

具有跨邻居传播能力的信息辐射模型研究

汪筱阳 王瑛 朱参世 朱琳 傅超琦

Information radiation model with across neighbor spread abilities of nodes

Wang Xiao-Yang Wang Ying Zhu Can-Shi Zhu Lin Fu Chao-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 038901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.038901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.038901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于领域相似度的复杂网络节点重要度评估算法

Node importance measurement based on neighborhood similarity in complex network

物理学报.2017, 66(3): 038902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.038902>

基于超图的超网络相继故障分析

Cascading failure analysis in hyper-network based on the hypergraph

物理学报.2016, 65(8): 088901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.088901>

异质自适应网络中的核心-边缘结构及其对疾病传播的抑制作用

Core-periphery structure in heterogeneous adaptive network and its inhibiting effect on epidemic spreading

物理学报.2016, 65(5): 058901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058901>

网络集聚性对节点中心性指标的准确性影响

Effect of variable network clustering on the accuracy of node centrality

物理学报.2016, 65(2): 028901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.028901>

两层星形网络的特征值谱及同步能力

Synchronizability and eigenvalues of two-layer star networks

物理学报.2016, 65(2): 028902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.028902>

## 具有跨邻居传播能力的信息辐射模型研究\*

汪筱阳<sup>1)†</sup> 王瑛<sup>1)</sup> 朱参世<sup>2)</sup> 朱琳<sup>1)</sup> 傅超琦<sup>1)</sup>

1)(空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安 710051)

2)(西京学院信息工程学院, 西安 710123)

(2016年7月20日收到; 2016年10月12日收到修改稿)

针对大多数信息传播的研究均只考虑邻居的问题, 本文提出了一个具有跨邻居传播能力的信息辐射模型. 该模型结合复杂网络理论、平均场理论和辐射理论, 建立了以物理层为网络结构基础、以辐射层为信息传播环境、以状态层为辐射状态统计的三层信息辐射网络模型. 通过定义节点状态之间的转换规则和相关网络统计量, 引入辐射范围和辐射衰减量, 分析了辐射机理并推导了辐射阈值表达式. 在不同的复杂网络中, 利用数值仿真验证了理论分析的正确性和模型的有效性, 分析了节点之间的状态转换概率和辐射衰减量对信息辐射的影响规律.

**关键词:** 传播能力, 信息辐射, 复杂网络, 辐射阈值

**PACS:** 89.70.Hj, 89.75.Fb, 64.60.aq

**DOI:** 10.7498/aps.66.038901

## 1 引言

信息传播是指信息从初始的传播者扩散到其他人群的过程. 这里的信息可以是现实生活中的消息<sup>[1]</sup>、疾病<sup>[2,3]</sup>、舆论<sup>[4]</sup>、计算机病毒<sup>[5]</sup>等. 对信息传播过程的研究能够发现不同环境下的个体交互及信息传播规律<sup>[6]</sup>, 寻找网络中的关键节点<sup>[7]</sup>, 为信息传播趋势预测<sup>[8,9]</sup>、突发事件预警<sup>[10]</sup>及网络安全评估<sup>[11]</sup>提供理论基础.

利用复杂网络研究信息传播已经成为近年来的研究热点<sup>[12,13]</sup>, 其中利用或基于平均场理论来研究信息传播的文献最多<sup>[14]</sup>. 在平均场理论中, 信息传播模型定义了信息的传播规则, 个体间常常以概率的形式发生相互作用, 最后观察信息的宏观传播范围及传播阈值<sup>[15]</sup>. 文献<sup>[16]</sup>借助平均场理论, 分析了微博用户关系网络模型的拓扑统计特性, 以及谣言在该演化模型上的传播动力学行为. 文献<sup>[17]</sup>使用平均场论方法研究了微博传播过程, 分析了网络的生成机制和度分布模型. 文献<sup>[18]</sup>研

究了社交网络中的朋友推荐方法, 在降低较少推荐成功率的情况下提高了信息传播的范围. 文献<sup>[19]</sup>研究了信息扩散和社会网络结构的共同演化, 从共同演化的过程中发现了网络小世界结构的消失和出现过程. 文献<sup>[20]</sup>研究了化学灾难网络的灾难传播模型, 建立了多灾难的仿真系统并证明了系统的有效性. 文献<sup>[21]</sup>研究了谣言传播模型, 利用平均场方程建立和描述谣言传播的动力学机制, 并进行了稳定性分析. 文献<sup>[22]</sup>结合李雅普诺夫理论对网络的稳定性进行了研究. 另外, 一些离散观点交互模型<sup>[23]</sup>, 如投票者模型<sup>[24]</sup>等, 也会采用平均场方程进行建模并求解. 平均场理论以平均效果替代单个作用效果相加, 从而避免了微观角度单体加和时某些统计值存在涨落的现象发生<sup>[25]</sup>, 因此, 平均场理论通过简化系统, 进而保留了系统的主要信息和基本属性. 值得注意的是, 几乎所有的文献都只考虑了节点与邻居节点之间的信息传播, 忽略了节点与除其邻居之外节点的信息传播情况.

然而, 信息作为一种能量进行传播, 其本身具

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 71601183, 71401174)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxiaoyang1987@163.com

有传播到除邻居之外节点的能力. 比如, 学校邀请专家进行讲座, 教师或学生会相互转告, 其他人会根据专家的知名程度选择是否去参加, 也就是说, 专家的知名程度或影响力决定了他的信息传播范围. 同时, 与专家学术领域的相近程度决定了参与者能接收信息的能力. 文献 [26] 也认为距离因素不能忽略, 研究了基于距离的多板块传染病模型. 文献 [27] 通过对基于信息驱动的行为传播模型进行研究, 发现与源节点的距离会影响行为传播的速度和范围, 网络中节点相对转化率与它距源节点的距离呈负相关关系, 即越靠近源节点的节点受感染而转化成行为者的可能性越大, 而且行为在源节点的三层关系内的传染性最强. 文献 [28] 研究了复杂网络中的谣言和信息的扩散过程, 提出独立传播者可以通过其他渠道获得信息, 然后研究了网络的传播率、阻止率和平均度. 此外, 信息在传播过程中还存在不完全传播的情况, 即存在信息的衰减. 文献 [29] 研究了无标度网络中不完全信息的扩散过程, 建立了节点状态连续变化的信息扩散模型. 文献 [30] 在研究中也考虑了非均匀传播的情况, 认为个体的传播能力依赖于其在网络中的联系数目, 并且证明了这种传播机制的有效性. 文献 [31] 为了更好地刻画信息传播中个体的差异, 在考虑节点抗攻击能力存在差异的情形下, 通过定义脆弱性函数, 使模型更具普遍性.

鉴于此, 本文提出了一个具有跨邻居传播能力的信息辐射模型, 基于复杂网络、平均场理论和辐射理论, 通过定义节点之间的状态转换规则, 构建了三层辐射网络模型, 在特定条件下对模型进行了求解, 并在不同的复杂网络中研究了节点之间的状态转换率和辐射衰减量对辐射的影响.

## 2 模型基础

### 2.1 辐射源选取

信息辐射虽然与传染病等的传播类似, 但又有所不同. 比如传染病一般起源于非洲一些经济不发达的国家和地区, 然后再由非洲传入欧洲或亚洲等人口稠密的国家, 如 HIV, SARS、埃博拉和各类流感病毒. 如果将世界抽象为一个网络的话, 在非洲的国家或地区属于较为封闭、与外界联系较少的节点, 而且由于自身医疗系统不完备, 病毒防护能力弱,

容易受到病毒攻击, 成为传染病发源地. 也就是说, 追溯传染病源的话, 可以发现, 病毒最初是由网络中的一些非重要节点(度数较小、连接较少的节点)开始传播, 或者说是安全防护能力较弱的节点易受到病毒攻击, 形成病毒爆发和传染源.

对于信息辐射来说, 就是为了在较小的资金投入的前提下, 通过采取一定的方法和措施, 来提高网络的信息可知范围. 因此, 为了使信息能够尽可能快速和广泛的传播出去, 信息辐射源一般选择网络中的重要节点或中心节点. 本文为了简化计算, 选取度数较大的节点作为信息辐射源.

### 2.2 辐射理论

在物理上, 辐射指的是由场源处的电磁能量中的一部分脱离场源向远处传播, 而后再返回场源的现象, 能量以电磁波或粒子的形式向外扩散. 辐射的能量从辐射源向外所有方向直线放射. 物体通过辐射所放出的能量, 称为辐射能. 热辐射中, 辐射能被物体吸收时发生热效应, 物体吸收的辐射能不同, 所产生的温度也不同. 文献 [32] 在电离辐射速率理论的基础上, 建立了电离辐射致植物诱变效应的损伤-修复模型. 对应辐射的概念, 文献 [33] 认为信息辐射是以较高信息量的节点为中心通过辐射介质向其他节点传递信息量的过程. 信息辐射具有以下特点.

#### 1) 辐射组成

在复杂网络中进行信息辐射时, 辐射源为信息量相对较高的节点 [34]; 辐射能量为信息(包括知识技能、社会行为、价值观等); 辐射介质为讲座、培训、宣传、团队管理、交流借鉴等; 辐射源通过辐射介质向四周传递能量, 具有一定的辐射半径, 称为有效辐射半径或辐射范围, 网络中节点由于自身情况的不同, 其有效辐射半径也不同.

#### 2) 方向性

一般来说, 辐射具有双向传播的特点, 不论物体温度高低都向外辐射能量, 甲物体可以向乙物体辐射, 同时乙也可以向甲辐射. 任何物体在发出辐射能的同时, 也不断吸收周围物体发来的能量. 然而, 在复杂网络的信息辐射中, 我们认为只有辐射源具有辐射能量的能力, 除辐射源外的其他智能体不具有辐射能力, 或者说辐射的能量太小, 可以忽略. 所以, 只存在辐射源通过辐射路径向外

辐射能量. 信息辐射示意图见图 1, 辐射范围由近及远颜色逐渐变浅, 表示辐射能量逐渐衰减, 本文设节点对邻居的信息辐射量为 100%, 在此基础上每增加一个距离长度, 辐射能量衰减为  $\tau \times 100\%$  ( $0 < \tau < 1$ ), 其中  $\tau$  为辐射衰减量.

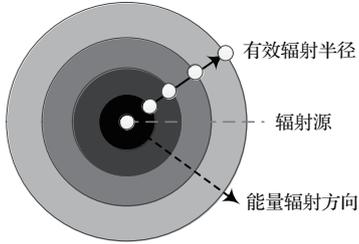


图 1 信息辐射示意图

Fig. 1. Sketch map of information radiation.

### 3 模型构建

#### 3.1 模型假设

构造信息辐射网络模型, 做以下 3 个假设.

**假设 1** 网络是连通的, 不存在孤立的组元. 由于信息辐射首先要具备的条件就是有辐射的路径. 在信息辐射理论框架下, 孤立组元既不会从信息辐射过程中获得信息, 更不可能将安全信息辐射至其他任何组元. 因此, 本模型将不考虑孤立组元存在的情况.

**假设 2** 网络中节点之间的连接关系均为双向的. 本文所涉及的网络均为无向网络.

**假设 3** 只有辐射态组元会进行安全信息辐射, 且辐射态的组元仅对已知态和未知态的组元进行辐射.

#### 3.2 节点状态划分及转换

在信息辐射网络模型中, 每一个节点代表一个网络个体, 而连接则表示他们之间有通信联系. 其中每个节点可能处于以下三种状态中的一种.

1) 辐射态 (radiated): 信息量高于辐射态阈值且在网络中辐射信息时的状态, 记为 R, 初始网络中信息辐射源处于辐射态. 在信息辐射过程中, 处于辐射态的节点有机会通过释放能量转换为已知态.

2) 已知态 (known): 信息量高于最低信息量 (已知态阈值) 且低于辐射态阈值, 并不会辐射信息

时的状态, 记为 K. 在信息辐射过程中, 处于已知态的节点有机会通过接收能量转换为辐射态.

3) 未知态 (unknown): 信息量低于已知态阈值时的状态, 记为 U. 初始网络中大部分节点处于未知态. 在信息辐射过程中, 处于未知态的节点有机会通过接收能量转换为已知态或辐射态.

如果将信息量归一化的话, 三种状态的信息量如图 2 所示. 这里需要对模型说明的是, 如果信息量是连续增加的, 当由未知态转换为辐射态时, 由于未知态的信息量低于已知态的信息量, 所以转换为辐射态时必然会经历已知态, 为了实现节点由未知态跳过已知态转换为辐射态, 这里规定节点的状态转换时间大于信息量变化时间. 也就是说, 节点的信息量变化最终完成后再进行节点状态转换, 待节点的状态转换之后进行网络的信息辐射.



图 2 节点状态的信息量示意图

Fig. 2. Sketch map of information content of node status.

三种状态之间的转换关系如图 3 所示. 其中未知态节点受到信息辐射后, 有概率  $\alpha$  转换为已知态, 有概率  $\gamma$  转换为辐射态; 已知态节点受到信息辐射后, 有概率  $\beta$  转换为辐射态; 辐射态节点在进行一次辐射后有概率  $\delta$  转换为已知态. 定义  $\lambda = \beta/\delta$  为有效辐射率, 不失一般性, 可设  $\delta = 1$ .

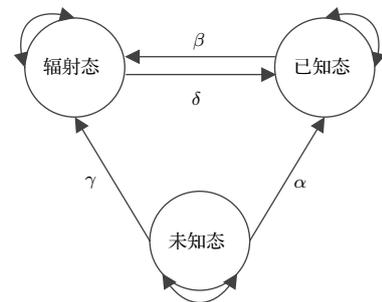


图 3 节点状态转换关系

Fig. 3. Conversion relationship of node status.

从节点状态转换关系可知, 在信息辐射过程中, 辐射态可以转换为已知态或继续保持辐射态, 已知态可以转换为辐射态或继续保持已知态, 未

知态可以转换为辐射态或已知态或者继续保持未知态.

### 3.3 三层辐射网络模型

基于复杂网络构建信息辐射网络模型, 首先根据实际节点的连接情况构建复杂网络基础结构模型, 即网络的物理层, 如网络设为小世界网络或无标度网络; 然后根据节点的影响能力(辐射能力)确定网络中不同节点的辐射范围, 即网络的辐射层, 如设定不同节点的辐射范围为  $m$  个距离长度, 其中  $m = 1, 2, \dots, N - 1$ ; 最后根据节点信息量的获取情况确定节点的状态, 进行状态统计, 即网络的状态层, 如不同节点到底处于哪种状态. 同时, 节点信息量的改变会影响节点状态的改变, 节点状态的改变还会影响辐射态节点数量, 进而反过来影响辐射层改变辐射网络. 因此, 辐射层与状态层之间存在作用与反作用. 综合以上分析, 三层辐射网络模型构成如图 4 所示.

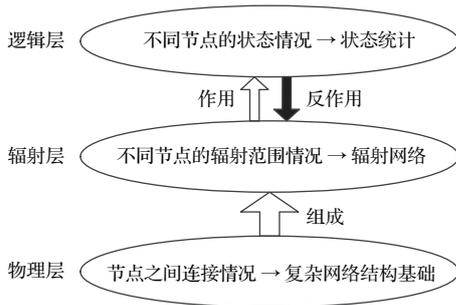


图 4 三层辐射网络模型构成图

Fig. 4. Three layers radiation network model.

### 3.4 辐射机理

由三层辐射网络模型可知, 信息辐射主要在辐射层进行. 为了更好地描述辐射机理, 首先对辐射网络中的一些概念进行定义.

**定义 1**  $n$  阶度

节点的  $n$  阶度定义为与这个节点距离为  $n$  的节点的数目, 用  $k_n$  表示.

**定义 2** 平均  $n$  阶度

网络中所有节点的  $n$  阶度的平均值称为网络的(节点)平均  $n$  阶度, 用  $\langle k_n \rangle$  表示.

**定义 3**  $n$  阶度分布

网络中节点的  $n$  阶度的分布情况可用分布函数  $P_n(k_n)$  来描述.  $P_n(k_n)$  表示的是一个随机选定的节点的  $n$  阶度恰好为  $k_n$  的概率.

用  $R(t)$ ,  $K(t)$ ,  $U(t)$  分别表示网络中 R, K, U 态节点在  $t$  时刻的密度, 用  $R_k(t)$ ,  $K_k(t)$ ,  $U_k(t)$  分别表示网络中度为  $k$  的 R, K, U 态节点在  $t$  时刻的密度, 则

$$\begin{cases} R(t) = \sum_k P(k)R_k(t), \\ K(t) = \sum_k P(k)K_k(t), \\ U(t) = \sum_k P(k)U_k(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$R_k(t) + K_k(t) + U_k(t) = 1. \quad (2)$$

假设节点的辐射范围为  $m$ , 根据平均场理论, 信息辐射模型在复杂网络中的辐射过程可以用如下微分方程组来表示:

$$\begin{aligned} \frac{dR_k(t)}{dt} = & \beta k_1 K_k(t) \theta_1(t) + \tau \beta k_2 K_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \beta k_m K_k(t) \theta_m(t) \\ & + \gamma k_1 U_k(t) \theta_1(t) \\ & + \tau \gamma k_2 U_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \gamma k_m U_k(t) \theta_m(t) - \delta R_k(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dK_k(t)}{dt} = & \alpha k_1 U_k(t) \theta_1(t) + \tau \alpha k_2 U_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \alpha k_m U_k(t) \theta_m(t) \\ & - (\beta k_1 K_k(t) \theta_1(t) \\ & + \tau \beta k_2 K_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \beta k_m K_k(t) \theta_m(t)) + \delta R_k(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_k(t)}{dt} = & - (\alpha k_1 U_k(t) \theta_1(t) \\ & + \tau \alpha k_2 U_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \alpha k_m U_k(t) \theta_m(t)) \\ & - (\gamma k_1 U_k(t) \theta_1(t) \\ & + \tau \gamma k_2 U_k(t) \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} \gamma k_m U_k(t) \theta_m(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\theta_i(t) = \sum_k k_i P_i(k_i) R_k(t) / \langle k_i \rangle \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

是表示  $t$  时刻在  $i$  阶度的范围内任意选取的一个节点为辐射态节点的概率. 令

$$\begin{aligned} \theta(t) = & k_1 \theta_1(t) + \tau k_2 \theta_2(t) + \dots \\ & + \tau^{m-1} k_m \theta_m(t), \end{aligned} \quad (5)$$

则(3)式简化为

$$\begin{aligned} \frac{dR_k(t)}{dt} &= \beta K_k(t)\theta(t) + \gamma U_k(t)\theta(t) - \delta R_k(t), \\ \frac{dK_k(t)}{dt} &= \alpha U_k(t)\theta(t) - \beta K_k(t)\theta(t) + \delta R_k(t), \\ \frac{dU_k(t)}{dt} &= -\alpha U_k(t)\theta(t) - \gamma U_k(t)\theta(t). \end{aligned} \quad (6)$$

由状态转换规则可知, 稳态条件下由(6)式可得

$$\begin{cases} K_k(\infty) = \frac{\delta R_k(\infty)}{\beta\theta(\infty)}, \\ U_k(\infty) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式可得

$$R_k(\infty) = \frac{\beta\theta(\infty)}{\beta\theta(\infty) + \delta}. \quad (8)$$

将(8)式代入(5)式可得

$$\begin{aligned} \theta(\infty) &= \frac{k_1}{\langle k_1 \rangle} \sum k_1 P_1(k_1) \frac{\beta\theta(\infty)}{\beta\theta(\infty) + \delta} \\ &+ \tau \frac{k_2}{\langle k_2 \rangle} \sum k_2 P_2(k_2) \frac{\beta\theta(\infty)}{\beta\theta(\infty) + \delta} + \dots \\ &+ \tau^{m-1} \frac{k_m}{\langle k_m \rangle} \sum k_m P_m(k_m) \frac{\beta\theta(\infty)}{\beta\theta(\infty) + \delta} \\ &= \left( \frac{\langle k_1^2 \rangle}{\langle k_1 \rangle} + \tau \frac{\langle k_2^2 \rangle}{\langle k_2 \rangle} + \dots + \tau^{m-1} \frac{\langle k_m^2 \rangle}{\langle k_m \rangle} \right) \\ &\times \frac{\beta\theta(\infty)}{\beta\theta(\infty) + \delta}. \end{aligned} \quad (9)$$

由 $\theta(\infty) > 0$ 得

$$\begin{aligned} \lambda &= \beta/\delta \\ &> \frac{1}{\left( \frac{\langle k_1^2 \rangle}{\langle k_1 \rangle} + \tau \frac{\langle k_2^2 \rangle}{\langle k_2 \rangle} + \dots + \tau^{m-1} \frac{\langle k_m^2 \rangle}{\langle k_m \rangle} \right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可知网络中的信息辐射阈值与辐射范围 $m$ 、辐射衰减量 $\tau$ 、节点的平均 $n$ 阶度平方 $\langle k_m^2 \rangle$ 呈负相关, 与节点的平均 $n$ 阶度 $\langle k_m \rangle$ 呈正相关.

如果网络中节点的平均 $n$ 阶度和平均 $n$ 阶度平方均相同, 分别设为 $\langle k \rangle, \langle k^2 \rangle$ , 则

$$\lambda = \beta/\delta > \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{1 - \tau}{1 - \tau^m}. \quad (11)$$

因此, 如果网络中节点的平均 $n$ 阶度和平均 $n$ 阶度平方均相同, 那么信息辐射阈值为

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{1 - \tau}{1 - \tau^m} \\ &= \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{1}{1 + \tau + \dots + \tau^{m-1}}. \end{aligned} \quad (12)$$

## 4 仿真与分析

由上述辐射机理分析可知, 网络的辐射阈值与辐射范围、辐射衰减量、节点的平均 $n$ 阶度和平均 $n$ 阶度平方有关. 本节首先利用计算机仿真在不同复杂网络中验证上述理论分析结果, 然后在BA无标度网络中分析节点状态之间的相互转换概率和辐射衰减量对信息辐射的影响. 在仿真中, 初始时刻均选取一个度最大的节点作为信息辐射源, 其他均为未知态节点, 同时每个数据是100次辐射平均的结果.

### 4.1 仿真实验

为了验证上述理论分析的结论, 分别在五个网络中进行. 其中, 两个经典网络: NW网络和BA网络; 三个真实网络: 爵士音乐家合作网络(Jazz)、科学家合作网络(选择其中最大连通子图Net-science)和洛维拉·依维尔基里大学成员邮件通信关系网络(E-mail). 其中, Jazz网络度值小的节点较为集中, 而度值大的节点非常稀少, 符合“长尾分布”, 网络度分布服从幂律分布, 另外, 该网络节点不多, 但是具有小世界网络特性. Net-science网络具有高聚类和小世界特性, 并呈现社团结构和等级结构, 网络的度分布介于指数与幂律之间, 近似服从对数正态分布, 社团规模分布亦符合“长尾分布”. E-mail网络的度分布具有幂律特征, 具有小世界特性. 表1列出了各网络的统计特性.

利用表1中已知网络参数由(10)式可得各网络中的理论辐射阈值分别为 $\lambda_{NW} = 0.0276, \lambda_{BA} = 0.0179, \lambda_{Jazz} = 0.0088, \lambda_{Net-science} = 0.033, \lambda_{E-mail} = 0.0045$ .

设网络中的每个节点的辐射范围均为3个距离长度, 辐射衰减量 $\tau = 0.5$ . 当固定参数 $\alpha = 0.1, \gamma = 0.05, \delta = 1, \beta$ 取不同值时, 各网络中模拟所得稳态时辐射态节点的密度 $R(t)$ 曲线如图5所示. 显然, 图5证实了NW网络、BA网络、Jazz网络、Net-science网络和E-mail网络中均存在辐射阈值, 即当参数低于辐射阈值时, 辐射态节点逐渐在网络中消亡, 当参数高于辐射阈值时, 辐射态节点会在网络中持续存在. 并且可以看出数值仿真和理论分析结果拟合得较好, 同时也说明了信息辐射网络模型的有效性和可行性.

表 1 各网络统计特性  
Table 1. Statistical characteristics of each network.

网络	节点数	边数	$\langle k_1 \rangle$	$\langle k_1^2 \rangle$	$\langle k_2 \rangle$	$\langle k_2^2 \rangle$	$\langle k_3 \rangle$	$\langle k_3^3 \rangle$
NW	200	654	6.54	45.27	33.52	818.26	108.19	7402.1
BA	200	434	4.34	48.36	49.73	2205.4	145.69	13141
Jazz	198	2742	27.697	1070.2	107.596	12515	51.182	3462.3
Net-science	379	914	4.823	38.686	15.388	383.47	30.042	1239.7
E-mail	1133	5451	9.622	179.82	97.624	16446	403.36	193040

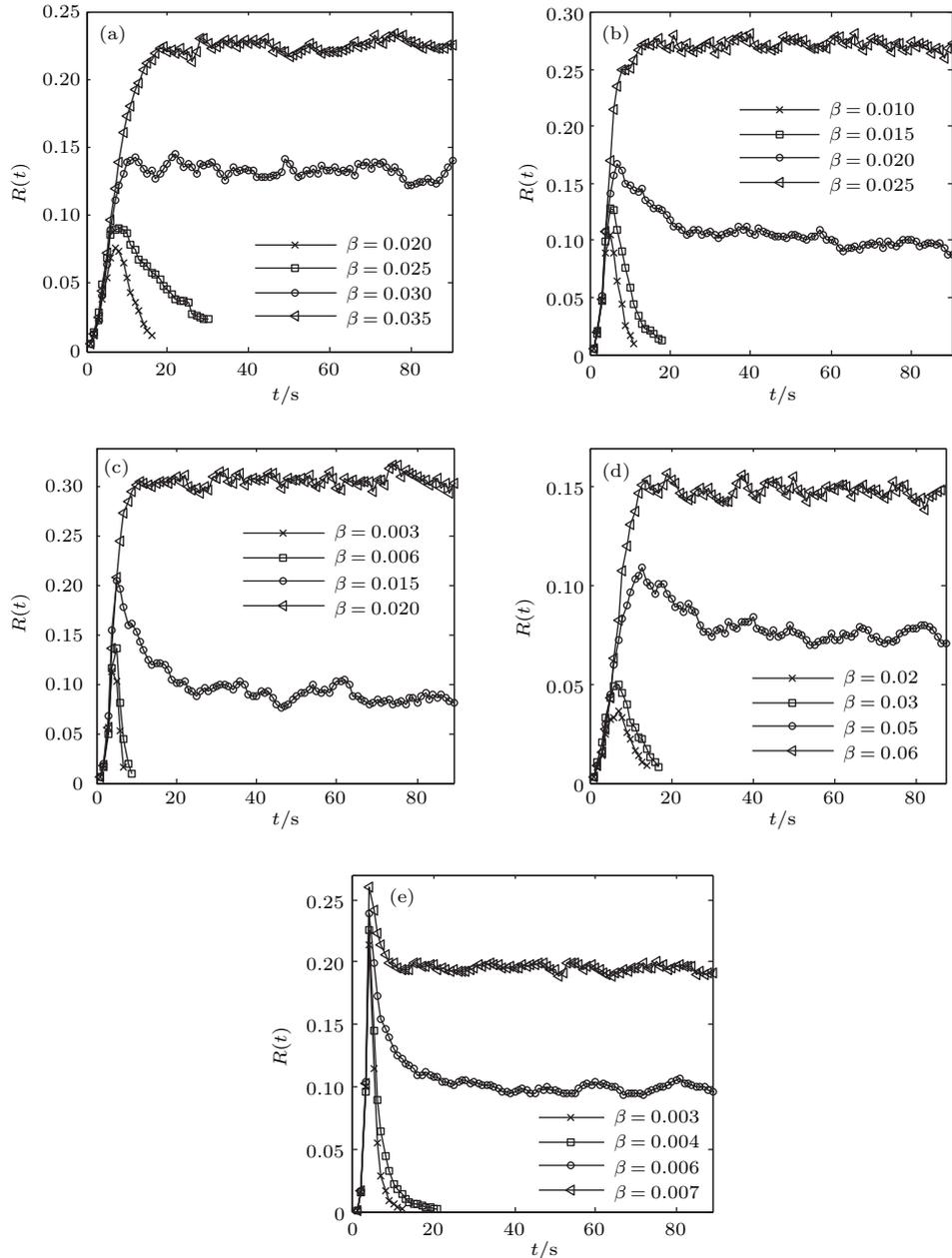


图 5 各网络中不同  $\beta$  值对  $R(t)$  的影响 (a) NW 网络; (b) BA 网络; (c) Jazz 网络; (d) Net-science 网络; (e) E-mail 网络

Fig. 5. The influences of different  $\beta$  values on  $R(t)$  in different networks: (a) NW network; (b) BA network; (c) Jazz network; (d) Net-science network; (e) E-mail network.

### 4.2 参数分析

上述通过仿真验证了理论分析的正确性和模型的有效性,然而,在实际问题中,网络中的节点属性一般来说是不同的,比如不同的节点可能具有不同的辐射范围.考虑实际应用,这里按照网络中节点度的大小来划分节点辐射范围,假设度值排名前5%的节点辐射范围为4个距离长度,度值排名在5%—15%之间的节点辐射范围为3个距离长度,度值排名在15%—40%之间的节点辐射范围为2个距离长度,余下节点辐射范围为1个距离长度.在此实际条件下,分析辐射衰减量和节点状态之间转换概率对信息辐射的影响规律.由于各网络类似,为了节约篇幅,以下仿真与讨论均在BA网络中进行.

当固定参数  $\alpha = 0.1, \gamma = 0.05, \delta = 1, \beta = 0.025$ , 辐射衰减量  $\tau$  取不同值时, BA 网络中模拟所得稳态时 R, U 态节点的密度曲线如图 6 所示.

从图 6(a) 可以看出, 无论辐射衰减量  $\tau$  取何值, 几乎不会影响网络达到稳态的时间, 但是随着  $\tau$  的增大, 到达稳态时 R 态节点的密度不断变大, 也就是说, 辐射达到稳态时 R 态节点的数量随着  $\tau$  的增大而增多. 分析原因为: 初始选择度最大的节点为辐射源, 在 BA 网络中该节点一般为网络的中心节点, 并且具有较大的辐射范围, 同时初始时刻绝大部分节点处于 U 态. 因此, 在辐射刚开始时, 具有较大的辐射衰减量能够保证节点信息能量的高质量辐射, 在对  $n (n > 1)$  阶邻居进行辐射时保持一个较高的状态转换概率(由 U 转换为 K 或 R), 所

以  $\tau$  越大, 初始阶段转换为 R 态的节点就越多. 从图 6(b) 可以看出, 随着  $\tau$  的增大, U 态节点的密度下降得越快, 最后 U 态节点消失. 综上所述, 提高辐射衰减量不仅可以使稳态时 R 态节点增多, 而且可以加速 U 态节点的消亡. 同时图 6 进一步证明了 (10) 式的关系, 即  $\tau$  对辐射阈值有影响, 必然会影响稳态时 R 态节点密度.

当固定参数  $\gamma = 0.05, \delta = 1, \beta = 0.025, \tau = 0.5$ , 状态转换率  $\alpha$  取不同值时, BA 网络中模拟所得稳态时 R, U 态节点的密度曲线如图 7 所示.

从图 7(a) 可以看出, 无论  $\alpha$  取何值, 几乎不会影响网络达到稳态的时间, 而且也对到达稳态时 R 态节点的密度影响不大. 只是在辐射初始阶段, 随着  $\alpha$  的逐渐增大, R 态节点逐渐减少. 分析原因为: 初始选择度最大的节点为辐射源, 而在 BA 网络中该节点一般为网络的中心节点, 并且具有较大的辐射范围, 同时初始时刻绝大部分节点处于 U 态. 因此, 在辐射刚开始时, 如果  $\alpha$  增大, 也就增加了 U 态转换为 K 态的概率, K 态节点会增多. 然而, 由于参数的设置为  $\gamma > \beta$ , 也就是说, U 态转换为 R 态节点比 K 态转换为 R 态节点的概率大, 所以 K 态节点的增多会减少 R 态节点的生成. 从图 7(b) 可以看出, 随着  $\alpha$  的增大, U 态节点的密度下降的越快, 最后 U 态节点消失. 综上所述, 提高转换概率  $\alpha$  只会影响辐射初始阶段 R 态节点数量, 同样加速 U 态节点的消亡, 但是不会使稳态时 R 态节点增多, 这也同样证明了 (10) 式的关系, 即  $\alpha$  对辐射阈值没有影响, 也就不会影响稳态时 R 态节点的密度.

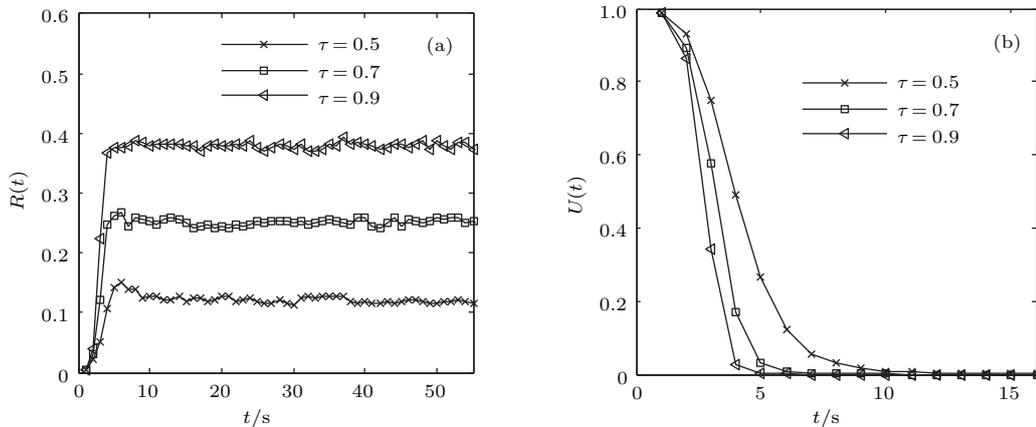


图 6 BA 网络中不同  $\tau$  值对信息辐射的影响 (a)  $R(t)$  随不同  $\tau$  值的变化; (b)  $U(t)$  随不同  $\tau$  值的变化  
 Fig. 6. The influences of different  $\tau$  values on information radiation in BA network: (a) The changing curves of  $R(t)$  with different  $\tau$ ; (b) the changing curves of  $U(t)$  with different  $\tau$ .

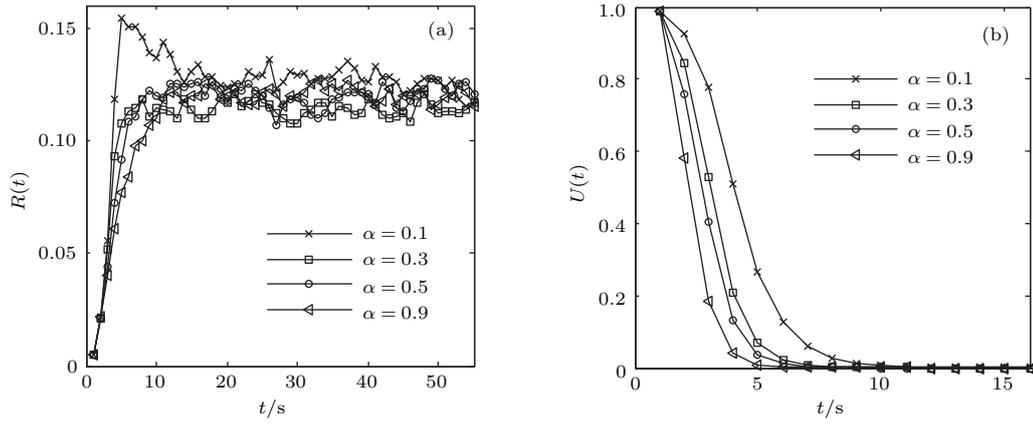


图 7 BA 网络中不同  $\alpha$  值对信息辐射的影响 (a)  $R(t)$  随不同  $\alpha$  值的变化; (b)  $U(t)$  随不同  $\alpha$  值的变化  
 Fig. 7. The influences of different  $\alpha$  values on information radiation in BA network: (a) The changing curves of  $R(t)$  with different  $\alpha$ ; (b) the changing curves of  $U(t)$  with different  $\alpha$ .

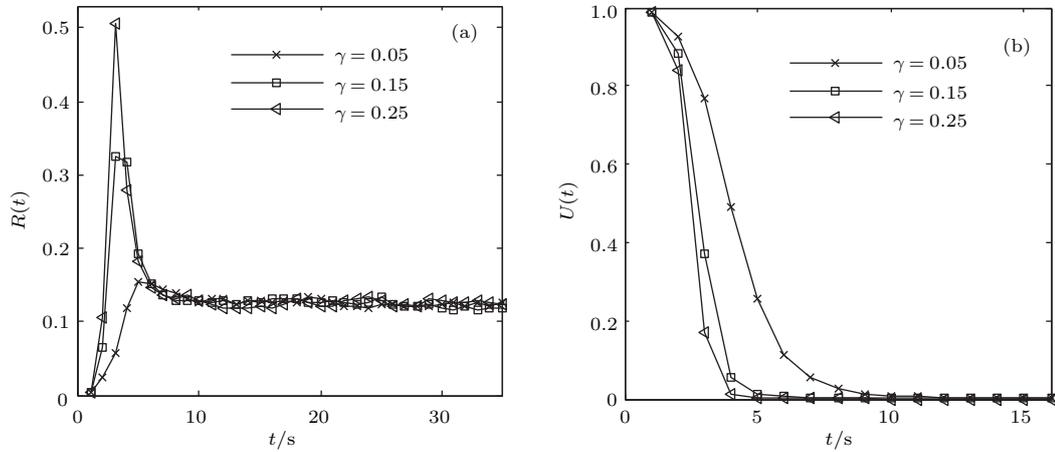


图 8 BA 网络中不同  $\gamma$  值对信息辐射的影响 (a)  $R(t)$  随不同  $\gamma$  值的变化; (b)  $U(t)$  随不同  $\gamma$  值的变化  
 Fig. 8. The influences of different  $\gamma$  values on information radiation in BA network: (a) The changing curves of  $R(t)$  with different  $\gamma$ ; (b) the changing curves of  $U(t)$  with different  $\gamma$ .

当固定参数  $\alpha = 0.1$ ,  $\delta = 1$ ,  $\beta = 0.025$ ,  $\tau = 0.5$ , 状态转换率  $\gamma$  取不同值时, BA 网络中模拟所得稳态时 R, U 态节点的密度曲线如图 8 所示.

从图 8(a) 可以看出, 无论  $\gamma$  取何值, 同样不会影响网络达到稳态的时间, 而且对到达稳态时 R 态节点的密度影响不大. 只是在辐射初始阶段, 随着  $\gamma$  的逐渐增大, R 态节点逐渐增多. 分析原因为: 初始选择度最大的节点为辐射源, 而在 BA 网络中该节点一般为网络的中心节点, 并且具有较大的辐射范围, 同时初始时刻绝大部分节点处于 U 态. 因此, 在辐射刚开始时, 如果  $\gamma$  增大, 也就增加了 U 态转换为 R 态的概率, R 态节点会增多, 由于  $\gamma$  直接影响了 U 态转为 R 态, 而  $\alpha$  是间接影响 U 态转为 R 态, 所以在辐射初始阶段, 图 8(a) 比图 7(a) 中变化

更大. 从图 8(b) 可以看出, 随着  $\gamma$  的增大, U 态节点的密度下降得越快, 最后 U 态节点消失. 综上所述, 提高转换概率  $\gamma$  只会影响辐射初始阶段 R 态节点的数量, 同样加速 U 态节点的消亡, 但是不会使稳态时 R 态节点增多, 这也同样证明了 (10) 式的关系, 即  $\gamma$  对辐射阈值没有影响, 也就不会影响稳态时 R 态节点的密度.

## 5 结 论

考虑实际问题中信息传播具有跨邻居传播的特点, 本文结合复杂网络理论、平均场理论和辐射理论提出一个三层信息辐射网络模型. 该模型充分考虑了节点的辐射范围, 即有效辐射半径, 同时考

除了信息辐射的能量衰减, 通过定义辐射规则分析了信息辐射的机理, 利用建立的微分方程推导出了辐射阈值, 并利用数值模拟在不同的复杂网络中验证了理论分析的正确性和模型的有效性. 最后在考虑实际应用中不同节点具有不同的辐射范围, 在该条件下分析了节点之间的状态转换概率和辐射衰减量对信息辐射的影响规律. 实验表明: 状态转换概率  $\alpha$ ,  $\gamma$  不会影响辐射达到稳态时 R 态节点的密度, 随着  $\alpha$  和  $\gamma$  的增大, 会加速 U 态节点的消亡; 辐射衰减量的提高不仅会增加稳态时 R 态节点的密度, 而且还会加速 U 态节点的消亡, 同时, 仿真分析进一步证明了辐射机理分析的准确性. 为信息传播在实际中的应用奠定了理论基础.

## 参考文献

- [1] Valerio A, Marco C, Massimiliano L G, Andrea P, Fabio P 2016 *Comput. Commun.* **76** 26
- [2] Fu R, Alexander G, Margaret L B 2016 *Math. Biosci.* **273** 102
- [3] Kang H, Fu X 2015 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **27** 30
- [4] He X S, Zhou M Y, Zhuo Z, Fu Z Q, Liu J G 2015 *Physica A* **436** 658
- [5] Yang L X, Yang X 2014 *Physica A* **396** 173
- [6] Wang Q, Lin Z, Jin Y, Cheng S, Yang T 2015 *Knowledge-Based Systems* **81** 46
- [7] Wang J P, Guo Q, Yang G Y, Liu J G 2015 *Physica A* **428** 250
- [8] Xiao Y, Han J 2016 *Technological Forecasting Social Change* **105** 167
- [9] Duncan A J, Gunn G J, Umstatter C, Humphry R W 2014 *Theor. Popul. Biol.* **98** 11
- [10] Ha J, Kim S W, Kim S W, Faloutsos C, Park S 2015 *Inform. Sci.* **290** 45
- [11] Nandi A K, Medal H R 2016 *Comput. Oper. Res.* **69** 10
- [12] Ümit A 2015 *J. Magn. Magn. Mater.* **386** 60
- [13] Hou L, Lao S, Small M, Xiao Y 2015 *Phys. Lett. A* **379** 1321
- [14] Liu C, Zhou L, Fan C, Huo L, Tian Z 2015 *Physica A* **432** 269
- [15] Zhang H F 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [张海峰 2015 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [16] Wang Y Q, Wang J, Yang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 208902 (in Chinese) [王亚奇, 王静, 杨海滨 2014 物理学报 **63** 208902]
- [17] Wu T F, Zhou C L, Wang X H, Huang X X, Zhan Z Q, Wang R B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240501 (in Chinese) [吴腾飞, 周昌乐, 王小华, 黄孝喜, 湛志群, 王荣波 2014 物理学报 **63** 240501]
- [18] Yu Z, Wang C, Bu J, Wang X, Wu Y, Chen C 2015 *Inform. Sci.* **309** 102
- [19] Luo S, Du Y, Liu P, Xuan Z, Wang Y 2015 *Expert Syst. Appl.* **42** 3619
- [20] Yi T, Zhu Q X 2014 *J. Loss Prevent. Process Ind.* **27** 130
- [21] Wang J, Zhao L, Huang R 2014 *Physica A* **398** 43
- [22] Qiu X, Yu L, Zhang D 2015 *Neuro Computing* **155** 247
- [23] Choi C W, Xu C, Hui P M 2015 *Phys. Lett. A* **379** 3029
- [24] Arkadiusz J, Katarzyna S W, Janusz S 2016 *Physica A* **446** 110
- [25] Albert L, Barabasi, Albert R, Jeong H 1999 *Physica A* **272** 173
- [26] Li F 2015 *J. North Univ. China (Nat. Sci. Ed.)* **36** 97 (in Chinese) [李峰 2015 中北大学学报 (自然科学版) **36** 97]
- [27] Chen W Y, Jia Z, Zhu G H 2015 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* **44** 172 (in Chinese) [陈致宇, 贾贞, 祝光湖 2015 电子科技大学学报 **44** 172]
- [28] Qian Z, Tang S, Zhang X, Zheng Z 2015 *Physica A* **429** 95
- [29] Li X, Cao L 2016 *Physica A* **450** 624
- [30] Xia C, Wang Z, Joaquin S, Sandro M, Yamir M 2013 *Physica A* **392** 1577
- [31] Song Y, Jiang G, Gong Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040205
- [32] Li D F, Cao T G, Geng J P, Zhan Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 248701 (in Chinese) [李多芳, 曹天光, 耿金鹏, 展永 2015 物理学报 **64** 248701]
- [33] Wang X Y, Wang Y, Zhu L, Li C 2016 *Physica A* **452** 94
- [34] Wang X Y, Wang Y, Zhu L 2016 *J. Harbin Inst. Technol.* **48** 166 (in Chinese) [汪筱阳, 王瑛, 朱琳 2016 哈尔滨工业大学学报 **48** 166]

# Information radiation model with across neighbor spread abilities of nodes\*

Wang Xiao-Yang<sup>1)†</sup> Wang Ying<sup>1)</sup> Zhu Can-Shi<sup>2)</sup> Zhu Lin<sup>1)</sup> Fu Chao-Qi<sup>1)</sup>

1) (*Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*Information Engineering College, Xijing University, Xi'an 710123, China*)

( Received 20 July 2016; revised manuscript received 12 October 2016 )

## Abstract

Information is spread as a kind of energy in the network, and it has the ability to spread to nodes that go beyond the neighbors, that is, the information has a radiation effect. However, most of the studies of information dissemination in complex networks only consider the dissemination between neighbors, ignoring that their neighborhood will also be affected by the information radiation. According to this, we propose a new information radiation model with the ability to communicate across neighbors. Firstly, the concepts of information radiation range and radiation attenuation are put forward by combining the theory of complex network and the radiation theory. Secondly, by proposing the hypotheses and analyzing the information content, the nodes in the network are divided into three states: the radiation state, the known state, and the unknown state with the information amount serving as the criterion. At the same time, the transition rules between node states are defined. Thirdly, a three-layer information radiation network model is established based on the physical layer serving as the network structure, the radiation layer as the information dissemination environment, and the state layer as the radiation state statistics. Then, on the basis of the model, the differential equations of the state changes of the nodes are constructed by using the mean field theory and defining the network statistic such as the  $n$ th degree, the average  $n$ th degree and the  $n$ th degree distribution. By analyzing the mechanism of information radiation, the expression of information radiation threshold is deduced by using the differential equation set. Afterwards, the existence of information radiation threshold is proved in each of NW network, BA network, Jazz network, Net-science network, and E-mail network. And the results of numerical simulation and theoretical analysis are well fitted, verifying the correctness of theoretical analysis and the validity of the model. Finally, considering the practical situation of the application, the influences of the state transition probability and the radiation attenuation on the information radiation are analyzed in the BA network by using computer simulation. The results show that the radiation attenuation can stabilize the radiation, and the number of nodes in the initial state of radiation can be increased, which will accelerate the demise of the unknown state nodes but will not increase the number of nodes in the steady state. The results show that increasing the attenuation of the radiation can not only increase the number of radiation nodes in steady stage of radiation, but also speed up the demise of unknown state nodes. And increasing the state transition probability  $\alpha$  or  $\gamma$  will affect only the number of the radiation nodes in the initial stage of radiation, also accelerate the demise of the unknown state nodes but will not increase the number of radiation nodes in steady stage of radiation. The analyses of the state transition probability between nodes and the radiation attenuation also prove the correctness of the theoretical analysis.

**Keywords:** spread abilities, information radiation, complex network, radiation threshold

**PACS:** 89.70.Hj, 89.75.Fb, 64.60.aq

**DOI:** 10.7498/aps.66.038901

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 71601183, 71401174).

† Corresponding author. E-mail: wangxiaoyang1987@163.com