

基于空间结构的战术通信网络建模

李俊, 吕欣, 谭跃进

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对目前通信网络模型对网络空间结构和节点异质性考虑不足的问题, 结合战术通信网络的特点, 将网络节点分为骨干节点、接入节点和用户节点, 提出了一种综合考虑网络节点空间位置和节点多样性的战术通信网络演化模型, 解析计算了演化模型的度分布。对网络的聚集系数、特征路径等进行的仿真分析结果表明, 模型生成网络的特征路径长度随网络规模的增大反而不断减小, 具有良好的连通能力。此外, 生成网络更加均匀化并表现出明显的层次结构, 具有战术通信网络的基本特点。

关键词: 战术通信网; 复杂网络; 幂律; 空间结构; 特征路径; 层次结构

中图分类号: TN 915

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.07.025

Spatial-based modeling of tactical communication networks

LI Jun, LÜ Xin, TAN Yue-jin

(Coll. of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the lack of research over special structure and heterogeneity of communication network model, based on the characteristics of tactical communication networks, a spatial-based evolving model for tactical communication networks is proposed, in which the nodes are classified into three types: backbone nodes, interface nodes and user nodes. Degree distribution of the model is deduced. Simulation results show that the characteristic path length is decreased while the size of network increases. The generated networks are more uniform and behave the basic characteristics of tactical communication networks, e. g., fine connectivity, distinct hierarchy structure and smaller network diameter, etc.

Key words: tactical communication networks; complex networks; power law; spatial structure; characteristic path length; hierarchical structure

0 引言

随着战术通信网络的不断发展, 网络规模越来越大, 节点类型和通信方式也不断增加, 这导致传统的通信网络模型, 如树型、星型、总线型、随机图等已经无法满足当前战术通信网络研究的需要^[1-3]。近年来复杂网络领域研究的发展^[4-5], 为战术通信网络建模提供了新的思路。科学家们对万维网、电话线路网、移动电话网、光纤网等各种实际通信网络的实证研究发现^[6-9], 大多数通信网络的结构都呈现出“无标度”特性, 即网络节点的度分布服从“幂律”。为了描述现实网络的这种特性, 科学家们提出了许多通信网络模型, 最著名的就是 BalaBási 等提出的 BA 模型^[10]。通过网络增长和择优连接, BA 模型能够对“幂律”的出现进行合理的解释, 该模型中节点加入网络是基于全局信息的, 新加入的节点有能力与网络中所有节点连接, 此外加入的节点没

有差别。为了描述具有局部拓扑信息约束的复杂网络, 已经有学者提出了一些基于“局域世界”的网络演化模型, 如李翔、陈关荣等^[11]提出的“李-陈模型”, 该模型在全网范围内随机选取一部分节点构成“局域世界”, 新节点加入网络后按照偏好选择连接的原则在“局域世界”内选择节点建立连接。该模型首次提出了基于局部拓扑信息演化的概念, 但是存在与 BA 模型相同的缺陷——网络规模较大时节点聚类系数趋近于 0。Zhang 等^[12]在“李-陈模型”的基础上, 采用在“局域世界”中的邻居节点间加边的机制构造了聚类系数可调的网络模型, 但这种加边机制的物理意义并不明确。Cao、Wang 等人^[13]和 Guan、Wu 等人^[14]提出了类似的基于邻居节点的“局域世界”演化模型, 而前者需要对“局域世界”的节点数量进行严格控制, 后者只能将网络中某一节点的邻居节点作为“局域世界”, 存在很大局限性。

由此可以看出, 现有的通信网络模型还很少考虑网络

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2009-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金(70771111)资助课题

作者简介: 李俊(1972-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为复杂网络理论及应用。E-mail: lijun_nudt@sina.com

节点空间位置和网络节点的多样性对网络结构的影响^[15],然而在现实战术通信网络中,通信节点根据作战需要分布于作战地域内,由于节点间通信主要依靠无线链路,其通信范围受到发信机功率、战场频谱环境、节点所处地理位置等诸多因素的限制,有效通信距离有限,所以每个节点只能选择与通信范围内的其他节点建立通信连接^[16-19]。本文基于战术通信网络的特点,综合考虑网络节点的空间位置和通信节点的多样性,提出了一种基于空间结构的战术通信网络演化模型,通过对模型的解析和仿真分析表明,该模型能较好地模拟战术通信网络拓扑结构,具有战术通信网络的一般特点,从而为战术通信网络建模提供了新的思路。

1 战术通信网络的特点

战术通信网络是综合利用无线电台、微波接力机、散射、卫星等多种通信方式构建的多手段、多层次、立体化的战术级网络。它的主要功能是为战场情报侦察、预警探测等各类传感器系统、武器平台系统、指挥控制系统等提供信息传输与交换的公共网络平台。战场环境下,快节奏的战争进程、强机动性的作战单元、广范围的通信领域、大容量的通信需求、高干扰的电磁环境决定了战术通信网络与其他通信网络有着不同的特点^[20-26]。

(1) 结构复杂、规模庞大。战术通信网络的各个子网因作战使命和作战需求不同,其组网方式、网络结构特性也各不相同,这造成战术通信网络的拓扑结构相当复杂,不能用简单的规则对其进行抽象和描述。战术通信网络所包含网络元素种类繁多、数量巨大,尤其是与传感器和武器平台网络的交链使得战术网络的规模变得非常庞大。网络中不同的网络元素的特点和性能不尽相同,发挥的战斗作用也存在差异,所以战术通信网络是一个异质异构、复杂的大系统。

(2) 分层分布式结构。战术通信网络由骨干网与接入网两个层次的网络组成,在组网逻辑上具有清晰的层次结构。骨干网节点构成了战场广域网络环境,节点位置相对固定,网络拓扑呈栅格化,节点间的通信链路相对较宽,是战术通信网络信息传输与交换的基础网络。接入网具有集群式组网特点,网络具有很强的区域性,一个区域内的节点通过数量有限的接入节点实现与骨干网的连接,接入网中的用户节点数量较多并且移动性强,用户链路带宽较窄。

(3) 通信距离受限、带宽资源缺乏。为了满足大范围区域覆盖和节点移动性的需求,战术通信网络一般采用无线通信方式,节点的通信距离受发射机功率、战场地理环境和频谱环境等因素的限制,通信范围有限,长距离的信息传输要依靠其他通信节点的转发才能实现。在战场环境下,通信设备所处的电磁环境会受到众多自然和人为因素的影响和干扰,战场频谱环境异常复杂,这使得本来就有限的无线信道资源变得更加稀缺。

(4) 连通性和可靠性要求高。战术通信网络对节点间传输通信业务所需的跳数和时延有很严格的限制,要求

网络用最小的代价换取最大的信息传输能力,在复杂的战场环境下,还要求网络对敌方的打击破坏具有较好的抗毁性。

2 战术通信网络演化模型

2.1 模型设置

针对战术通信网络的拓扑特点,我们需要对网络的演化模型进行以下设置:

(1) 网络的分层结构。针对骨干网和接入网结构的不同特点,分别采用不同的演化机制,使得骨干网具有栅格化的网络结构,接入网具有自组织的网络特性。

(2) 网络节点的空间分布。定义网络模型的覆盖范围,将网络中的节点按照某种分布置于网络的覆盖区域内,以节点的物理坐标作为节点所处空间位置的表示。

(3) 网络节点的类型。根据战术通信网络的特点,在网络模型中分别设置三种不同的网络节点:骨干节点、接入节点和用户节点。骨干节点具有网络中较大范围内的区域覆盖能力和大容量信息的传输与交换能力,所以骨干节点的通信半径较大,具有较多的通信中继方向,在网络中的地位也非常重要。接入节点主要为周围的用户节点提供接入服务,所以它具有一定的区域覆盖能力和一定数量的通信中继方向,在网络中的地位高于用户节点。用户节点是为作战单位提供通信服务的终端设备,通信范围和中继方向十分有限,在网络中的地位最低。

(4) 节点的吸引系数。为了描述节点在演化过程中所表现的异质性,参考 Bianconi 和 Barabási^[27] 提出的节点适应度模型,定义节点的吸引系数

$$\mu_i = i k_i \quad (1)$$

式中, i 为节点的影响因子; k_i 为节点的度。节点的影响因子 i 由节点的类型决定,可以理解为是节点固有的通信能力,而 k_i 是节点在网络中实际发挥作用大小的一种表现,将两者结合在一起构成了对节点在网络结构中所能发挥作用潜质的度量,更好地体现了节点通信能力大小的异质性。

2.2 算法步骤

在对网络演化模型进行了一系列的定义和设置后,我们提出了战术通信网络的演化模型(tactical communication network evolving model, TCNEM),其核心算法如下:

步骤1 初始化网络参数 定义网络规模 N 和节点在覆盖区域 S 的分布函数 $f(S)$,分别确定网络中骨干、接入和用户节点的比例为 a, b, c ($a + b + c = 1$) 以及各类别节点通信距离 R ,初始连接数 m ,及节点的影响因子 i 的取值范围。

步骤2 生成骨干网络 在网络节点中均匀选择 aN 个节点作为骨干节点,人为规划骨干网络的连接方式。

步骤3 连接接入节点和用户节点

(1) 由分布函数 $f(S)$ 生成任一新节点位置,若该位置已经存在节点,则重新生成。将生成节点以概率 $b/(b+c)$ 划分为接入节点,以概率 $c/(b+c)$ 划分为用户节点。

(2) 查看新节点的通信半径 R_{new} 和初始连接数 m_{new} , 将在其通信范围内的网络中已存在节点放入节点集 V_R , 设新节点 V_R 内节点数目为 M_R 。

如果 $M_R < m_{new}$, 返回(1)。

如果 $M_R \geq m_{new}$, 则从 V_R 中依概率

$$(k_i) = \frac{u_j}{u_j} = \frac{i k_i}{j k_j} \quad (2)$$

选择 m_{new} 个节点与新节点建立连接。

(3) 重复(1)和(2)直至网络中节点数等于 N 。

从上述步骤可以看出, TCNEM 模型同时体现了战术通信网络的人为规划要素(骨干网络可以是全连通网络、随机网络、规则网络、星型网络等)、节点空间位置要素以及节点在初始中继方向、连接吸引力之间的差异, 进一步的分析需要借助对模型的解析和仿真来实现。

3 TCNEM 模型度分布的计算

为了解析分析 TCNEM 模型的度分布 $P(k)$, 不妨假设节点的度是连续变化的, 令 k_i 表示第 i 时刻加入网络中的节点的度, 由于存在三种不同节点, 则可将 k_i 的变化情况描述为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \sum_{u=a,b,c} P_u \cdot \left[\sum_{v=b,c} p \cdot m \cdot P(i \in V) \cdot \frac{u k_i}{E} \right] \quad (3)$$

方程的意义是显然的, $P_u (u = a, b, c)$ 表示节点 i 分别为骨干节点、接入节点和用户节点的概率, $p (p = b, c)$ 则表示新加入节点分别为接入节点和用户节点的概率, $P(i \in V)$ 表示当新加入节点为 v 类型时, 节点 i 在新节点连接范围内的概率, E 表示新加入节点为 v 类型时其范围内的吸引数总和。于是有

$$P_a = \frac{N \cdot a}{N \cdot a + t}, P_b = \frac{t \cdot p_b}{N \cdot a + t}, P_c = \frac{t \cdot p_c}{N \cdot a + t}$$

$$= \frac{\frac{b \cdot m_b}{b} \cdot \left[\frac{(1+a) \cdot (b+c) \cdot S}{a \cdot a \cdot S_b + \frac{b}{b+c} \cdot b \cdot S_b + \frac{c}{b+c} \cdot c \cdot S_c} + \frac{c \cdot m_c}{c} \cdot \left(a \cdot a \cdot S_c + \frac{b}{b+c} \cdot b \cdot S_c + \frac{c}{b+c} \cdot c \cdot S_c \right) \right]}{\dots} \quad (9)$$

对方程求解, 有

$$k_i(t) = C \cdot t^\nu \quad (10)$$

而

$$C \cdot t_i^\nu = p_b \cdot m_b + p_c \cdot m_c$$

令 $m_E = p_b \cdot m_b + p_c \cdot m_c$, 可解得

$$k_i(t) = m_E \cdot \left(\frac{t}{t_i} \right)^\nu \quad (11)$$

又

$$P(k_i(t) < k) = P\left(t_i > \frac{m_E}{k} \right) = 1 - P\left(t_i \leq \frac{m_E}{k} \right) = 1 - \frac{m_E}{k} \cdot \frac{1}{N \cdot a + t} \quad (12)$$

于是有

而

$$p_b = \frac{b}{b+c}, p_c = \frac{c}{b+c}$$

当新加入节点为接入节点时, 该节点可以在其影响范围 R_b 内与其他骨干节点和接入节点产生连接, 在 R_c 内与用户节点产生连接, 于是

$$E_b = N \cdot a \cdot \bar{k}_a \cdot \frac{S_b}{S} \cdot a + 2t \cdot p_b \cdot \frac{S_b}{S} \cdot \bar{k}_b \cdot b + 2t \cdot p_c \cdot \frac{S_c}{S} \cdot \bar{k}_c \cdot c \quad (4)$$

同理有

$$E_c = N \cdot a \cdot \bar{k}_a \cdot \frac{S_c}{S} \cdot a + 2t \cdot p_b \cdot \frac{S_c}{S} \cdot \bar{k}_b \cdot b + 2t \cdot p_c \cdot \frac{S_c}{S} \cdot \bar{k}_c \cdot c \quad (5)$$

式中, $\bar{k}_a, \bar{k}_b, \bar{k}_c$ 表示网络中三种节点的平均连接数。

由于一般情况下网络骨干节点数量很少, 不妨令 $N \gg t$, 同时设节点在作用范围内与其他节点连接的概率与节点影响因子成正比, 则

$$E_b = t \cdot \left[a \cdot \bar{k}_a \cdot \frac{S_b}{S} \cdot a + p_b \cdot \frac{S_b}{S} \cdot m_b \cdot \left(1 + \frac{b}{b+c} \right) \cdot b + p_c \cdot \frac{S_c}{S} \cdot m_c \cdot \left(1 + \frac{c}{b+c} \right) \cdot c \right] = t \cdot b \quad (6)$$

$$E_c = t \cdot \left[a \cdot \bar{k}_a \cdot \frac{S_c}{S} \cdot a + p_b \cdot \frac{S_c}{S} \cdot m_b \cdot \left(1 + \frac{b}{b+c} \right) \cdot b + p_c \cdot \frac{S_c}{S} \cdot m_c \cdot \left(1 + \frac{c}{b+c} \right) \cdot c \right] = t \cdot c \quad (7)$$

则将上述代入式中, 简化后的方程为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{k_i}{t} \quad (8)$$

式中

$$P(k) = \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} = m_E \cdot \frac{t}{(N \cdot a + t) k^{(\nu+1)}} \quad (13)$$

显然, 模型的度分布仍然保持幂律特征, 其中度指数 $\nu = \nu + 1$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有

$$P(k) \sim m_E \cdot k^{-(\nu+1)} \quad (14)$$

4 TCNEM 模型仿真分析

为了验证 TCNEM 模型的有效性, 进一步分析网络模型的性能和特征, 根据战术通信网络的特点, 设置网络覆盖区域为 100×100 , 网络规模 $N = 10\ 000$, 骨干网络初始化为平均度为 6 的规则网络, 对网络中节点的其他参数设置如表 1 所示。

表 1 网络模型仿真参数设置

节点种类	所占比例/(%)	通信半径 R	初始连接数 m	影响因子
骨干节点	a=0.5	30	—	0.5
接入节点	b=10	10	3	0.3
用户节点	c=89.5	5	1	0.1

备注:以下如无特殊说明,TCNEM 仿真采用上述参数

4.1 度分布

将各参数代入式(8)和式(13),可得 $\lambda = 2.0241$, $P(k) \sim 2.9324k^{-3.0241}$,可见,在该仿真设置下,TCNEM 模型生成网络的度分布与 BA 模型近似,度指数为 3.0241。图 1(a)展示了网络规模 $N = 10\ 000$ 和 $N = 100\ 000$ 时网络的度分布情况,图中直线为预测值。可见,度分布的仿真结果表现出很强的幂律特性,分布曲线与理论预测值拟合的较好,而且,网络规模越大,拟合越精确。图 1(b)将 $N = 10\ 000$ 时模型中最大的 100 个节点进行了统计、排序,并与 m 分别为 1、2 时的 BA 模型进行了比较,之所以同时比较 $m = 1$ 和 $m = 2$ 是因为这两种 BA 网络的平均度分别为 2 和 4,而根据仿真设置, $N = 10\ 000$ 时 TCNEM 模型的平均度约为 2.4。可以看出,BA 模型中存在极少数度值很大的节点,且节点度值下降速度也非常快,节点度的最大值要远远高于 TCNEM,当 $m = 1$ 时,BA 模型的最大度值几乎是 TCNEM 的三倍还多,而 TCNEM 的度值则较为平均。这是由于 TCNEM 中引入了节点通信范围和节点分类等机制,使得节点不再倾向于与全网度最大的节点建立连接,而是倾向于选择通信区域内的骨干节点或者接入节点建立连接。可见,TCNEM 模型中节点的度分布更加均质化,网络不存在绝对的中心,这种无中心的网络结构具有更高的可靠性和抗毁性^[28]。

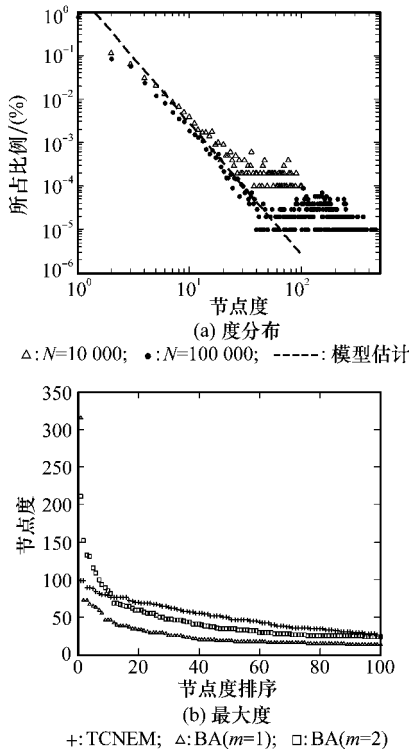


图 1 TCNEM 模型度分布特征

4.2 聚集系数

网络中节点的聚集系数 (clustering coefficient, CC) 定义为节点的邻居之间也是邻居的概率,即 $C = 2E_i / k_i(k_i - 1)$,其中 k_i 表示节点 i 的邻居数, E_i 表示 k_i 个邻居之间边的数量。聚集系数可以有效地反映网络的集团化程度,网络的社团结构和搜索性能等均与其有密切关系。

我们将 $N = 10\ 000$ 时模型中聚集系数最大的 1 000 个节点与 BA 模型进行比较(图 2(a)),可以发现,尽管当 $m = 2$ 时 BA 模型中网络连接数几乎是 TCNEM 模型的两倍,但 TCNEM 模型生成网络节点的聚集系数仍要远远高于 BA 模型,可见,TCNEM 模型能够很好的反映大部分实际网络聚集系数很高的特点,这就克服了当网络规模较大时 BA 模型节点聚集系数趋近于 0 的缺点,使网络模型更加接近实际。

4.3 特征路径

网络特征路径长度 (characteristic path length, CPL) 是网络中节点之间的平均最短路距离,该指标用于反映网络的连通程度和节点间的通信效率。根据通信网络的特点,定义 $CPL = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} l_{i,j}$,其中 $l_{i,j}$ 为节点 i, j 之间通信所需要经过的最少的边的数量(根据仿真设置和模型演化过程,生成网络是连通的,故不必考虑 $l_{i,j} = \infty$ 的情况)。网络特征路径长度是战术通信网络性能的重要指标,在战术通信网络中,网络的传输速率非常有限,如果节点间信息传输的平均跳数增加了 1 跳,不仅会增加信息传输的时延,而且对于整个网络带来的开销也是非常巨大的。

从图 2(b)可以看出,TCNEM 模型表现出与 BA 模型截然不同的性质:随着网络规模增大,特征路径长度不断减小。当网络中节点数量为 100 000 时,网络中节点平均只需 5.8 步就能达到另一个节点,甚至比 $m = 2, m_0 = 5$ 时的 BA 模型还要少。图 2(c)对不同网络规模下网络的直径(特征路径的最大值)进行了统计,从仿真结果中可以看出,类似于特征路径长度,TCNEM 模型的网络直径仍随网络规模递增而不断减小,当网络中节点数量为 100 000 时,网络直径平均值为 15.9,远远小于 $m = 1, m_0 = 3$ 时 BA 模型的 33.2。

特征路径长度和网络直径随网络规模增加而递减的特性说明 TCNEM 模型具有非常好的连通性,避免了网络因快速增长而造成的网络传输路径增加,从而能够有效的提高网络效率,节约网络资源。

4.4 模型参数对网络结构的影响

图 3(a)与图 3(b)分别展示了当接入节点与用户节点的比例和初始连接数发生变化时 TCNEM 模型度分布的变化情况。显然,随着节点比例和初始连接数不断变化,网络度分布始终保持幂律特征,且当网络中全部是接入节点时,度分布曲线与 BA 模型 $m = 3$ 时的理论值拟合的很好。当接入节点和用户节点初始连接数没有差异时,网络度分布

同样接近 BA 模型。这从另一方面说明了增长和偏好连接是导致网络度分布出现无标度特征的必要条件。

图 3(c) 描绘了节点通信距离变化对网络度分布的影响,显然,随着节点通信距离的增加,网络度分布始终保持幂律特征,然而,度分布曲线的幂律尾部却呈现明显的变化,当节点通信距离变大时,尾部明显变长,这表明网络中节点更趋于非均匀化,最大度值越来越大。为了描述这一结论,我们将节点通信距离变化时网络中最大度节点的变化用图 3(d)表示。可以看出,当接入节点与用户节点通信距离都较小时,网络中节点的度值分布比较均匀,最大度值也不过 100 左右,然而,当二者通信距离增大到骨干节点的水平时,网络倾向于极度非均匀化,其最大度值达到 450,甚至比 BA 模型的还要高。这一方面是由于网络演化过程中节点以偏好连接方式连接网络中节点,另一方面是因为骨干节点的吸引数比接入节点和用户节点更高的缘故。

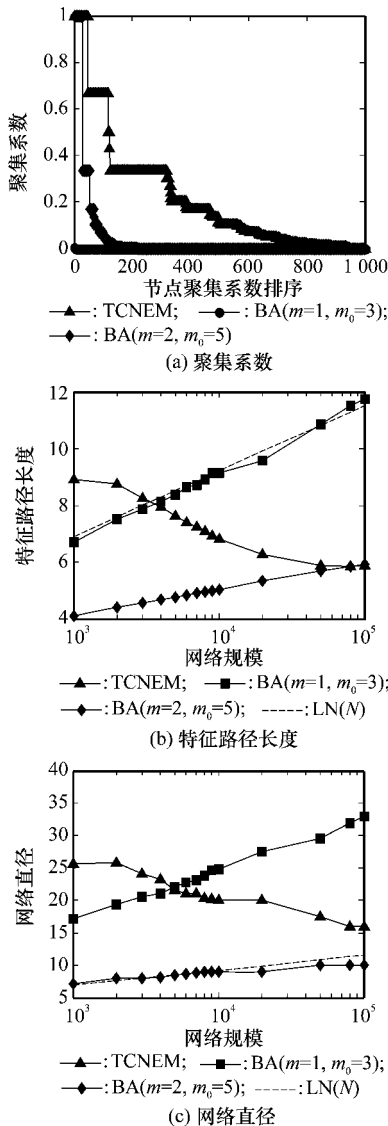


图 2 TCNEM 模型聚集系数与网络距离分析

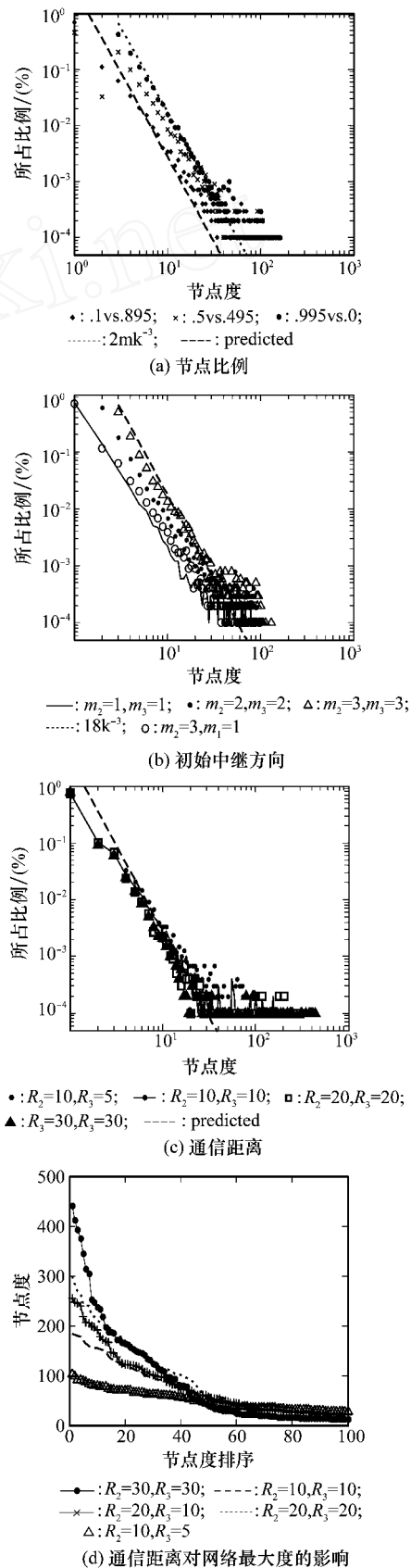


图 3 TCNEM 模型参数对网络结构的影响

4.5 网络层次结构

为验证 TCNEM 所生成的网络是否具有分层结构,我们绘出了 $N=300, a=0.03, b=0.1, c=0.887$ 时的网络拓扑结构图,如图4所示。

由图4中可以看出,骨干节点、接入节点和用户节点在网络中构成了不同层次的网络,使得整个网络拓扑呈现出明显的分层结构:骨干节点呈栅格状连接组成骨干网络,它们的度值是最大的,可以推断它们在网络中的地位也最重要;接入节点与其周围的用户节点相连,构成了接入网络,接入网络具有明显的区域特征和集群式接入特点,而接入网络内部的节点连接方式因用户节点的物理位置不同而呈现出一定的随机性。这种分层式的网络结构能够很好的体现战术通信网络的拓扑结构特点。

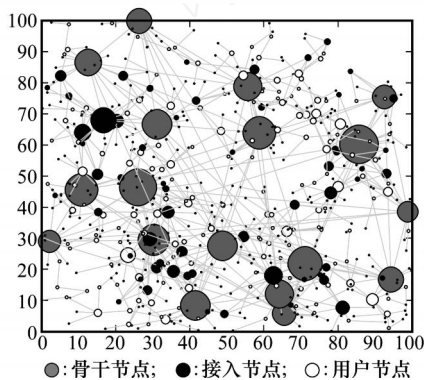


图4 TCNEM 模型拓扑结构图

5 结束语

本文提出了一种基于空间结构的战术通信网络演化模型——TCNEM,模型对骨干网络和接入网络的演化过程采用了不同的机制,充分体现了战术通信网络人为规划和节点自组织相结合的组网特点,同时,对网络节点空间位置信息和通信距离参数的引入,使模型更加符合实际战术通信网络的特点。模型的解析和仿真分析结果表明,TCNEM 生成网络更加均匀化,具有良好的连通能力,表现出明显的层次结构,具有战术通信网络的基本特点。

本文的研究对于考虑网络的空间结构和网络节点的异质性建模是一个有益的尝试,其中,TCNEM 模型网络特征路径长度和网络直径随网络规模增大反而减小的特殊性质,对战术通信网络规划设计具有重要意义。近年来,空中通信平台相关技术的发展日趋成熟,并被大量的应用于战术通信网络中^[1,6,18],如何在模型中结合空中通信平台以构建立体组网的战术通信网络结构,是进一步需要研究的问题。

参考文献:

[1] Leland J, Isaac P. *Future army bandwidth needs and capabilities*[M]. RAND Corporation, 2004.

[2] Dimitrios V, Christos D G, Dimitrios J V. The 3G wireless technology in tactical communication networks[C]. *IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, 2004:4883-4887.

[3] Chennikara J V, Dutta A, Cheng A, et al. Integrated networking technologies for a survivable network[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference: Broadband Wireless for the Masses*, 2005:2424-2429.

[4] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. *The Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 2003, 45:167-256.

[5] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1):47-97.

[6] Alberts D S, Garstka J, Stein F P. *Network centric warfare: developing and leveraging information superiority*[M]. Washington D. C: CCRP Publication Series, 2002.

[7] Schintler L A, Gorman S P, Reggiani A, et al. Scale-free phenomena in communication networks: a cross-atlantic comparison[C]. *The 43rd European Congress of the Regional Science Association*, 2003:103-110.

[8] Onnela J P, Saramäki J, Hyvönen J, et al. Structure and tie strengths in mobile communication networks[C]. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007:7332-7336.

[9] Schintler L A, Gorman S P, Reggiani A, et al. Complex network phenomena in telecommunication systems[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2005, 5(1):351-370.

[10] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(6):509-512.

[11] Li Xiang, Chen Guanrong. A local-world evolving network model[J]. *Physica A*, 2003, 328(3):274-286.

[12] Zhang Zhongzhi, Rong Lili, Wang Bing. Local-world evolving networks with tunable clustering[J]. *Physica A*, 2007, 380(1):639-650.

[13] Cao YJ, Wang GZ, Jiang Q Y, et al. A neighbourhood evolving network model[J]. *Physics Letters A*, 2006, 349(4):462-466.

[14] Guan Zhihong, Wu Zhengping. The physical position neighbourhood evolving network model[J]. *Physica A*, 2008, 387(1):314-322.

[15] Gastner M T, Newman M E J. Shape and efficiency in spatial distribution networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006, 1(1):1015.

[16] 潘习林,于全. 一体化军事通信网络建模仿真面临的挑战[J]. *军事运筹与系统工程*, 2004(2):28-31.

[17] 岳庆来,张明智. 战场通信网络消息处理模型研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2008(4):57-60.

[18] 万永乐,张剑. 战术互联网建模与仿真[J]. *通信技术*, 2002, (10):50-54.

[19] 岳庆来,包进,张明智,等. 体系对抗仿真建模中的网络模型与交互模型相关问题研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2008(1):44-48.

[20] 于全. *战术通信理论与技术*[M]. 北京:电子工业出版社, 2009:16.

[21] 刘传辉,周新力,刘宴涛. 战术互联网络体系结构[J]. *海军航空工程学院学报*, 2008, 23(1):43-48.

[22] 闵雪娇,慕晓冬,张娟. 战术互联网络拓扑模型的研究[J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(7):108-113.

[23] 王海涛,宋丽华. 战术通信网的体系结构及其建模探讨[J]. *国防技术基础*, 2006(2):30-36.

[24] 罗鹏程,金光,周经伦,等. 通信网可靠性研究综述[J]. *小型微型计算机系统*, 2000(10):66-70.

[25] 段威,任华,柳海峰. 基于 OPNET 的通信网络半实物仿真方法研究[J]. *计算机仿真*, 2007(11):147-152.

[26] 高鑫,潘成胜. 一种无线战术通信网络仿真的研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2005(4):8-10,84.

[27] Bianconi G, Barabási Albert-László. Competition and multi-scaling in evolving networks[J]. *Europhysics Letters*, 2001, 54(4):436-442.

[28] Holme P, Kim B J. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review*, 2002, 65(5):1-14.