

应急通信网拓扑模型及其分析

王巍^{1,2}, 赵文红²

(1. 通信信息控制和安全技术重点实验室, 浙江 嘉兴 314033; 2. 江南通信技术研究所, 浙江 嘉兴 314033)

摘 要: 为了解决应急通信网络拓扑特性分析问题, 从拓扑模型建立、容量分析、拓扑分析等几方面对应急通信网络模型进行了研究。在模型建立方面, 主要考虑了骨干节点、接入节点和终端节点在应急通信网络中的不同之处, 并进行分别建模; 在容量分析方面, 分别给出了任意网络和随机网络的网络容量数量级; 在拓扑分析方面, 主要从最短路径、节点度、富人俱乐部特性、介数、流中心性、偏心度、紧密活性等拓扑特性入手, 通过多次实验进行应急通信网络特性研究。容量分析和拓扑分析的结果表明, 提出的应急通信网络模型建立方法具有较高的容量, 并符合实际应急通信网络特性。

关键词: 应急通信网; 拓扑模型; 网络容量; 拓扑特性

中图分类号: TP393.08

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z1-0201-09

Topology modeling and analysis of emergency communications network

WANG Wei^{1,2}, ZHAO Wen-hong²

(1. Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaying 314033, China;

2. Jiangnan Electronic Communication Institute, Jiaying 314033, China)

Abstract: The construction method, throughput and related properties about the topology model of emergency communication networks were discussed. Firstly, the topology modeling method was presented by three steps, such as the constructions of backbone network, access network and station network. Then, the capacity of network model was analyzed in conditions of arbitrary networks and random networks. At last, some topology properties were discussed, including the shortest path, node degree, rich club, betweenness centrality, current flow centrality, eccentricity and closeness vitality. The experiment results show that the proposed modeling method is steady and applicable to the emergency communication.

Key words: emergency communication network; topology model; network throughput; topology property

1 引言

应急通信指在出现自然的或人为的突发性紧急情况时, 同时包括重要节假日、重要会议等通信需求骤增时, 综合利用各种通信资源, 保障救援、紧急救助和必要通信所需的通信手段和方法, 是一种具有暂时性的、为应对自然或人为紧急情况而提

供的特殊通信机制。应急通信突出体现在“应急”二字上, 在面对公共安全、紧急事件处理、大型集会活动、救助自然灾害、抵御敌对势力攻击、预防恐怖袭击和众多突发情况的应急反应, 均可以纳入应急通信的范畴。

在国际上, 许多国家非常重视应急通信网络的研究和开发工作, 特别是欧美发达国家和亚洲的日

收稿日期: 2012-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60872041, 61072066)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60872041, 61072066)

本。美国从 20 世纪 70 年代开始建设应急通信网，并利用自由空间光通信（FSO, free space optics）、WiMAX 和 Wi-Fi 等技术来提高应急通信保障能力，目的是为了满足不同美国政府对于紧急事件的指挥调度需求^[1]。日本已建立起较为完善的防灾通信网络体系，如中央防灾无线网、防灾互联通信网等。此外，国际上许多标准化组织（例如 ITU-R、ITU-T、ETSI 和 IETF 等）也在积极推进应急通信标准的研究。ITU-R 主要从预警和减灾的角度对应急通信展开研究，包括利用固定卫星、无线电广播、移动定位等向公众提供应急业务、预警信息和减灾服务；ITU-T 从开展国际紧急呼叫以及增强网络支持能力等方面进行研究，主要包括紧急通信业务（ETS, emergency telecommunications service）和减灾通信业务（TDR, telecommunication for disaster relief）2 大领域；ETSI 主要关注紧急情况下组织之间以及组织和个人之间的通信需求；IETF 对应急通信的研究涵盖通信服务需求、网络架构和协议等多个方面。

近年来，我国应急通信研究重点围绕公众通信网支持应急通信来展开，对于现有的固定和移动通信网，主要研究公众到政府、政府到公众的应急通信业务要求和网络能力要求，包括定位、就近接入、电力供应、基站协同、消息源标志等，除此之外研究在互联网上支持紧急呼叫，包括用户终端位置上报、用户终端位置获取、路由寻址等关键环节。虽然我国的应急通信保障体系建设有了很大发展，但是依然存在技术体制落后、资金投入不足等问题，与应急通信的实际要求还有较大差距。此外，应急通信保障的研究工作大都没有充分关注和利用无线自组网技术，也没有考虑融合多种通信技术手段来提供全方位、可靠的应急通信保障，而是过多强调发展集群通信、短波无线通信和卫星通信系统。

现有应急通信网络方面的研究主要关注于专项组网技术方面。如文献[2]介绍了基于策略的接纳控制技术，并在该技术的基础上分析了利用资源预留协议的策略控制信息提高高优先级业务接纳率的方法。文献[3,4]从系统角度对应急通信网络的关键技术进行研究，但没有对其拓扑模型进行分析。而现有的网络拓扑方面的研究^[5~13]主要集中在 Internet 网络拓扑建模、控制、分割、与发现方面，没有针对应急通信的特点对网络拓扑模型本身进行分析。本文通过分析应急通信网的特点，从拓扑建模入手，研究应急通信网的容量和拓扑特性，以

求为应急通信网的研究提供一些参考依据。

2 应急通信网络拓扑模型

一般来说，应急通信网络主要包括高空平台、地面接入系统、用户终端 3 部分。对应急通信网络进行建模时，本文将这 3 个部分分别对应于骨干节点组成的骨干网络、接入节点组成的接入网络和终端节点组成的终端网络。同时，由于无线自组网具有网络自组织和协同合作特征，非常适合组建应急通信网络来协调各类人员展开救援行动和应对突发事件，所以本文主要考虑以无线自组网的典型实例：ad hoc 网络和 Mesh 网络进行应急通信网络的模型构建，以加强应急突发场合下的通信保障能力。

应急通信网络模型中，骨干节点主要进行网络信息中继和路由；接入节点主要为终端节点提供接入服务，同时也提供路由功能；终端节点主要进行网络业务的接收和发送。考虑到应急通信网络建立时的突发性，网络终端节点往往没有远距离通信能力，只有骨干节点和接入节点可以进行远距离通信，所以本文提出的网络模型中终端节点功能受限，具体包括：其中终端节点一般直接通过接入节点共享网络资源，若终端节点无法直接连接到接入节点，则通过本地接入节点下的其他终端节点接入网络；终端节点只能通过本地接入节点和其他接入节点下的终端节点进行通信，而不能直接连接骨干节点访问网络。此外，由于骨干节点往往还承载着其他区域的网络业务，不能将应急通信网络的主要流量全部置于骨干节点，而应该由接入节点尽量承载网络流量。

本文提出的应急通信网络模型构建过程分为 4 个部分，分别是初始化、生成骨干节点、生成接入节点、生成终端节点。在模型构建过程中，主要考虑了节点位置、节点通信距离、节点连接关系等因素。具体过程如表 1 所示。

表 1 应急通信网络模型构建过程

步骤	说明
Step 1 Init()	//初始化骨干节点、接入节点、终端节点各自的数量和通信距离，以及通信网络覆盖范围
Step 2 GenBackboneNode	//生成骨干节点，确定其位置和相互间的连接关系
Step 3 GenAccessNode	//生成接入节点，确定其位置和相互间的连接关系，以及接入节点和骨干节点间的连接关系
Step 4 GenStaNode	//生成终端节点，确定其位置和相互间的连接关系，以及接入节点和终端节点间的连接

图 1 给出了一个应急通信网拓扑模型的实例, 其中五角星节点为骨干节点, 圆形节点为接入节点, 方形节点为终端节点, 骨干节点与终端节点通过接入节点相连。骨干节点和接入节点组成 Mesh 网络, 提供路由和接入功能; 终端节点或者通过接入节点直接接入到 Mesh 网络, 或者通过与其他终端节点组成 ad hoc 网络后通过其他终端节点的中继功能接入到 Mesh 网络。

图 2~图 4 分别给出了骨干节点、接入节点和终端节点的生成过程。在节点的生成过程中, 主要考虑了网络覆盖范围、节点通信半径、节点数量等参数, 最后给出了 3 种节点的地理位置和连接矩阵。在应急通信网络生成模型中, 节点生成

过程遵循网络覆盖范围逐步扩张、骨干→接入→终端逐级建立的原则, 可以满足大规模网络建模的需求。

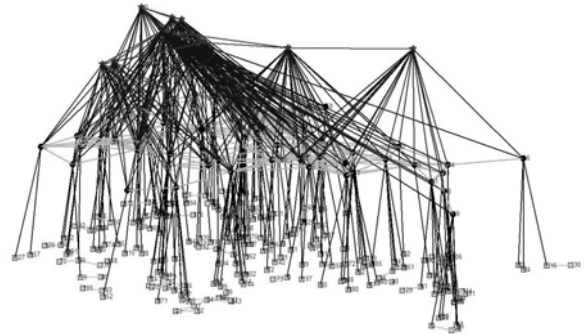


图 1 应急通信网拓扑模型实例

```
function [BNode LinkBN] = GenBackboneNode(numBNode,radiusBN,scaleX,scaleY)
//输入: 骨干节点通信距离 radiusBN、数量 numBNode, 通信网络覆盖范围 scaleX,scaleY
//输出: 骨干节点 BNode 及其相互间的连接矩阵 LinkBN

BNode=struct('xLocation', {}, 'yLocation', {}, 'type', {}, 'radius', {});
scaleXmin=0;          scaleXmax=scaleX;      scaleYmin=0;          scaleYmax=scaleY;    //初始化骨干网范围
for i=1:numBNode      //为节点类型和通信半径赋值
    BNode(i).type=BackboneNode;      BNode(i).radius=radiusBN;
LinkBN=zeros(numBNode,numBNode);    //初始化连接矩阵
BNode(1).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);    BNode(1).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
//随机生成第一个节点位置信息
for i=2:numBNode      //更新网络覆盖范围
    scaleXmin=max(min(BNode(i-1).xLocation-radiusBN,scaleXmin),0);
    scaleXmax=min(max(BNode(i-1).xLocation+radiusBN,scaleXmax),scaleX);
    scaleYmin=max(min(BNode(i-1).yLocation-radiusBN,scaleYmin),0);
    scaleYmax=min(max(BNode(i-1).yLocation+radiusBN,scaleYmax),scaleY);
    BNode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);    BNode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
    //随机生成节点位置信息
    disVector=zeros(1, i-1);
    for j=1: i-1
        disVector(j)=distance(BNode(i),BNode(j));    //计算当前节点和已有节点的物理距离
    while all(disVector>radiusBN)    //若所有的物理距离大于通信距离, 则重新生成节点位置
        BNode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);
        BNode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
        for j=1: i-1
            disVector(j)=distance(BNode(i),BNode(j));
        for j=1:length(disVector)    //更新连接矩阵
            if disVector(j)<=radiusBN
                LinkBN(i,j)=1;
            LinkBN=LinkBN+LinkBN;    //将连接矩阵转化为对称矩阵
```

图 2 骨干节点生成过程

```

function [ANode LinkAN LinkBAN] = GenAccessNode(numANode,radiusAN,scaleX,scaleY,BNode)
//输入: 接入节点通信距离 radiusAN、数量 numANode, 通信网络覆盖范围 scaleX,scaleY, 骨干节点 BNode
//输出: 接入节点 ANode 及其相互间的连接关系 LinkAN, 以及接入节点和骨干节点间的连接矩阵 LinkBAN

ANode=struct('xLocation',{},'yLocation',{},'type',{},'radius',{});

numBNode=length(BNode);

scaleXmin=min(BNode.xLocation);      scaleXmax=max(BNode.xLocation);      //得到已有网络的覆盖范围
scaleYmin=min(BNode.yLocation);      scaleYmax=max(BNode.yLocation);

for i=1:numANode      //为节点类型和通信半径赋值
    ANode(i).type=AccessNode;      ANode(i).radius=radiusAN;
LinkAN=zeros(numANode,numANode);      LinkBAN=zeros(numBNode,numANode);      //初始化连接矩阵
ANode(1).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);      ANode(1).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
//随机生成第一个节点位置信息
for j=1:numBNode      //确定第一个接入节点和所有骨干节点间的连接关系
    disVectorBA=distance(ANode(1),BNode(j));
    if disVectorBA<=radiusAN
        LinkBAN(j,1)=1;
for i=2:numANode      //更新网络覆盖范围
    scaleXmin=max(min(ANode(i-1).xLocation-radiusAN,scaleXmin),0);
    scaleXmax=min(max(ANode(i-1).xLocation+radiusAN,scaleXmax),scaleX);
    scaleYmin=max(min(ANode(i-1).yLocation-radiusAN,scaleYmin),0);
    scaleYmax=min(max(ANode(i-1).yLocation+radiusAN,scaleYmax),scaleY);
    ANode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);      ANode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
//随机生成节点位置信息
    disVector=zeros(1,i-1);
    for j=1:numBNode
        disVector(j)=distance(ANode(i),BNode(j));      //计算当前节点和已有骨干节点的物理距离
        while all(disVector>radiusAN)      //若所有的物理距离大于通信距离, 则重新生成节点位置
            ANode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);
            ANode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
        for j=1:numBNode
            disVector(j)=distance(ANode(i),BNode(j));
        for j=1:numBNode      //更新接入节点与骨干节点连接矩阵
            if disVector(j)<=radiusAN
                LinkBAN(j,i)=1;
        for j=1:i-1      //更新接入节点连接矩阵
            disVector=distance(ANode(i),ANode(j));
            if disVector<=radiusAN
                LinkAN(j,i)=1;
LinkAN=LinkAN+LinkAN';      //将接入节点连接矩阵转化为对称矩阵

```

图 3 接入节点生成过程

```

function [SNode LinkSN LinkASN]=GenStaNode(numSNode,radiusSN,scaleX,scaleY,BNode,ANode)
//输入: 终端节点通信距离 radiusSN、数量 numSNode, 通信网络覆盖范围 scaleX,scaleY, 骨干节点 BNode, 接入节点 ANode
//输出: 终端节点 SNode 及其相互间的连接关系 LinkSN, 以及接入节点和终端节点间的连接矩阵 LinkASN

SNode=struct('xLocation', {}, 'yLocation', {}, 'type', {}, 'radius', {});
SARelation=struct('index', {}, 'SList', {});
numANode=length(ANode);
scaleXmin=min(BNode.xLocation,ANode.xLocation);    scaleXmax=max(BNode.xLocation,ANode.xLocation);
scaleYmin=min(BNode.yLocation,ANode.yLocation);    scaleYmax=max(BNode.yLocation,ANode.yLocation);
for i=1:numANode    //初始化接入节点和终端节点的关系列表
    SARelation(i).index=i;    SARelation(i).SList=zeros(1,0);
for i=1:numSNode    //为节点类型和通信半径赋值
    SNode(i).type=StationNode;    SNode(i).radius=radiusSN;
LinkSN=zeros(numSNode,numSNode);    LinkASN=zeros(numANode,numSNode);    //初始化连接矩阵
for i=1:numSNode
    SNode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);    SNode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
    //随机生成节点位置信息

    disVectorAS=zeros(1,numANode);
    for j=1:numANode    //计算与所有接入节点的物理距离
        disVectorAS(j)=distance(SNode(i),ANode(j));
    disVectorcSS=zeros(1,i-1);
    for j=1:i-1    //计算与所有终端节点的物理距离
        disVectorcSS(j)=distance(SNode(i),SNode(j));
    while all(disVectorAS>radiusSN)&&all(disVectorcSS>radiusSN)    //若所有的距离大于通信距离, 则重新生成节点
        SNode(i).xLocation=rand(scaleXmin,scaleXmax);    SNode(i).yLocation=rand(scaleYmin,scaleYmax);
        disVectorAS=zeros(1,numANode);
        for j=1:numANode
            disVectorAS(j)=distance(SNode(i),ANode(j));
        disVectorcSS=zeros(1,i-1);
        for j=1:i-1
            disVectorcSS(j)=distance(SNode(i),SNode(j));
    if any(disVectorAS<=radiusSN)    //若与某个接入节点的物理距离小于等于通信距离
        [minV,minI]=min(disVectorAS);    //选择最近的接入节点
        LinkASN(minI(1),i)=1;    //更新接入节点和终端节点的连接矩阵
        SARelation(minI).SList(length(SARelation(minI).SList)+1)=i;    //更新此接入节点下的终端列表
    elseif any(disVectorcSS<=radiusSN)    //若没有接入节点可以提供接入
        [minV,minI]=min(disVectorcSS);    //选择最近的终端节点
        for j=1:numANode    //寻找此终端节点所接入的接入节点
            if any(SARelation(j).SList==minI)
                break;
        for k=1:length(SARelation(j).SList)    //计算当前节点和此接入节点下其他终端节点的物理距离
            disVectorcSS=distance(SNode(i),SNode(SARelation(j).SList(k)));
            if disVectorcSS<=radiusSN
                LinkSN(SARelation(j).SList(k),i)=1;    //更新终端节点连接矩阵
        SARelation(j).SList(length(SARelation(j).SList)+1)=i;    //更新此接入节点下的终端列表
    scaleXmin=max(min(SNode(i).xLocation-radiusSN,scaleXmin),0);
    scaleXmax=min(max(SNode(i).xLocation+radiusSN,scaleXmax),scaleX);
    scaleYmin=max(min(SNode(i).yLocation-radiusSN,scaleYmin),0);
    scaleYmax=min(max(SNode(i).yLocation+radiusSN,scaleYmax),scaleY);
    LinkSN=LinkSN+LinkASN';    //将终端节点连接矩阵转化为对称矩阵

```

图 4 终端节点生成过程

3 模型容量分析

在应急通信网络中，节点以自组织的方式进行互相通信，节点间的通信经常受到动态网络拓扑变化的影响。同时由于无线信道本身的物理特性，它所能提供的网络带宽相对有线信道要低很多。此外，考虑到竞争共享信道产生的碰撞、信号衰减、干扰等因素，节点可能获得的带宽将远小于理论最大值。

假定骨干网络、接入网络、终端网络中的各自节点的地位平等且无线传输范围相同。

如下列条件满足，则认为来自节点 x_i 的数据被节点 x_j 成功接收。

1) 节点 x_j 在节点 x_i 的传输范围之内，即 $|x_i - x_j| \leq r$ ，其中 r 为传输半径；

2) 在同一信道上同时传输的其他节点 x_k 满足 $|x_k - x_j| \geq (1 + \Delta)|x_i - x_j|$

上述条件为接收点提供了一个有效区域。在有效区域内，临近节点产生的同信道干扰被限制。有效区域的半径是发送者和接收者距离的 $(1 + \Delta)$ 倍。 Δ 是同信道复用时无干扰传输所需要的空间传输范围的保护冗余量，它和节点数量、传输损耗、节点的发射功率等特性密切相关。

假设源节点的发射功率、信道损耗和天线增益相同，且应急通信网的总信道 W 分为 M 个子信道，

$$\text{满足 } \sum_{i=1}^M W_i = W。$$

根据文献[14]分析可知。

1) 若应急通信网中各节点的位置固定，则网络传输容量上界可以表示为

$$\lambda(n) \propto O\left(\frac{W\sqrt{n_b + n_a + n_s}}{\max(r_b, r_a, r_s)}\right)$$

其中， n_b 为骨干节点数量， n_a 为接入节点数量， n_s 为终端节点数量， r_b 为骨干节点传输半径， r_a 为接入节点传输半径， r_s 为终端节点传输半径。

2) 若应急通信网中各节点的位置随机，则网络传输容量上界可以表示为

$$\lambda(n) \propto O\left(\frac{W \max(r_b, r_a, r_s)}{\sqrt{(n_b + n_a + n_s) \log\left(\frac{n_b + n_a + n_s}{\max(r_b, r_a, r_s)^2}\right)}}\right)$$

4 模型拓扑特性的实验分析

在对应急通信网络模型进行特性分析时，我们通过多次实验从最短路径、节点度、富人俱乐部特性、介数、流中心性、偏心度、紧密活性等几方面开展研究工作。实验参数包括：骨干节点数量 numBNode 为 10，接入节点数量 numANode 为 60，终端节点 numSNode 为 200，网络覆盖范围 scaleX 为 100，scaleY 为 100，骨干节点通信半径 radiusBN 为 25，接入节点通信半径 radiusAN 为 15，终端节点 radiusSN 通信半径为 5，实验共进行了 1 000 次。

1) 最短路径分析

最短路径的分布和平均值取决于网络的规模，但并不随着网络规模的增加而急剧增大，这些统计量可以度量网络的信息传输效率和代价。从图 5 中可以看出，本文提出的应急网络拓扑模型中大部分最短路径的长度为 2~7 之间。

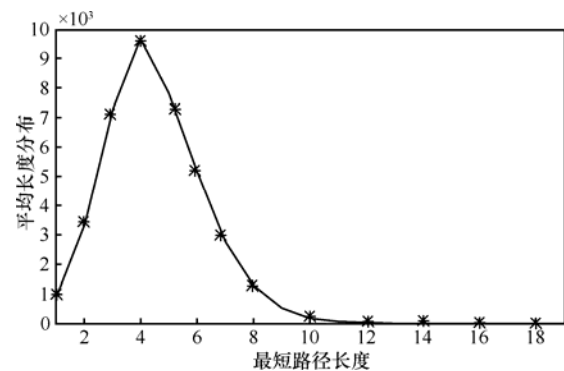


图 5 最短路径的分布

2) 节点度分析

网络节点的度反映了节点和其他节点的连接紧密程度。本文主要从度分布、相称性 (assortativity)、度中心性、度连通性几个方面进行分析。从图 6 中可以看出，本文建立的应急通信网模型中，大部分节点的度都在 5 以下，保证了网络节点不会同时与多个邻居节点进行通信，避免了网络通信信号的相互干扰，可以保证网络的整体吞吐量；度中心性被定义为一个节点的边数。图 7 给出了网络模型的度中心性分析结果。从图 7 中可以看出，骨干节点和接入节点的度中心性较大，而终端节点较小，同时骨干节点和接入节点的度中心性随着网络建立的过程逐步降低。

平均度连通性是指具有某个度数的节点的最近邻居节点的度数的平均值，其值反映了网络中具

有哪些度数的节点对网络连通性贡献较大。图 8 给出了网络模型的节点度连通性分析结果。从图 8 中可以看出，节点度连通性最大的节点集中于度为 10~30 的节点，这一结果与下文富人俱乐部特性分析结果相符合，此外度为 1 的节点度连通性较大是因为节点较多的原因。

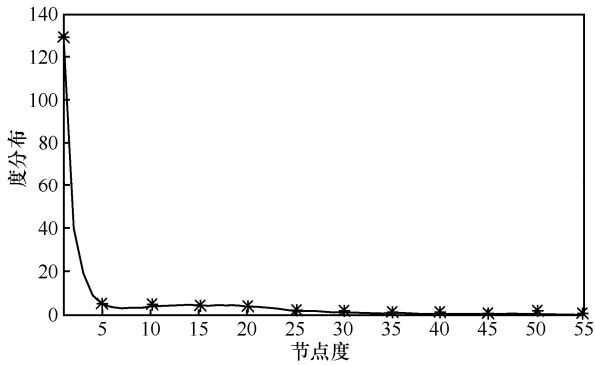


图 6 节点度分布分析

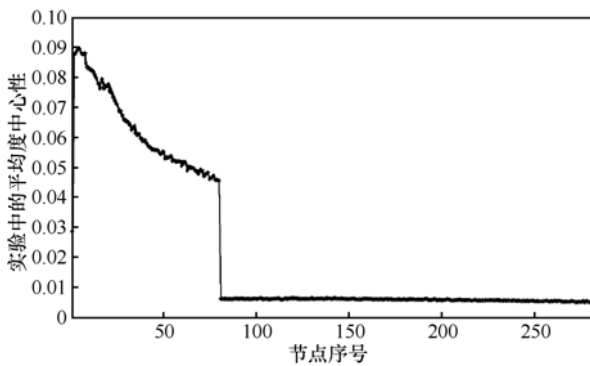


图 7 度中心性分析

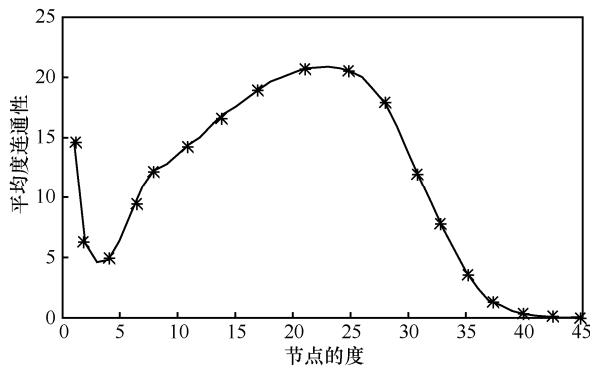


图 8 平均度连通性分析

3) 富人俱乐部特性分析

富节点指网络中具有大量的边的少量节点，他们倾向于彼此间相互连接。网络中用富人俱乐部刻画这种特性，它表示的是网络中前几个度最大的节点间实际存在的边数与这几个节点间总的可能存在的边数的比值。图 9 给出了网络模型的富人俱乐部

特性分析结果。从图 9 中可以看出，度为 1~35 的节点更倾向于彼此间相互连接，其中又以度为 20~25 的节点为最。

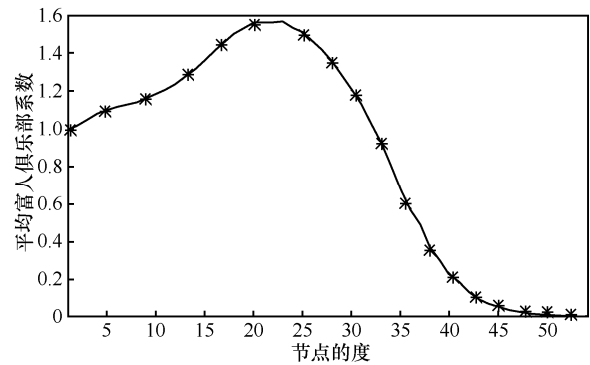


图 9 富人俱乐部特性分析

4) 介数分析

节点的介数衡量了网络中通过该节点的最短路径的数量，可以在很大程度上反映节点在网络中的重要程度。图 10 给出了网络模型的介数分析结果。从图 10 中可以看出，骨干节点的介数最大，其次是接入节点，而终端节点的介数最小，这一实验结果符合实际网络的真实情况。

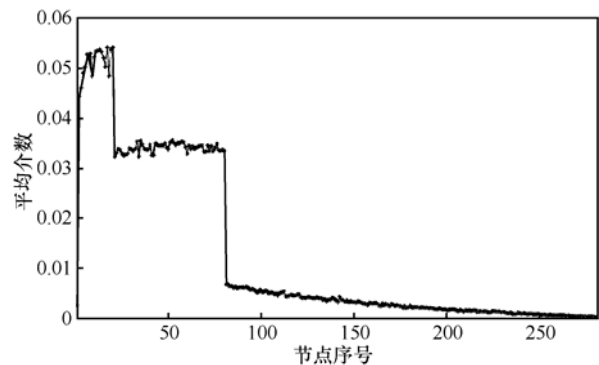


图 10 介数分析

5) 流中心性分析

节点的流介数是指通过节点的流量占所有节点间流量的百分比，图 11 给出了网络模型的流介数分析结果。从图 11 中可以看出，骨干节点的流介数最大，其次是接入节点，而终端节点的流介数最小，这一实验结果和节点的介数分析结果类似，但与之不同的是骨干节点和接入节点的流介数差别不是很大，这是因为网络中的流量更集中于接入节点，而不是骨干节点。

紧密中心性(closeness centrality)是中心性的一种复杂度量，它被定义为结点到其它可达结点的平

均测地距离（比如最短路径），在网络分析中，紧密度倾向于表示最小路径长度，因为这样会对更多的中心结点赋予更高的值，而且它通常与其它度量（如，度）相联系。流紧密中心性（也称为信息中心性 information centrality）将两点间的距离定义为两节点间的流量差，扩展了紧密中心性，在最短路径的基础上考虑了节点信息流量对节点重要性的影响因素。从图 12 中可以看出，骨干节点和接入节点的流紧密中心性类似，而终端节点的流紧密中心性较小，这一实验结果说明网络流量更集中的接入节点对网络的影响也是很大的，其影响力度甚至可以和骨干节点相当。

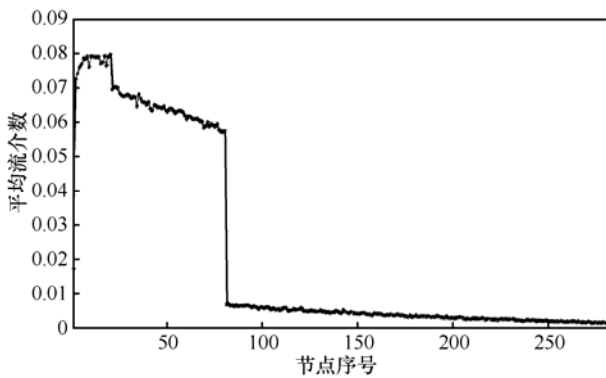


图 11 流介数分析

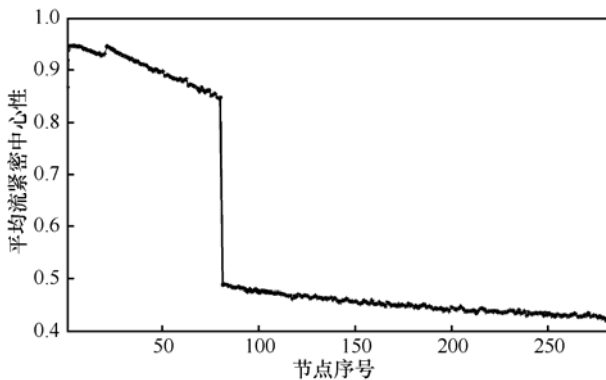


图 12 流紧密中心性分析

6) 偏心度分析

每个节点的偏心度是它到其他节点距离中的最大值。平均偏心度（average eccentricity）就是指所有节点偏心度的平均值，反映了图的直径。图 13 给出了平均偏心度的分析结果，从图 13 中可以看出骨干节点和接入节点的偏心度较小，这是因为网络的构建过程是先建立骨干节点和接入节点，后建立终端节点；且随着各种节点越来越多，节点的偏心度也越来越大。

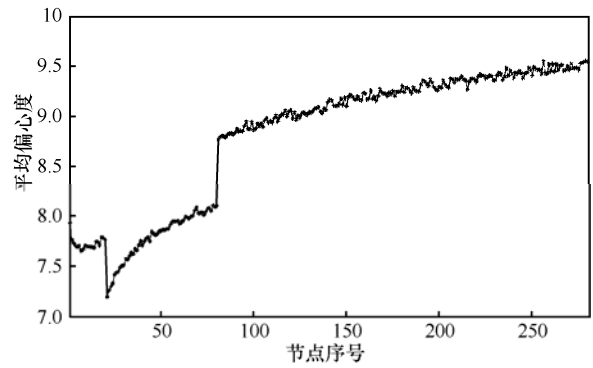


图 13 平均偏心度分析

7) 紧密活性分析

令网络中 2 个节点之间的距离表示节点间发送信息的代价，紧密活性（closeness vitality）表明了若某个节点离开网络后所有网络节点间通信代价提高的程度。图 14 给出了 1 000 次实验中网络的平均紧密活性变化情况。从图 14 中可以看到接入节点对网络的紧密活性影响最大，而骨干节点影响较小，这说明网络流量将主要通过接入节点和终端节点，保证了少数骨干节点不会因为流量太大而中断服务。

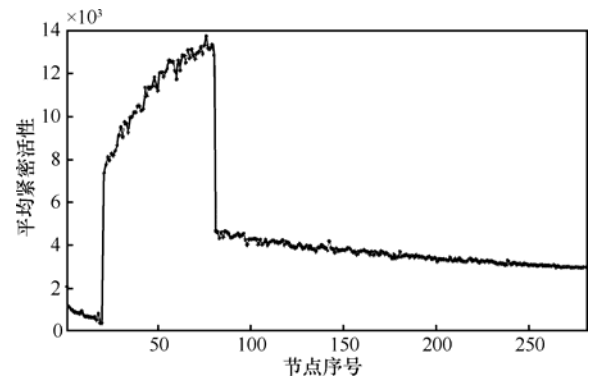


图 14 平均紧密活性分析

5 结束语

在突如其来的大型自然灾害和公共突发事件面前，常规的通信手段往往无法满足通信需求。应急通信网络正是为应对自然或人为紧急情况而提供的特殊通信机制，在公众通信网设施遭受破坏、性能降低、话务量突增的情况下，采用非常规的、多种通信手段组合的方式来恢复通信能力。本文从拓扑模型建立、容量分析、拓扑分析等几方面开展应急通信网络模型研究。在模型建立方面，主要考虑了骨干节点、接入节点和终端节点在应急通信网络中的不同之处，并进行分别建模；在容量分析方

面, 分别给出了固定节点和随机节点的网络容量上限; 在拓扑分析方面, 主要从最短路径、节点度、富人俱乐部特性、介数、流中心性、偏心度、紧密活性等拓扑特性入手, 通过多次实验进行应急通信网络特性研究。容量分析和拓扑分析的结果表明, 本文提出的应急通信网络模型建立方法具有较高的容量和符合实际应急通信网络特性的特点, 对建立真实应急通信网络有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] FEMA. PY 2009 Interoperable emergency communications grant pram[EB/OL].<http://www.fema.gov/government/grant/iecgp/index.shtm>. 2012.
- [2] 任璐园, 曲桦, 赵季红. 应急通信中基于策略的接纳控制技术的研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(18): 3950-3956.
REN L Y, QU H, ZHAO J H. Research of policy-based admission control technology for emergency[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(18): 3950-3956.
- [3] CHITI F, FANTACCI R. A broadband wireless communications system for emergency management[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 7(6): 8-14.
- [4] ANSARI N, ZHANG C. Networking for critical conditions[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 7(4): 73-81.
- [5] 周苗, 杨家海, 刘洪波等. Internet 网络拓扑建模[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 109-123.
ZHOU M, YANG J H, LIU H B, *et al.* Modeling the complex Internet topology[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 109-123.
- [6] KRIOUKOV D, CHUNG F, CLAFFY K C. The Workshop on Internet Topology (WIT) Report[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 69-73.
- [7] ALDERSON D, LI L, WILLINGER W. Understanding internet topology: principles, models and validation[J]. ACM Trans on Networking, 2005, 13(6): 1205-1218.
- [8] 陈力军, 毛莺池, 陈道蕃等. 平均度约束的无线传感器网络拓扑控制[J]. 计算机学报, 2007, 30(9): 1544-1550.
CHEN L J, MAO Y C, CHEN D X, *et al.* Topology control of wireless sensor networks under an average degree constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(9): 1544-1550.
- [9] LI N, HOU J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solution[A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM 2004[C]. Hongkong, China, 2004.
- [10] 焦健, 姚珊, 李肖坚. 基于测量体扩散的网络拓扑双向发现研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(5): 903-910.
JIAO J, YAO S, LI X J. Research on network bidirectional topology discovery based on measurer by spreading[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(5): 903-910.
- [11] 王志刚, 王汝传, 王绍棣等. 网络拓扑发现算法的研究[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 36-43.
WANG Z G, WANG R C, WANG S D, *et al.* Research on network topology discovery algorithm[J]. Journal on Communications, 2004, 25(8): 36-43.
- [12] DONNET B, FRIEDMAN T. Internet topology discovery: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(4): 56-69.
- [13] 李建东, 田野, 盛敏等. 大规模 ad hoc 网络拓扑分割探测研究[J]. 通信学报, 2008, 29(9): 54-61.
LI J D, TIAN Y, SHENG M, *et al.* Partition detection for large scale ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(9): 54-61.
- [14] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.

作者简介:



王巍 (1980-), 男, 河北张家口人, 博士, 江南通信技术研究所在高级工程师, 主要研究方向为网络攻击和网络安全。



赵文红 (1981-), 女, 河北衡水人, 硕士, 江南通信技术研究所在工程师, 主要研究方向为仿真设计。