

# 基于链路稳定性的 Ad Hoc 网络多播路由协议仿真与分析<sup>\*</sup>

周永塔

(广东南华工商职业学院 教育技术与信息中心, 广东 广州 510507)

**摘要:**在分析现有典型 Ad Hoc 网络多播路由协议 MAODV 基础上,针对协议消息利用率不高以及收集的信息量有限等问题,提出了改进协议 SMAODV。采用 HELLO 响应机制以提高消息的利用率,完成协议所需的相关数据采集,基于链路稳定性来构建和维护路由,并根据链路稳定性向量的综合度量来选择更优的路由路径。此外采用了主动链路切换机制,即采用预测的思想主动在链路失效之前进行链路切换,从而减少因链路失效造成的路由修复甚至重构的开销。实验结果表明,所提出方案是正确和可行的,且在多种网络环境中均表现出更优的综合性能。

**关键词:**Ad Hoc 网络;多播路由协议;MAODV;链路稳定性;主动链路切换

**中图分类号:**TN929.5

**文献标识码:**A

**DOI:** 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.04.012

**引用格式:**周永塔.基于链路稳定性的 Ad Hoc 网络多播路由协议仿真与分析[J].信息技术与网络安全,2020,39(4):63-67.

## Simulation and analysis of multicast routing protocol in Ad Hoc network based on link stability

Zhou Yongta

(Educational Technology and Information Center, Guangdong Nanhua Vocational College of  
Industry and Commerce, Guangzhou 510507, China)

**Abstract:**Based on the analysis of the existing typical Ad Hoc network multicast routing protocol - MAODV, aiming at the low utilization rate of protocol messages and the limited amount of information collected, the improved protocol SMAODV is proposed. HELLO response mechanism is used to improve the message utilization, to complete the data collection required by the protocol, build and maintain the route based on the link stability, and select the better route according to the comprehensive measurement of the link stability vector. In addition, the active link handover mechanism is adopted, that is, the prediction idea is used to actively switch the link before the link failure, so as to reduce the cost of repairing or even reconstructing the route caused by the link failure. The experimental results show that the proposed scheme is correct and feasible, and has better comprehensive performance in various network environments.

**Key words:** Ad Hoc network; multicast routing protocol; MAODV; link stability; the active link switching

### 0 引言

随着社会的发展、无线技术的进步,加上人们想要摆脱有线网络的束缚,进行不受时空限制的自由通信,使得无线网络及其相关技术得到了飞速发展。互联网已发展为有线网络和无线网络组成的综合网络。根据无线网络的结构可以将其划分为两类:有固定基础设施的无线网络和无固定基础设施的无线网络。

施的无线网络<sup>[1]</sup>。有固定基础设施的无线网络包含大量移动节点(如移动终端)和少量固定节点(如基站),移动节点依靠通信范围内的固定节点进行相互之间的通信<sup>[2]</sup>。此类网络可以有效地利用现成的固定基础设施(如基站),在固定设施的覆盖范围内进行通信,但其有效通信也仅仅局限于固定设施的覆盖范围以内<sup>[3]</sup>。有固定基础设施的无线网络的典型代表有无线蜂窝网和无线局域网等。但面对某些特殊的应用场景,有固定基础设施的无线网络将不能胜任<sup>[4]</sup>。相比传统有线网络和有固定基础设施的无线网络,Ad Hoc 网络以其无中心、自

<sup>\*</sup> 基金项目:教育部科技发展中心高校产学研创新基金-新一代信息技术创新项目(2018A01018);广东省普通高校青年创新人才类项目(自然科学)(2017GKQNCX122);2019 年度广东省普通高校特色创新类项目(2019GKTSCX149)

组织、动态拓扑、有限带宽、有限能量等特点,使其在许多环境的通信应用中有独特的优势<sup>[5]</sup>。例如,在军事、应急领域,Ad Hoc 网络能满足高灵活性、高抗毁性、高可靠性、高可扩展性等要求;在个人通信领域,Ad Hoc 可以实现如手机、Pad、电脑等个人移动通信设备间的通信;在商业应用流域,Ad Hoc 网络可以构建家庭网络、移动计算以及移动办公等<sup>[6]</sup>。因此 Ad Hoc 网络具有广阔的应用前景。

1 Ad Hoc 网络体系结构

由于 Ad Hoc 网络体系结构和其自身特点,使得 Ad Hoc 网络中的多播比有线网络中的多播要更加复杂。多播路由协议有两种典型的分类方法,第一种方法是按照按需路由和表驱动路由分类;另一种是根据多播数的构造方式将 Ad Hoc 网络多播路由协议分为四类<sup>[7]</sup>:基于树的多播路由协议、基于网的多播路由协议、无状态的多播路由协议和混合多播路由协议。表 1 为几种常见 Ad Hoc 网络多播路由协议的比较<sup>[8-9]</sup>。

表 1 Ad Hoc 网络多播路由协议比较

| 多播协议    | 拓扑结构      | 独立于单播路由协议 | 周期性发送信息 | 需要广播控制信息 |
|---------|-----------|-----------|---------|----------|
| MAODV   | Tree      | 是         | 是       | 是        |
| AMRIS   | Tree      | 否         | 是       | 是        |
| LAM     | Tree      | 是         | 是       | 否        |
| ODMRP   | Mesh      | 是         | 是       | 是        |
| CAMP    | Mesh      | 是         | 是       | 否        |
| DDM     | Stateless | 否         | 是       | 否        |
| AMRoute | Hybird    | 是         | 是       | 是        |

Ad Hoc 网络中多播路由协议的主要思想是用最小的冗余找到多播成员间的通信路径,上述各种协议使用不同的方法来试图达到这个目标。

2 基于链路稳定性的 MAODV

Ad Hoc 网络具有其固有的特点:网络节点的移动性造成网络拓扑结构动态变化、节点终端设备的个体差异以及节点间的无线链路环境受限等,因此 Ad Hoc 网络中的路由变得复杂且网络的维护开销也较大。为提高 Ad Hoc 网络的路由综合性能,本文提出了基于链路稳定性的 Ad Hoc 网络多播路由:将经典的 MAODV 协议改进为基于链路稳定性的 MAODV (Stability based MAODV, SMAODV) 协议,

SMAODV 中提出了“HELLO 响应机制”和“主动链路切换机制”,HELLO 响应机制用于收集测算链路稳定性和主动链路切换所需的相关数据。

2.1 报文和路由表扩展

由于链路的稳定性需要收集节点间的传输时延和节点的移动速度等信息,因此将 MAODV 原有报文均添加了节点的移动速度字段,将 RREP 报文还添加了链路稳定性向量,将邻居表和多播路由表进行了扩展,添加了 HR 报文。SMAODV 主要包含以下六种报文:RREQ、RREP、MACT、GRPH、HELLO 和 HR<sup>[10]</sup>。以下是相关的六个基本定义。

定义 1 节点间的传输时延  $td$  (transmission delay):节点 A 和节点 B 通信, A 在  $t_{1s}$  时刻给 B 发送信息, B 在  $t_{1r}$  时刻收到,并在  $t_{2s}$  时刻给 A 发送信息, A 在  $t_{2r}$  时刻收到信息,则:

$$td = \frac{(t_{1r} + t_{2r}) - (t_{1s} + t_{2s})}{2}$$
 (1)

定义 2 节点间的传输时延差值  $\Delta td$ :两次相邻的传输时延的差值,该值可能为负:

$$\Delta td = td_{new} - td_{old}$$
 (2)

其中,  $td_{new}$  表示最新计算出的传输时延,  $td_{old}$  表示前一次的传输时延。

定义 3 节点的移动速度  $ms$  (move speed):在节点发送信息时的移动速度。

定义 4 节点的移动速度差值  $\Delta ms$ :某节点收到另一节点两次相邻的移动速度的差值,该值可能为负:

$$\Delta ms = ms_{new} - ms_{old}$$
 (3)

其中,  $ms_{new}$  表示最新收到的节点移动速度,  $ms_{old}$  表示前一次收到的节点移动速度。

定义 5 节点间的稳定性向量  $nv$  (nodes vector):该向量是一个四元组 (  $td, \Delta tds, ms, \Delta mss$  ),用于测算节点间的稳定性,是后续链路稳定性的基础。其中  $\Delta tds$  表示节点间的传输时延差值  $\Delta td$  的符号位,  $\Delta mss$  表示节点的移动速度差值  $\Delta ms$  的符号位。

定义 6 链路稳定性向量  $lv$  (link vector):该向量是一个四元组 (  $TD, \Delta TDS, MS, \Delta MSS$  ),用于测算链路的稳定性。

2.2 HELLO 响应机制

为了获得用于测算链路稳定性的链路稳定性向量,首先需要获得节点间的稳定性向量,本文通

过“HELLO 响应机制”来测算节点间的稳定性。节点定期广播 HELLO 消息,该 HELLO 消息中附带自己的移动速度  $ms$  和发送该消息的时间  $t_{1s}$ 。收到 HELLO 消息的节点则响应 HR 消息,该 HR 消息中附带自己的移动速度  $ms$ 、收到的 HELLO 消息中的  $t_{1s}$ 、接收到该 HELLO 消息的时间  $t_{1r}$  和发送 HR 消息的时间  $t_{2s}$ 。接收到 HR 消息的节点,则根据接收到 HR 消息时间  $t_{2s}$  和 HR 消息中附带的  $t_{1s}$ 、 $t_{1r}$  和  $t_{2s}$  来计算自己与响应节点间传输时延  $td$ ,随后更新邻居表。节点更新邻居表时将邻居传输时延和节点的移动速度设为测算出的  $td$  和 HR 消息中附带的  $ms$ ,如果节点间是首次进行 HELLO 响应机制,则将  $\Delta tds$  和  $\Delta mss$  均设为 0;否则根据定义 5,如果测算出的  $td$  小于邻居表中已有的传输时延则将  $\Delta tds$  设为 -1,大于则设为 1,  $\Delta mss$  同理。通过 HELLO 响应机制就完成了节点间的稳定性向量的测算。

此外,本文将控制消息均加入了移动速度,所以在收到控制消息时都类似于“HELLO 响应机制”一样更新邻居表中的  $ms$  和  $\Delta mss$ 。后文介绍多播树的构建和维护时就不再介绍邻居表的维护。

### 2.3 多播树的构建

非多播树成员想要加入多播组,首先在多播路由表(Multicast Route Table, MRT)中创建表项表明自己是组成员,然后广播 RREQ-J 消息;多播树成员想要加入多播树,只需要将 MRT 中自己的身份改为多播组成员。节点通过组头表(Group Leader Table, GLT)检测组头可达性。在 RREQ-J 的传播过程中节点在单播路由表(Unicast Route Table, URT)中建立至请求的源节点的反向路由。多播树成员具有相同或者更大的序列号的节点,收到 RREQ-J 则单播回复 RREP-J。当节点收到 RREP-J 时将发送该 RREP-J 消息的节点在邻居表(Neighbor Table, NT)中对应的  $td$ 、 $\Delta tds$ 、 $ms$  和  $\Delta mss$  取出,分别累加进 RREP-J 消息的  $TD$ 、 $\Delta TDS$ 、 $MS$  和  $\Delta MSS$ ,然后继续进行转发。RREP-J 沿 RREQ-J 传播建立的反向路由发送到请求的源节点,RREP-J 传播过程中节点在 MRT 中建立至多播树的正向路由。当请求的源节点在请求等待时间 RREP\_WAIT\_TIME 内,如果是首次收到 RREP-J 消息,则将其存入缓存 Cache 中;否则将收到的 RREP-J 与 Cache 中的对比,如果拥有更新的序列号或者序列号相同但跳数更小或者序列号和跳数均相同但稳定性更好,则用新收到的

RREP-J 替换 Cache 中原有的。等待 RREP\_WAIT\_TIME 后向 Cache 中的 RREP-J 选择的 upstream 节点单播 MACT-J 消息进行路由激活。每个收到 MACT-J 的节点在自己的 MRT 中将该 MACT-J 的发送节点标明为新的下一跳。如果收到 MACT-J 的节点是多播树成员节点则加入完成,否则继续向上游转发 MACT-J。

如果请求的源节点在等待 RREQ\_RETRIES 后仍未收到任何 RREP-J,则意味着网络中无该多播树或网络被分割,则该节点作为组头开始维护多播组序列号和多播树。图 1 描述了 MAODV 的路由过程。

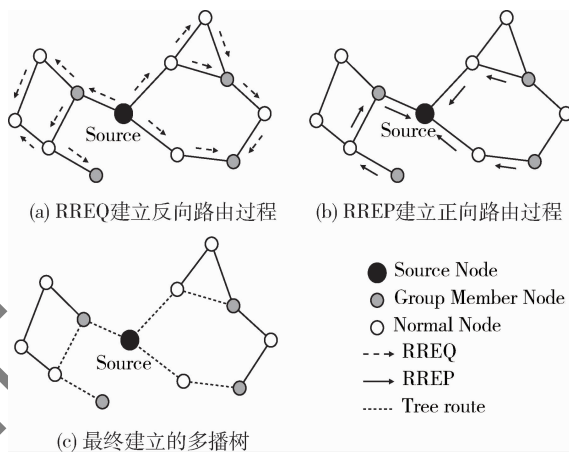


图 1 MAODV 路由过程

### 2.4 主动链路切换机制

由于节点的移动性可能会造成断路,而断路的修复过程将给网络带来较大开销,从而降低 MAODV 的整体性能。本文在测算节点间的稳定性的基础上,提出了主动链路切换机制,进一步提高 SMAODV 的整体性能。

如图 2 所示过程,多播组成员节点 2 即将离开多播树成员节点 A 的信号覆盖范围,进入多播树成员节点 B 的信号范围。当多播组成员节点 2 离开多播树成员节点 A 的信号范围后将会发起链路修复过程,经过修复过程多播组成员节点 2 又会嫁接成为多播树成员节点 B 的下游节点。然而如果此过程可以提前预见并作出相应的处理便能有效减少链路断开的情况,从而降低链路修复过程造成的开销、降低丢包率等。通过对控制包报文和邻居表的扩展便能提前发现并主动作出处理。主动链路切换机制主要分为三个步骤:危险节点(可能因移动性造成断路的节点)发现、危险节点监控和链路切换。

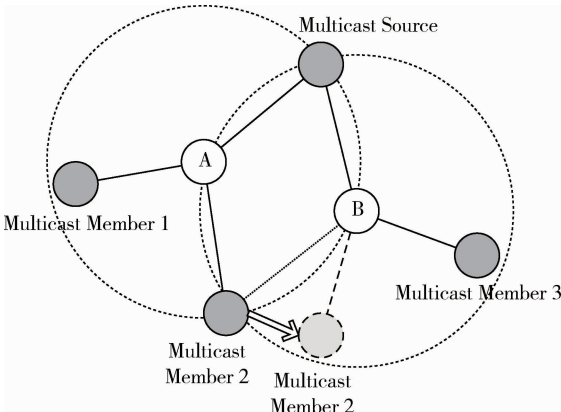


图2 主动链路切换

(1)危险节点发现。当多播树成员节点在自己的邻居表中存在非多播表中的上游和下游的节点,且邻居表中自己的上游节点的  $\Delta tds$  为 1,非上游和下游多播树成员节点的  $\Delta tds$  为 -1,则自己成为危险节点,进入危险节点监控。

(2)危险节点监控。如图 3 所示,多播成员节点 2 沿  $\vec{v}$  方向移动,在移动距离  $L$  后将离开多播树成员节点 A 的信号覆盖范围。要测算  $L$  较为复杂且额外开销较大,所以将监控时间定为多播成员节点 2 移动节点 A 的信号范围距离  $L'$  的时间  $t_c$ ,其中  $t_c = L'/ms$ 。在  $t_c$  时间范围内,危险节点多播成员节点 2 每次完成 HELLO 响应机制后即检查邻居表中节点 A 的  $\Delta tds$ ,如果  $\Delta tds$  仍然为 1 且  $td \geq (1 - \theta) \times tdThreshold$ ,则进入链路切换,如果  $\Delta tds$  为 -1 则将自己改为非危险节点。其中  $tdThreshold$  的设定根据节点的无线网卡设备不同而有所不同。由于本文采用 NS2\_2.30 作为仿真工具,NS2 中采用 AT&T (American Telephone & Telegraph) 公司的无线网卡 PCMCIA,节点的信号范围为 250 m,由 NS2 测算出相距 250 m 的节点间的传输时延  $tdThreshold$  约为 0.001 2;为给链路切换足够的时间,计算取为节点以当前移动 RREP\_WAIT\_TIME 时间的距离与  $L'$  的比值,如式(4)所示:

$$\theta = \frac{ms \times RREP\_WAIT\_TIME}{L'}$$

(4)

(3)链路切换。链路切换包括嫁接和剪枝过程。进入链路切换的危险节点首先进行嫁接,从邻居表中选择非自己的上游和下游节点中  $\Delta tds$  为 -1 且  $td$  最小的多播树成员节点,向其单播 RREQ-J 消息,收到 RREQ-J 的节点单播响应 RREP-J 消息。危

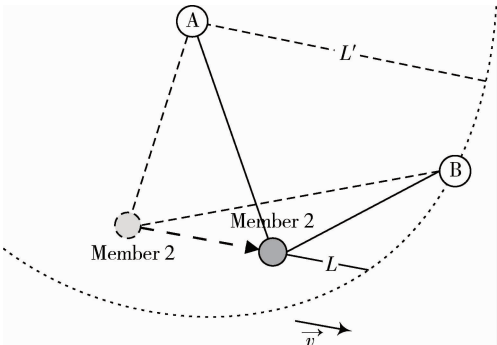


图3 节点移动时间测算

险节点收到 RREP-J 响应后,向原上游节点单播 MACT-P 消息开始剪枝,将 MRT 中自己的上游节点改为发送 RREP-J 的多播树成员节点并向其单播 MACT-J 消息进行链路激活。

3 仿真与分析

3.1 仿真环境设定与性能指标

本文采用 NS2\_2.30 对 MAODV 和 SMAODV 进行仿真实验,并用以下 3 个典型的衡量路由协议的技术指标作为考察指标。

(1)数据包转发率(Packet Delivery Ratio)。在多播环境下,计算网络中的数据包在目标节点接收与应收个数,不仅反映数据传送的可靠性能,也反映路由在失效下的稳定性、高效性和持续性。

(2)数据包平均端到端时延(Average End-to-End Delay of Packets)。计算数据包在源节点与目标节点之间的传送时间,通过其可以反映网络拥塞等因素。

(3)路由开销(Routing Overhead)。通过其可以反映在路由出现异常情况下控制包数与数据包数之间负载情况。

3.2 NS2 仿真实现

SMAODV 协议中的相关参数设定如表 2 所示。

表2 SMAODV 参数

| Parameter Name            | Parameter Value |
|---------------------------|-----------------|
| MY_ROUTE_TIMEOUT/s        | 50              |
| RREQ_RETRIES/s            | 3               |
| RREP_WAIT_TIME/s          | 0.5             |
| HELLO_INTERVAL/s          | 1               |
| GROUP_HELLO_INTERVAL/s    | 3               |
| ALLOWED_HELLO_LOSS/packet | 3               |

本文仿真实验中移动节点的速度采用 0 m/s, 5 m/s,10 m/s,20 m/s 和混合速度五种。其中前四

种均可以使用 NS2 提供的拓扑场景生成工具 setdest 来随机生成无线网的节点运动场景;但 setdest 不能满足生成混合速度无线节点运动场景的需求,所以需要手动编写脚本。TCL 脚本代码省略, setdest 使用命令格式如下:

```
setdest -v <l> -n <nodes> -p <pause_time> -M <max_speed> -t <simulation_time> -x <max_X> -y <max_Y>
or
setdest -v <l> -n <nodes> -s <speed_type> -m <min_speed> -M <max_speed> -P <pause_type> -p <pause_time> -t <simulation_time> -x <max_X> -y <max_Y>
```

3.3 仿真结果与分析

仿真就数据包转发率、数据包平均端到端时延和路由开销对比说明 MAODV 和 SMAODV 运行性能。

(1)多播组成员数对性能的影响。将多播数据发送源节点数设为 1,将节点的移动速度设为 5。测试结果如表 3 所示。

表 3 不同多播成员数对性能影响测试结果

| 类别    | 算法     | 10    | 20    | 25    | 40    | 50    |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据包   | MAODV  | 0.991 | 0.994 | 0.95  | 0.92  | 0.94  |
| 转发率   | SMAODV | 0.995 | 0.997 | 0.92  | 0.91  | 0.91  |
| 数据包平均 | MAODV  | 0.025 | 0.026 | 0.032 | 0.026 | 0.028 |
| 端到端时延 | SMAODV | 0.024 | 0.025 | 0.026 | 0.024 | 0.025 |
| 路由开销  | MAODV  | 0.22  | 0.48  | 0.72  | 0.95  | 1.15  |
|       | SMAODV | 0.21  | 0.36  | 0.62  | 0.85  | 1.05  |

SMAODV 采用基于链路稳定性的路由选择方法以及主动链路切换策略等,减少了控制消息的发送以及断路发生的情况,路径优于 MAODV 仅根据跳数选择的路径,在数据包平均端到端时延体现出较高的性能。

(2)多播数据发送源节点数对性能的影响。将多播组成员数设为 10,将节点的移动速度设为 5,测试结果如表 4 所示。

数据包转发率随着多播数据发送源节点数的增加而降低,同样 SMAODV 在数据包转发率上体现出高于 MAODV 的性能。

通过上述两组实验可以得出结论:SMAODV 在数据包转发率和数据包平均端到端时延上都优于 MAODV,在路由开销上略低于 MAODV,所以 SMAODV 在综合性能上优于 MAODV。

表 4 多播数据发送源节点数对性能影响测试结果

| 类别    | 算法     | 1     | 2     | 5     | 8     | 10    |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数据包   | MAODV  | 0.97  | 0.95  | 0.91  | 0.85  | 0.81  |
| 转发率   | SMAODV | 0.98  | 0.96  | 0.94  | 0.89  | 0.84  |
| 数据包平均 | MAODV  | 0.825 | 0.827 | 0.835 | 0.841 | 0.845 |
| 端到端时延 | SMAODV | 0.825 | 0.826 | 0.828 | 0.831 | 0.835 |
| 路由开销  | MAODV  | 0.25  | 0.51  | 0.75  | 1.25  | 1.65  |
|       | SMAODV | 0.25  | 0.55  | 0.85  | 1.35  | 1.75  |

4 结论

本文对 MAODV 协议进行改进,提出了基于链路稳定性的 Ad Hoc 网络多播路由协议 SMAODV。该协议主要包括路由构建和维护过程、主动链路切换策略、HELLO 响应机制。通过大量的实验进一步验证了 SMAODV 协议的综合性能,说明本文提出的基于链路稳定性的 Ad Hoc 网络多播路由协议具有正确性、可行性和优越性。

参考文献

[1] 叶雪,乐红兵. Ad Hoc 网络的多播路由协议的研究[J]. 科学技术与工程,2009,9(17):5217-5220.

[2] 王春雨,张曦煌. Ad Hoc 网络中基于网络编码的无线路由协议研究[J]. 计算机工程与设计,2013,34(5):1563-1567.

[3] 冯径,蒋磊,陈俊,等. 一种协同过滤的 Ad-hoc 网络可信路由协议[J]. 小型微型计算机系统,2013,34(10):2329-2334.

[4] 杨红丽,郭华. 基于改进 NSGA-II 的无线 Ad-hoc 网络任务调度算法[J]. 计算机科学,2013,40(9):61-63,72.

[5] 古稀林,王超,冯志先,等. 移动 Ad-hoc 网络中无线跳频频率资源分配机制研究[J]. 通信技术,2019,52(3):646-652.

[6] 韩冰青,陈伟,张宏. 支持多速率多播的 Ad hoc 网络资源分配算法[J]. 计算机科学,2012,39(12):55-59.

[7] 楼俐,范建华,胡永扬,等. 军用 Ad Hoc 网络分层体系架构及安全协议[J]. 计算机工程,2019,45(6):188-192,198.

[8] 张一宸,彭来献,徐任晖. Ad hoc 网络中基于多波束天线的集中式低时延调度算法[J]. 电讯技术,2019,59(6):641-646.

[9] 林勇,宋三华. 基于链路连通时间的移动 Ad Hoc 网络路由[J]. 中国电子科学研究院学报,2019,14(2):163-167,183.

[10] 李麟. 基于 Ad Hoc 网络的医院智能安防控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2019,27(4):64-67.

(收稿日期:2020-02-21)

作者简介:

周永塔(1981-),男,硕士,实验师,主要研究方向:大数据分析。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所