

doi: 10.7690/bgzdh.2020.04.007

基于社团发现的卫星通信地球站组网规划方法

邵东生¹, 赵洪华¹, 周云², 胡谷雨¹, 潘雨^{1,3}, 王帅辉¹, 缪志敏¹

(1. 陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210007; 2. 中国人民解放军第 78111 部队, 成都 610011;
3. 中国人民解放军第 31436 部队, 沈阳 110000)

摘要: 为合理高效地制定卫星通信地球站的组网规划任务, 提出一种基于社团发现的卫星通信地球站组网规划方法。在一定前提假设和约束条件下, 对卫星通信地球站组网规划问题进行形式化定义, 以尽可能多的卫星通信是一跳通信为目标, 基于社团发现给出解决方法, 并通过实验结果分析。结果表明: 该算法在卫星通信地球站组网规划问题的应用上有效合理, 能为相关研究提供一条新的思路。

关键词: 卫星通信地球站; 组网规划; 社团发现

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Network Planning Method for Earth Station of Satellite Communication Based on Community Detection

Shao Dongsheng¹, Zhao Honghua¹, Zhou Yun², Hu Guyu¹, Pan Yu^{1,3}, Wang Shuaihui¹, Miao Zhimin¹

(1. Institute of Command Control Engineering, PLA University of Army Engineering, Nanjing 210007, China;
2. No. 78111 Unit of PLA, Chengdu 610011, China;
3. No. 31436 Unit of PLA, Shenyang 110000, China)

Abstract: A networking planning method based on community detection for earth stations of satellite communication is proposed to formulate the network planning task of earth stations of satellite communication reasonably and efficiently. This paper formalizes the problem of network planning for earth stations of satellite communication considering some hypotheses and constraints, and proposes a solution based on community detection and analysis through the experimental results to achieve the goal that in order to realize that as much satellite communication as possible is one-hop communication. The results show that the algorithm is effective and reasonable in the application of networking planning for earth station of satellite communication, and provides a new idea for related research.

Keywords: earth station of satellite communication; network planning; community detection

0 引言

自 1965 年美国发射第一颗商用通信卫星以来, 卫星通信技术及其应用取得了巨大成就。它实现了覆盖全球丰富多彩的通信服务, 不仅在军事中发挥了关键性作用, 而且对人类的生产、生活方式产生了巨大影响^[1]。在军事应用中, 卫星通信仍然是主要的通信手段, 是其他通信手段所不能取代的; 在经济、政治和文化领域中, 卫星通信不仅有效地弥补了其他通信手段的不足(如海事、远程航空的通信等), 而且作为大众传媒(如视频和音频广播), “最后一公里到户”的接入, 对防灾、救灾、处理突发事件的应急通信等, 均大有作为。此外, 近年来深空探测和载人航天活动的频繁活动, 极大促进了卫星通信的发展, 也是一大亮点^[2]。

卫星通信系统主要包括在轨卫星系统和地面站

系统, 而当前的研究主要是以在轨卫星系统为对象, 大多是针对多星条件下卫星组网中的路由切换^[3-4]、拓扑控制^[5]等方面展开广泛深入的研究。但是, 对于地面站系统, 除了有少数研究卫星地面站的任务规划问题^[6-8]外, 很少有人关注卫星地球站的组网规划问题。

卫星通信地球站的组网规划问题, 关键目标之一是将通信频繁的地球站规划在一个网络里, 使大部分地球站之间的通信都是一跳通信, 从而最小化地球站间的卫星通信时延和卫星转发资源耗费。现阶段, 我国的卫星通信地球站的组网规划主要为操作员手动配置, 哪些地球站用户组在同一个网内, 组建在哪个卫星网里都是人工预先设置和配置的。仅凭操作员的经验, 难以精准发现通信频繁的地球站并将其组在同一个网络内; 因此, 目前操作员手动配置卫星通信地球站的组网规划方案很难达到最

收稿日期: 2019-12-18; 修回日期: 2020-01-11

作者简介: 邵东生(1994—), 男, 黑龙江人, 硕士, 从事计算机网络、卫星网络研究。E-mail: 529635940@qq.com。

优。另外，手动配置也存在操作复杂、工作量大以及容易出错等缺陷。

随着地球站数量的增多，卫星通信需求的增加以及卫星资源的紧缺，如何合理高效地制定卫星通信地球站的组网规划任务是重点关注的内容。笔者尝试使用社团发现算法在地球站的通信数据中发现挖掘地球站的通信关联关系，并将通信频繁地球站规划在同一网络内，使用同一颗同步卫星转发通信，从而高效智能地解决卫星通信地球站的组网规划问题。

1 问题背景

卫星通信地球站是卫星通信系统中设置在地球表面的通信终端站，用户通过卫星通信地球站进行相互间的通信，主要使用地球同步轨道通信卫星。目前的卫星通信，大多是一个地球站一副天线对准一颗同步通信卫星，几个地球站之间可以通过同一颗通信卫星实现互相通信，只有天线对准同一颗卫星、在共同波束覆盖范围内且传输体制相同的 2 个地球站之间才能通过一颗卫星实现一跳通信，否则需要经过其他地球站中继或转发，即需要至少二跳才能互通。

如图 1 所示，面向同一颗卫星组网的地球站之间可通过该卫星的转发实现一跳通信，即只通过一次通信卫星的转发实现地球站间的通信，通信路由为：地球站 A—通信卫星 X—地球站 B。

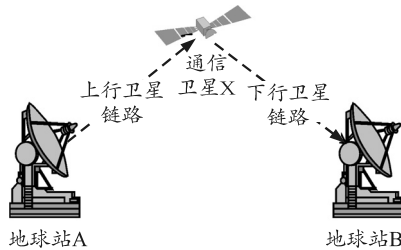


图 1 地球站间一跳通信

如图 2 所示，面向不同卫星的地球站之间通过地面关口站的转发才能实现互相通信，一般需要 2 跳，通信路由是地球站 A—通信卫星 X—关口站 A—地面网络—关口站 B—通信卫星 Y—地球站 B。如果某一地面关口站有 2 副天线，分别指向通信卫星 X 和通信卫星 Y，则朝向不同卫星的地球站 A 和地球站 B 也可经该关口站中继或转发实现通信。考虑卫星通信的时延主要为传播时延，一跳通信和二跳通信的区别在于，地球站间一跳通信的时延是二跳通信的一半。另外，二跳通信需要 2 颗同步通信卫星的转发，而一跳通信只需 1 颗同步通信卫星的转

发，通信卫星进行一次转发就要占用一定的卫星信道资源；因此，二跳通信耗费的卫星资源也是一跳通信的 2 倍。

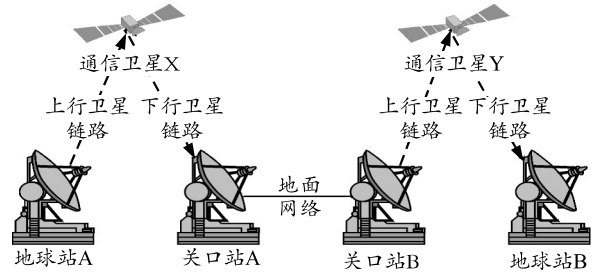


图 2 地球站间二跳通信

由于 1 颗同步通信卫星的信道资源有限，且不同的地球站存在传输体制和可互通能力的限制，必须充分利用现有多颗同步通信卫星的转发器资源，将数量较多的地球站划分到若干个不同的网络中，这就引出了卫星通信地球站的组网规划问题。

2 问题描述

2.1 组网规划问题的前提假设和约束条件

卫星通信地球站的组网规划，主要目的是将相互通信量大的地球站规划在一个网络里，使得大部分地球站之间的卫星通信都是一跳通信。

为了实现卫星通信地球站的组网规划，要求每个卫星通信地球站具有一个数据结构来描述其通信能力，其内容及相关含义如表 1 所示。

表 1 地球站相关参数

参数	含义
用户标识	全局唯一标识该地球站的用户
天线增益	与地球站发送增益和接收增益相关
功放增益	与地球站的发送增益相关
射频频段	地球站射频部分工作频段
天线朝向	用于确定指向哪个通信卫星
地理位置	用于确定在哪些波束覆盖范围内
信道单元参数	相关信道单元信息

地球站的信道单元参数主要包括支持的传输体制、支持的传输速率和支持的加密方式。每个地球站可以有多个信道单元，不同信道单元之间相对独立，每个信道单元可支持多种传输体制、多种传输速率以及多种加密方式。信道单元指的是地球站的一套卫星通信物理设备，地球站用户利用信道单元实现与其他地球站的卫星通信。地球站的传输体制主要指的是基带信号处理方式，调制解调方式，多址联接方式，信道分配与交换方式。

为描述卫星通信地球站组网规划问题的约束条件，先给出必要的前提假设：

- 1) 所有通信卫星均为同步通信卫星；

- 2) 所有的卫星转发器均为透明转发器；
- 3) 一个地球站只有 1 副天线，同一个地球站的信道单元共用该地球站的天线和射频部分；
- 4) 所有地球站的中频发射功率和中频接收灵敏度相同；
- 5) 不考虑地球站在卫星通信过程中的传输加密方式和传输速率；
- 6) 不考虑地球站间通信任务的优先级；
- 7) 同一网络中的卫星通信为一跳通信，不同网络间的卫星通信为二跳通信。

卫星通信地球站的组网规划问题是一种复杂的满足多种约束下的优化问题。在上述前提假设基础上，组网规划主要考虑以下几个约束条件：

1) 每个地球站可能有一个或多个信道单元，每个信道单元均可相对独立地与其他地球站的信道单元进行卫星通信，每个信道单元可根据通信任务需求加入到不同的网络中。

2) 一个地球站的多个信道单元受到该地球站所在位置的约束，地球站的信道单元只能加入到所在位置波束覆盖范围内的网络中。

3) 加入到同一个网络内的地球站必须朝向同一颗通信卫星，使用相同的射频频段。

4) 每个信道单元可能支持一种或多种传输体制，但加入到同一个网络内的信道单元必须使用同一种传输体制。

5) 加入到同一个网络中的信道单元所属地球站需满足可互通条件。假设地球站 A 和地球站 B 使用同一种传输体制，则地球站 B 能够接收到地球站 A 发送的卫星信号，还需满足以下条件：

$$G_{AS} + G_{FW} + G_{BR} - A_0 \geq G_0 \quad (1)$$

式中： G_{AS} 为地球站 A 的发送增益，主要由天线增益和功放增益决定； G_{FW} 为同步卫星资源转发器增益； G_{BR} 为地球站 B 的接收增益，主要由天线增益决定； A_0 为传输损耗，通常包括自由空间损耗、大气衰减和天线跟踪损耗等，主要受天气和传输距离的影响； G_0 为互通增益门限。以上物理量的单位均为 dB。

6) 1 颗通信卫星的转发器资源有限，为充分利用多颗通信卫星的转发器资源，避免同一网络内卫星通信拥塞，需要将所有地球站划分到若干个(通常不少于通信卫星的数量)网络中。

2.2 问题的形式化描述

地球站间的卫星通信，实际上是地球站每个独

立的信道单元之间的卫星通信，卫星通信地球站的组网规划问题也是所有地球站的信道单元的组网规划问题。

定义 1 假设有 M 个地球站共有 N 个信道单元，根据一段时间内每 2 个信道单元之间的通信量，可定义一个 $N \times N$ 的矩阵，称之为通信关联矩阵 $A_{N \times N}$ ，矩阵中元素 a_{ij} 为信道单元 i 与信道单元 j 之间的通信量大小。

定义 2 第 i 个信道单元 P_i 的参数用一个六元组 $\{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}, p_{i5}, p_{i6}\}$ 表示，其中各个元素的含义在表 2 中说明。

表 2 信道单元 P_i 的参数

元素	含义
p_{i1}	所属地球站编号
p_{i2}	地理位置
p_{i3}	天线增益
p_{i4}	功放增益
p_{i5}	支持的射频频段集合
p_{i6}	支持的传输体制集合

定义 3 假设组网规划方案共组成 K 个网络，第 k 个网络 Q_k 的参数用一个五元组 $\{q_{k1}, q_{k2}, q_{k3}, q_{k4}, q_{k5}\}$ 表示，其中各个元素的含义在表 3 中说明。

表 3 网络 Q_k 的参数

元素	含义
q_{k1}	所属卫星编号
q_{k2}	波束覆盖范围
q_{k3}	转发器增益
q_{k4}	使用的射频频段
q_{k5}	使用的传输体制

定义 4 考虑卫星通信的传播时延，所有信道单元之间以通信量为权重的卫星通信平均传播时延被定义为：

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i,j} (a_{ij} \cdot \sigma \cdot \delta(i,j))}{\sum_{i,j} a_{ij}} \quad (2)$$

其中： σ 为一跳卫星通信的传播时延，ms，通常取 $\sigma=270$ ms； i 和 j 分别表示信道单元 i 和信道单元 j ， δ 函数定义为

$$\delta(i,j) = \begin{cases} 1 & i \text{ 和 } j \text{ 属于同一个网络} \\ 2 & i \text{ 和 } j \text{ 不属于同一个网络} \end{cases} \quad (3)$$

如果信道单元 i 和信道单元 j 属于同一个网络， $\delta(i,j)=1$ ，表示两者间一跳通信；如果信道单元 i 和信道单元 j 不属于同一个网络， $\delta(i,j)=2$ ，表示两者间为二跳通信。

假设在一次组网规划中，将 N 个信道单元划分到 K 个网络中，根据以上定义，前面所述的约束条

件均可表示为:

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall P_i \in Q_k, p_{i2} = q_{k2}; \quad (4)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall P_i, P_j \in Q_k, p_{i3} + p_{j4} + p_{j3} + q_{k3} - A_0 \geq G_0. \quad (5)$$

其中: A_0 为传输损耗; G_0 为互通增益门限。

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, q_{k4} \in \bigcap_i^{\text{card}(Q_k)} p_{i5}; \quad (6)$$

$$q_{k5} \in \bigcap_i^{\text{card}(Q_k)} p_{i6}. \quad (7)$$

其中 $\text{card}(Q_k)$ 表示网络 Q_k 内的信道单元个数。

$$K \geq K_0. \quad (8)$$

其中 K_0 为指定的最小网络数。

假设给定 N 个信道单元的通信关联矩阵 $A_{N \times N}$, 优化目标为最小化式(2)定义的卫星通信平均传播时延, 可以表示为

$$\hat{T} = \min(\bar{\tau}). \quad (9)$$

3 基于社团发现的组网规划方法

3.1 社团发现思想

自 2002 年 Girvan 和 Newman 基于边介数提出 GN 算法^[9]以来, 国际上掀起一股社团发现的研究热潮, 来自生物、物理、计算机等学科领域的研究者们带来了许多新颖的思想和算法, 并广泛应用于各个学科领域的具体问题中^[10]。

各种不同的社会网络都显示出很强的社团效应, 即一个网络中成员趋于形成紧密联系的群, 在不同的场景下, 这些群被称为社团、簇、内聚的子群, 或模块。总体上, 群组个体之间的交往比群组外部个体的交往更频繁。社团发现是社会网络分析的一个基本任务。在社会网络中发现一个社团, 就是识别一个节点的集合, 使得集合内节点之间的相互作用比它们与集合外节点的相互作用更强。社团发现有助于其他社会计算任务的实现, 并被应用于许多实际问题的求解^[11]。

地球站用户通过地球站信道单元进行卫星通信, 地球站信道单元之间的卫星通信量将所有的信道单元连接起来, 形成以信道单元为节点, 卫星通信量大小为边的权重社会网络。而同一个网络内的地球站信道单元间通信频繁、关系紧密, 不同网络内的地球站信道单元则通信较少, 关系相对不紧密。可将所有地球站信道单元的通信关联矩阵 $A_{N \times N}$ 看成一个社会网络, 并对其进行社团发现。在以通信

关联矩阵 $A_{N \times N}$ 表示的网络中发现若干个社团, 就是识别若干个地球站信道单元的集合, 使得集合内信道单元之间的通联关系比它们与集合外信道单元的通联关系更强。

3.2 基于社团发现的组网规划算法

在多种约束条件下的卫星通信地球站组网规划问题是一种十分复杂的问题, 笔者尝试先解决简单场景下的组网规划问题。为简化该问题的求解, 针对组网规划中的约束条件, 进一步作出以下假设:

- 1) 每个地球站有且仅有一个信道单元;
- 2) 所有地球站信道单元使用同一种传输体制;
- 3) 每个地球站的功放增益和天线增益都足够大, 即任意 2 个地球站存在可互通能力;
- 4) 所有地球站使用相同的射频频段;
- 5) 所有同步通信卫星的波束覆盖范围足够大, 每个地球站均可调整天线指向任意一颗同步通信卫星;
- 6) 所有通信卫星的转发器资源相同, 每个网络使用的卫星转发器资源相同。

在上述假设下, 卫星通信地球站的组网规划问题简化为在式(8)的约束下优化式(9)。将地球站看作节点, 地球站间的通信量大小作为节点之间边的权重, 社团发现的社团划分结果作为组网规划方案, 将式(2)定义的平均传播时延作为衡量网络划分的标准, 并以平均传播时延为优化目标, 提出一种基于社团发现的组网规划算法。

将式(2)的平均传播时延用图中边的权重表示为

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2m} \sum_{k=1}^K e_k. \quad (10)$$

定义 5 每移动一个孤立节点 i 到其邻居所在社团 k 的平均传播时延增量为 $\Delta \bar{\tau}$, 被定义为

$$\Delta \bar{\tau} = \frac{1}{2m} \left[(e_k + e_i - e_{i,in}) - (e_k + e_i) \right]. \quad (11)$$

其中: m 表示网络中所有边的权重之和; K 表示社团数量; e_k 表示与社团 k 中每个节点相连的边的权重之和; e_i 表示与节点 i 相连的边的权重之和; $e_{i,in}$ 表示节点与社团 k 相连的边的权重之和。

基于社团发现的组网规划算法分为重复迭代的 2 个部分: 1) 假设网络中有 n 个节点, 首先将每个节点分配一个社团, 即初始阶段有多少节点就有多少个社团。然后针对每个节点 i , 考虑其所有邻居节点, 评估把节点 i 从它所在的社团移动到其邻居

j 所在的网络时,平均传播时延的增量变化 $\Delta\bar{\tau}$,把节点 i 移动到使平均传播时延增量最小(非正)的节点 j 所在的社团。如果所有计算出来的增量都不是负数,则该节点仍处于原社团中。该过程对所有节点重复且按顺序应用,直到没有节点移动,则第一个过程停止,此时任何一个节点的移动都不会导致平均传播时延的减少。2)将第1部分划分出来的社区当作节点组成一个新的网络。新节点之间的边的权重为2个新节点(实际上是2个社区)之间相连的边的权重之和,然后对于构建的新网络使用第一部分的方法进行迭代。当网络不再改变也就是出现最小平均传播时延时停止迭代。基于社团发现的组网规划算法的具体步骤如下:

输入:通信关联矩阵 $A_{N \times N}$;最小网络数 K_0 ;

输出:社团 C_1, C_2, \dots, C_k

初始化,为每个节点分配一个社团

while 存在节点发生移动 do

for 每个节点 i do

令最小平均传播时延 $\Delta\bar{\tau}_{\min} = 0$;

for 节点 i 的每个邻居节点 j do

根据公式(11)计算 $e_k, e_i, m, \Delta\bar{\tau}$;

if $\Delta\bar{\tau} < \Delta\bar{\tau}_{\min}$ and $(e_k + e_i)/2m \leq$

$1/K_0$ then

$\Delta\bar{\tau}_{\min} = \Delta\bar{\tau}_{ij}$;

end if

end for

if $\Delta\bar{\tau}_{\min} < 0$ then

把节点 i 划分到 $\Delta\bar{\tau}_{\min}$ 对应的社团;

else 节点 i 保持在原社团

end if

end for

end while

构建新图,新图的节点为划分的社团,新图的边的权重为2个社团所有节点对的边的权重和;

对构建的新图递归调用该算法,直到得到最小平均传播时延。

4 实验结果与分析

4.1 实验数据

根据地球站地理位置分布、通信服务范围和组织关系归属等因素的约束,地球站的通信关系是一种具有层次性的群组关系。也就是说,有一部分地球站相互之间通信量大,而与其他地球站的通信较

少,这样地球站可被划分为若干个大群组中,同一个大群组内地球站的通信量大,不同大群组间的通信量较少。类似地,大群组中有一部分地球站之间存在更为紧密的通信关系,因此,一个大群组又可划分若干个小群组,同一个小群组内地球站通信更为频繁。每个地球站以很大的概率与同一小群组内的地球站通信,以较小的概率与同一大群组但不属于同一小群组的地球站通信,以极小的概率与其他大群组内的地球站通信。

根据排队论,可认为每个地球站是一个 $M/M/1/\infty$ 系统,在一段时间间隔内,地球站间的通信次数服从泊松分布,通信时长服从负指数分布。考虑一段时间内所有地球站间的卫星通信,假设每个地球站的每次卫星通信的数据传输速率 W 相同,在这段时间范围内,如果地球站 i 与地球站 j 之间的通信次数为 n_{ij} ,第 k 次通信的通信时间为 $t_{ij,k}$,则两者之间通信量大小 a_{ij} 用下式计算:

$$a_{ij} = W \sum_k^{n_{ij}} t_{ij,k} \quad (12)$$

实验数据生成通信关联矩阵 A 的算法流程如下:

输入:地球站总数 N ;

大群组个数 n_1 ;

每个大群组中的小群组个数 n_2 ;

总统计时间长度 T ;

统计时间间隔 T_0 ;

地球站与相同小群组内地球站通信概率 p_1 ,一次通信的平均通信时长 μ_1 ;

地球站与相同大群组的其他小群组内地球站通信概率 p_2 ,一次通信的平均通信时长 μ_2 ;

地球站与其他大群组内地球站通信概率 p_3 ,一次通信的平均通信时长 μ_3 ;

一个统计时间间隔内平均通信次数 λ

输出:通信关联矩阵 $A_{N \times N}$

将 N 个地球站随机均匀分布在 n_1 个大群组中

将各大群组中地球站随机均匀分布在 n_2 个小群组中

for 每个统计时间间隔内 T_i do

for 每个地球站 i do

地球站 i 作为源节点;

以 λ 为均值产生泊松分布随机数作为通信次数;

for 每一次通信 do

生成一个0到1之间均匀分布随机数rand;

if rand $<$ p_1 then

同一小群组内随机选取地球站 j 作为目的节点;

以 μ_1 为均值产生负指数分布随机数作为通信时长;

记录一次通信事件;

else if rand < $p_1 + p_2$ then

在相同大群组的不同小群组内随机选取地球站 j 作为目的节点;

以 μ_2 为均值产生负指数分布随机数作为通信时长;

记录一次通信事件;

else then

在不同大群组内随机选取地球站 j 作为目的节点;

以 μ_3 为均值产生负指数分布随机数作为通信时长;

记录一次通信事件;

end if

end for

end for

end for

统计所有通信事件, 利用式(12)计算任 2 个地球站间通信量大小 a_{ij} , 得到通信关联矩阵 A 。

将表 4 的实验参数作为数据生成算法的输入, 可得到地球站的通信关联矩阵 A 。

表 4 实验参数

符号	N	n_1	n_2	T/h	T_0/h	p_1	μ_1/h
值	2 000	4	5	168	1	0.7	0.05
符号	p_2	μ_2/h	p_3	μ_3/h	$\lambda/\text{次}$	$W/(\text{Mbit/s})$	
值	0.2	0.02	0.1	0.01	0.3	1	

4.2 实验结果

组网规划过程中设定最小网络数 K_0 为 15。利用笔者提出的基于社团发现的组网规划算法对 4.1 节生成的通信关联矩阵 A 组网规划, 共得到 20 个网络, 每个网络中的信道单元个数均为 100。为说明文中组网规划算法的有效性, 采用随机组网规划算法作为对比算法, 随机组网规划算法中设定网络数为 20, 每个网络内信道单元个数为 100。2 种组网规划算法得到的平均传播时延如表 5 所示。

表 5 对比实验结果

组网规划算法	平均传播时延/ms
文中算法	303.507
随机算法	506.203

上述对比结果表明: 笔者提出的组网规划算法

在卫星通信地球站的组网规划方面的确可得到较低的平均传播时延, 说明该算法合理有效。

笔者提出的组网规划算法得到的组网规划结果如图 3 所示, 共有 20 个簇, 每一个簇表示一个网络, 每一个簇颜色较深, 表示每一个网络内通信关系紧密, 说明算法确实能够依据地球站之间的通信量关系挖掘出实际网络拓扑关系, 得到较为合理的组网规划方案。

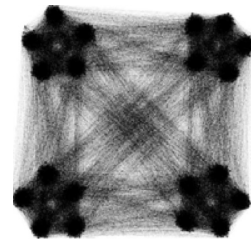


图 3 组网规划结果

改变指定的最小网络数 K_0 , 利用文中的组网规划算法进行组网规划, 观察平均传播时延的变化。图 4 表明, 指定最小网络数 K_0 越少, 相应的平均传播时延越小。原因是规定划分的网络数下限越小, 组网规划算法更倾向将几个小网络融合成一个大网络, 使得相当一部分小网络间的二跳通信成为大网络间的一跳通信, 最终使平均传播时延降低。例如令 $K_0=4$, 如图 3 所示, 算法会把通信相对紧密的 5 个小网络融合成一个网络, 最终组成 4 个网络, 使得以前 5 个小网络间的二跳通信成为一跳通信, 从而得到更低的平均传播时延。更进一步, 如果仅要求最小网络数 $K_0=1$, 则为得到最小的平均传播时延, 该算法会将所有地球站划分到一个网络中, 这种情况下所有地球站的通信都是一跳通信, 平均传播时延为一跳通信时延。

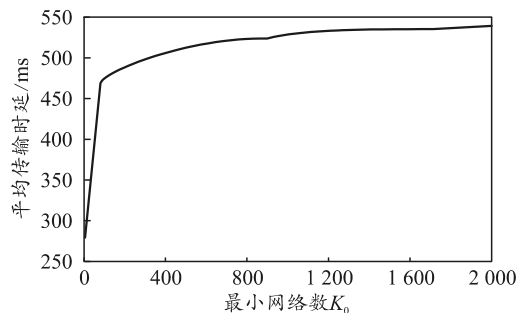


图 4 平均传播时延

5 结束语

笔者对组网规划问题进行形式化定义, 并基于社团发现思想, 提出一种以平均传播时延为优化目标的组网规划方法。实验结果表明: 该算法在卫星

通信地球站组网规划问题的应用上有效合理，为卫星通信地球站智能化组网规划提供了一条崭新的思路。

只考虑简单的约束条件，笔者基于社团发现提出的组网规划算法近似求得卫星通信地球站组网规划问题的最优组网规划方案，提供一种求解该类问题的思路与方法。事实上，卫星通信地球站的组网规划问题比较复杂，可以考虑一个地球站支持多信道单元和多天线、地球站地理位置与卫星波束覆盖范围的约束、地球站信道单元支持多种传输体制、区分不同类型通信业务以及区分不同等级的通信任务等因素，有待于进一步研究和探索。

参考文献：

- [1] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015(6):157-172.
- [2] 甘仲民, 张更新. 卫星通信技术的发展[J]. 通信学报, 2006, 27(8): 8-15.
- [3] 孙利民, 卢泽新, 吴志美. LEO 卫星网络的路由技术[J].

(上接第 11 页)

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \beta &= \arctan(y/x), \\ \theta &= \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中, (r, β, θ) 为标校无人机机载 GPS 天线相位中心相对光学助降系统菲涅尔灯几何中心的斜距、方位角和俯仰角。

4 结束语

针对陆基光学助降系统动态飞行检验的需求，笔者以无人机为平台，搭载高清航测相机、机载 GPS/IMU 和图传等设备，实现对光学助降装置下滑道指示信息的快速测量。该系统具有任务时间灵活、组织实施方便、航路设计简单、保障工作简捷等突出优点，为起飞和着舰引导系统标校提供一种全新模式。该系统已经初步应用于舰载机某陆基训练场光学助降装置标校，结合航母实时位置和姿态信息，选用星基差分模块及选配抗风等级满足海上飞行试验的无人机平台，可进一步拓展应用于舰载光学着

计算机学报, 2004, 27(5): 659-667.

- [4] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报, 2014(5): 1085-1100.
- [5] 余春东, 王俊峰, 刘立祥, 等. Walker 星座卫星网络拓扑结构动态性分析[J]. 通信学报, 2006, 27(8): 45-51.
- [6] 金光, 武小悦, 高卫斌. 卫星地面站资源调度优化模型及启发式算法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1839-1841.
- [7] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 基于贪婪算法的卫星地面站任务规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1239-1241
- [8] 邢立宁, 陈英武. 基于混合蚁群优化的卫星地面站系统任务调度方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(4): 414-418.
- [9] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community Structure in Social and Biological Networks[J]. P Natl Acad Sci USA, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [10] 骆志刚, 丁凡, 蒋晓舟, 等. 复杂网络社团发现算法研究新进展[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 47-52.
- [11] 唐磊, 刘欢. 社会计算: 社团发现和社会媒体挖掘法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 36-56.

舰系统海上动态标校。

参考文献：

- [1] 钟兴泉. 航母着舰引导系统标校方法研究[J]. 现代导航, 2014, 5(3): 175-178.
- [2] 贺林波, 刘爱东, 于金冬. 光电标校装置总体设计[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 10-14.
- [3] 杨卿, 王加亮. 舰载机光学助降装置校飞方法研究[J]. 硅谷, 2014, 7(5): 61-62.
- [4] 姬新阳, 高山, 陈庆良. 基于无人机 GPS 的测量雷达标校方法研究[J]. 火控雷达技术, 2017: 46(1): 73-78.
- [5] 刘冬利, 张驿, 庞海滨, 等. 利用无人机标定雷达精度的新方法[J]. 电讯技术, 2015, 55(2): 146-150.
- [6] 胡恩勇. 光波束着舰引导系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 郑峰婴, 杨一栋. “艾科尔斯”改进型光学助降系统的纵向着舰精度研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007(2): 111-115.
- [8] 方芬. 舰载机光学助降关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [9] 李团好. IMU/GPS 辅助航空摄影测量误差源与定位精度分析研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.