4 示出了各个模型的节点密度的变化情况。相对 SIR 模型,MSLIR 模型潜伏节点的出现(即微博实际传播过程许多开始不转发后来转发的潜伏期影响)使其在信息传播速度和范围上处于明显劣势,即达到稳定状态的时间会更长。而相比 SCIR 模型,MSLIR 模型的直接免疫过程(即易感染状态到免疫状态)使免疫节点达到稳定状态的时间比 SCIR 模型所需要的时间相对短。而在现实中,用户大部分的时间都处于离线状态、潜伏状态,因此不完整阅读行为、潜伏后的免疫、直接免疫有效阻碍了信息的传播。事实上,能使得网络中绝大多数节点都接收某条信息的传播现象还没有出现。因此可以通过微博话题的转发率即传播节点比例来验证 SIR, SCIR, MSLIR 模型的性能。例如,根据“奥斯卡影帝莱昂纳多”在微博上若干次采样的结果估计, SIR, SCIR, MSLIR 模型中接收该信息的节点比例分别约为 51%, 34%, 16%。SIR, SCIR 模型是一种比较理想化的模型,与之相比,MSLIR 模型更接近实际情况,更真实地反映了微博信息的传播过程。

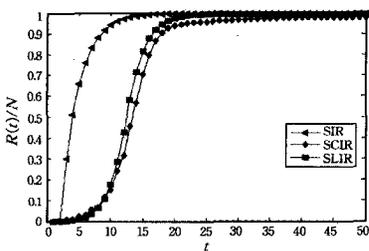


图4 免疫节点密度变化对比图

(3)转发概率 P_1 对信息传播过程的影响

图 5 示出了在其他条件不变的情况下,不同转发概率 P_1 下,免疫节点密度随时间变化的曲线。由图可知:1)在网络达

到稳态之前, $R(t)$ 随 P_1 取值的增大而减小,这是因为 P_1 表示易感染节点转变为传播节点的概率,该概率增大即表明处于易感染状态的节点转发话题博文的可能性增加;2) P_1 取值的改变并不会影响网络中各类节点的最终密度,即 $R(t)$ 最终趋近于 1;3)微博信息传播演化过程达到稳定状态的时间随着 P_1 的增加而延长。

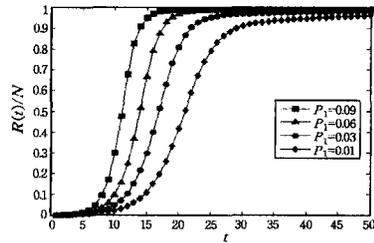


图5 不同转发概率下免疫节点密度变化曲线

(4)直接免疫概率 P_2 对信息传播过程的影响

图 6 示出了在其他条件不变的情况下,不同免疫概率 P_2 下,传播节点密度和免疫节点密度随时间变化的曲线。由图 6 可知:1)在网络达到稳态之前, $R(t)$ 随 P_2 取值的增大而增大,这是因为 P_2 的取值越大,网络中会有更多的易感染节点未经传播状态而直接转变为免疫状态;2) P_2 的取值越小,网络达到稳定状态的时间就越滞后,这是由于随着 P_2 取值的减小,使得易感染节点转变成成为免疫节点的速度减慢,从而导致传播过程达到稳态的时间随之增加;3) P_2 的改变并不会影响网络中各类节点的最终密度,即 $R(t)$ 最终趋近于 1。

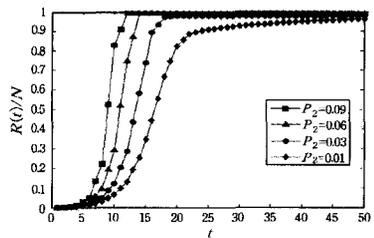


图6 不同免疫概率下免疫节点密度变化曲线

(5)转发概率 P_3, P_4 对信息传播过程的影响

图 7 示出了在其他条件不变的情况下,不同转发率 P_3, P_4 下,免疫节点密度随时间变化的曲线。由图 7 可知:1)在网络达到稳态之前, $R(t)$ 随 P_3, P_4 取值的增大而减小,这是因为 P_3 表示易感染节点转变为潜伏节点的概率,该概率越大,传播节点的可能性也越大, P_4 表示潜伏节点转变为传播节点的概率,该概率增大表明处于潜伏节点转发话题的可能性增加;2) P_3, P_4 取值的改变并不会影响网络中各类节点的最终密度,即 $R(t)$ 最终趋近于 1。

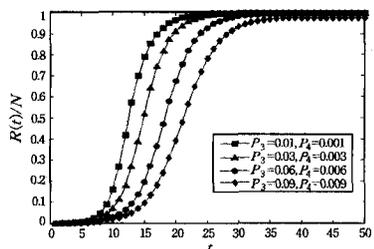


图7 转发概率 P_3, P_4 对信息传播过程的影响

- [15] BISHOP C M. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)* [M]. // Springer-Verlag New York, 2006.
- [16] HASTIE T, TIBSHIRANI R, FRIEDMAN J, et al. *The elements of statistical learning* [M]. New York: Springer, 2009.

- [17] ZHANG W, YUAN S, WANG J, et al. *Real-Time Bidding Benchmarking with iPinYou Dataset* [J/OL]. <https://arxiv.org/abs/1407/7073>.
- [18] HAN J, KAMBER M. *Data Mining: Concepts and Techniques (Second Edition)* [M]. San Francisco, 2006: 1-25.

(上接第 278 页)

通过对 MSLIR 模型的仿真和以往模型的对比以及各个转发概率的比较,可以看出 MSLIR 模型能更准确地描述信息传播规律,反映出信息在微博网络中的传播特性。同时,在微博网络中提出不完整阅读行为,通过微博平台调阅读率,可以有效筛选出危害公共安全的恶意信息,使得积极向上的信息可以得到广泛传播。而新增加的潜伏个体说明信息的广泛传播需要一个潜伏期,对恶意信息可以通过扼杀在潜伏期而有效地控制缩小恶意信息的传播范围。传播的直接免疫情况通过调节免疫概率可以有效遏制恶意信息的传播。以上情况都是传统传播模型未全面考虑的,而 MSLIR 模型通过增加潜伏节点和完善信息的传播途径,可以根据信息随着时间的传播而采取不同的控制措施。

结束语 为了更真实地反映微博网络中信息的传播规律,本文提出了一种更真实地反映微博信息传播过程的 MSLIR 模型。该模型根据现实中微博信息传播的情况,在原有 SIR 模型的基础上增加了粉丝的不完整阅读行为、潜伏节点和直接免疫过程,并把信息传播的途径进行了新的阐述,该模型更适合微博信息的实际传播过程。以新浪微博为例,通过相应的数据模拟和抓取,构建模型的微博信息传播过程,对提出的模型进行了实验仿真,在将其与以往模型对比的同时,分析了模型中各参数的变化对传播过程的影响。仿真结果表明,所提模型可以很好地描述微博信息的传播过程。转发概率 P_1 取值的增大,会增加网络中免疫节点的最终密度。转发概率 P_3 和直接免疫概率 P_2 的变化,都会影响网络达到稳定状态的时间,但不会影响各类节点的最终密度。

本文提出的微博传播模型未考虑看到的粉丝对一个博文事件的多次转发和微博信息传播的空间效果以及可信度等因素,以后的研究应融入这些因素,以进一步完善微博信息传播模型。

参考文献

- [1] ZHAO Y R, WANG Y T, WU M Z. Overlapping Community Detection Based on Node-influence Propagation in Heterogeneous Social Networks [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2015, 36(10): 2190-2196. (in Chinese)
- 赵玉蓉,王铁彤,吴铭泽. 异构社会网络中基于节点影响力传播的可重叠社团发现[J]. *小型微型计算机系统*, 2015, 36(10): 2190-2196.
- [2] LI L Y, SUN L J, YANG J H. Research on Online Social Network [J]. *Computer Science*, 2015, 42(11): 8-21. (in Chinese)
- 李立耀,孙鲁敬,杨家海. 社交网络研究综述[J]. *计算机科学*, 2015, 42(11): 8-21.
- [3] WANG Y Q, JIANG G P. Virus spreading on complex networks with imperfect immunization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 6734-6743. (in Chinese)

- 王亚奇,蒋国平. 复杂网络中考虑不完全免疫的病毒传播研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 6734-6743.
- [4] SUDBURY A J. The proportion of the population never hearing a rumor [J]. *Journal of Applied probability*, 1985, 22(2): 443-446.
- [5] ZHOU J, LIU Z H, LI B W. Influence of network structure on rumor propagation [J]. *Physics Letters A*, 2007, 368(6): 458-463.
- [6] ZHANG Y C, LIU Y, ZHANG H F, et al. The research of information dissemination model on online social network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 60-66. (in Chinese)
- 张彦超,刘云,张海峰,等. 基于在线社交网络的信息传播模型[J]. *物理学报*, 2011, 60(5): 60-66.
- [7] ZHOU X F, XU K, ZHANG L S, et al. Propagation Measurement and Cluster Analysis of Time Series in Social Networks [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2015, 36(7): 1545-1552. (in Chinese)
- 周雪峰,徐恪,张蓝珊,等. 社交网络的传播测量与时间序列聚类分析[J]. *小型微型计算机系统*, 2015, 36(7): 1545-1552.
- [8] SU Q, HUANG J, ZHAO X. An information propagation model considering incomplete reading behavior in microblog [J]. *Physica A*, 2015, 419(2): 55-63.
- [9] DING X, LIU Q C, ZHANG W. An improved model for information dissemination and prediction on microblog networks [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2014, 42(7): 582-598. (in Chinese)
- 丁鑫,刘其成,张伟. 一种改进的微博网络信息传播与预测模型[J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, 42(7): 582-598.
- [10] ZHAO L, WANG Q, CHENG J, et al. Rumor spreading model with consideration of forgetting mechanism: a case of online blogging live journal [J]. *Physica A*, 2011, 390(13): 2619-2625.
- [11] ZHAO L, CUI H, QIU X, et al. SIR rumor spreading model in the new media age [J]. *Physica A*, 2013, 392(4): 995-1003.
- [12] ZHAO L, WANG J, CHEN Y, et al. SIHR rumor spreading model in social networks [J]. *Physica A*, 2012, 391(7): 2444-2453.
- [13] XIONG F, LIU Y, ZHANG Z, et al. An information diffusion model based on retweeting mechanism for online social media [J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(6): 2103-2108.
- [14] GU Y R, XIA L L. The propagation and inhibition of rumors in online social network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 514-518. (in Chinese)
- 顾亦然,夏玲玲. 在线社交网络中谣言的传播与抑制[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 514-518.
- [15] SUN Y C, LIU H, ZHANG G J. Cross platform System for Real-time Crowd Simulation [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2015, 36(4): 862-867. (in Chinese)
- 孙云晨,刘弘,张桂娟. 支持跨平台的实时人群运动仿真系统[J]. *小型微型计算机系统*, 2015, 36(4): 862-867.