

## 数据链规划问题的贪心算法\*

司小江,吴礼发,胡谷雨

(解放军理工大学指挥自动化学院,江苏南京 210007)

**摘要:**数据链是一种汇集通信、导航和识别的综合化战场信息系统。为了保证在 960 ~ 1215MHz 频段工作的各类设备的电磁兼容,数据链的使用必须符合操作约束和协调约束,必须在满足各类约束条件下,根据数据链的作战需求实现网络规划。首先分析了数据链存在的典型约束,在此基础上对数据链规划问题建模并提出了一种数据链规划的贪心算法,算法较好地解决了数据链规划问题。

**关键词:**数据链;规划;模型;贪心算法

**中图分类号:** TN915; TP393.03 **文献标识码:** A

## A Greedy Algorithm for Tactical Data Link Planning Problem

SI Xiao-jiang, WU Li-fa, HU Gu-yu

(Institute of Command Automation, PLA Univ. of Sci. &amp; Tech., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Tactical data link system is an information system combining communications, navigation and identification, intended to exchange surveillance and command and control ( $C^2$ ) information among various  $C^2$  platforms and weapons platforms to carry out varied missions of each service. Tactical data link terminals operate in the 960 ~ 1215 MHz band, which is reserved on a worldwide basis for the safe operation of aeronautical radionavigation equipment. The tactical data link system must be planned carefully before the operation. However several restrictions or limitations must be placed on operations. The typical constraints among different platforms are discussed in this paper. Then the tactical data link planning problems are modeled. Finally a greedy algorithm is described.

**Key words:** tactical data link; planning; modeling; greedy algorithm

数据链(Tactical Data Link)是一种汇集通信、导航和识别的综合化战场信息系统,可在不同的指控平台与武器平台之间交换监视和控制信息,为各平台提供多重接入、高性能、抗干扰的数据和保密话音通信、导航和识别信息。数据链的使用存在多种类型的约束<sup>[1]</sup>,因此在使用数据链设备之前,必须进行规划,即数据链设备的使用必须符合操作约束和协调约束,必须在满足各类约束的条件下,根据作战需求设计数据链网络,使该网络能够满足作战条件下的传输容量需求和结点联通性要求。本文主要讨论数据链规划中的建模问题和规划算法。

## 1 数据链规划的典型约束

在对数据链规划问题建模之前,首先要确定其网络约束条件。其中,数据链的典型约束主要是指:

(1) 视距传输约束。由于数据链设备采用的是超短波频段,数据链设备之间存在视距传输的约束。视距传输约束对升空平台的数据链设备约束较弱,但对地面数据链设备,由于地理位置的不同,视距传输约束也各不相同。

(2) 组网约束。由于数据链设备采用的是公共信道,单个台站的传输能力、转发能力必须要受到限制。组网约束是指 100% 组网能力约束,即作战区域内的任一数据链设备,其组网能力不能超过 50%,转发功能需要额外的组网能力,在每个数据链设备的传输半径范围内,所有数据链设备的组网能力总和不能超过 100%。

\* 收稿日期:2003-06-06  
基金项目:国家部委基金资助项目  
作者简介:司小江(1973—),男,博士生。

(3) 电磁兼容约束。数据链的电磁兼容包括两个方面,一个是同一平台内的电磁兼容问题,该问题不在本文的讨论范围内;另一个是平台之间的电磁兼容问题。由于数据链设备工作在空中交通管制频段,必须与现有的各类信号台站保持必要的间隔距离。

(4) 可靠性约束。数据链如何提供可靠的信息传输是数据链建设的关键任务之一。可以采用扩频通信技术、差错控制技术和猝发通信技术等提供传输的可靠性。但是在战场环境下,网络结点的移动使网络拓扑结构经常发生变化,通信链路受地理环境、电磁环境、敌方干扰等因素的影响,出现不稳定或失效的现象,从而导致网络性能的下降。为了提高信息传输的可靠性,可以利用地面网络为无线网络提供传输冗余。地面网络通过网关站与射频网络连接。因此网关站的选择必须考虑到与地面网络的连通性,确保在链路出现故障的情况下,仍能完成信息的可靠传输。

(5) 传输时延约束。不同数据链设备对信息传输的时延要求各不相同。设计的拓扑必须选择满足数据链终端对信息传输的需求。

影响数据链规划的因素还有组织关系、装备约束等。

## 2 数据链规划的建模

在数据链规划的典型约束中,视距传输半径、组网能力、间隔距离等都需要通过测量获得。本文只考虑这些测量结果,即不同的地理位置对应不同的视距传输半径,不同类型的数据链设备对应不同的组网能力、间隔距离、传输时延等。

数据链规划问题是指给定参与者预计的地理坐标,在满足视距约束、组网约束等条件下,设计出一个数据链网络的连接和互通关系,使所有参与者都可以直接或通过作为中继站的参与者或通过作为网关站的参与者与其他数据链设备相互通信。

本文对数据链规划问题建立了如下模型:用无向图  $G = (V, E)$  抽象表示数据链拓扑。其中,  $V$  表示数据链设备集合,  $E$  表示通信链路集合。各结点的视距半径分别为  $R_i$ , 组网能力分别为  $TSDF_i$ 。在集合  $E$  上定义一个函数(例如欧氏距离函数  $Euc()$  等);在图  $G$  上定义相应的函数和(例如系统开销  $Cost(G)$ )。

大量网络规划的实践证明<sup>[2]</sup>,很容易建立过度约束的规划问题,但是约束条件越多,规划问题存在解的概率越低。通过对数据链约束条件的分析,本文提出如下数据链规划问题。

问题 1: 在满足视距约束、组网约束和时延约束的条件下,设计网络拓扑,使系统组网的开销最小,即:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{e \in E} Cost(e) \\ \text{s. t. } & TSDF_i + \sum_{Euc(j, i) \in R_i} TSDF_j \leq 100 \\ & Delay(Node_i, Node_j) \leq t_{i, j} \end{aligned} \quad (1)$$

问题 2: 给定地面网络拓扑  $G'$ , 在满足视距约束、组网约束、时延约束的条件下,设计网络拓扑,使网络拓扑的可靠性最大,即:

$$\begin{aligned} & \max Rel(G, G') \\ \text{s. t. } & TSDF_i + \sum_{Euc(j, i) \in R_i} TSDF_j \leq 100 \\ & Delay(Node_i, Node_j) \leq t_{i, j} \end{aligned} \quad (2)$$

## 3 数据链规划算法

在计算科学上已经有人证明了网络规划问题是一个 NP-hard 问题<sup>[2]</sup>。关于数据链规划问题的相关算法目前尚未见到。本文提出的数据链规划需要确定网关结点(类似于骨干网)和终端结点(类似于本地接入网)。规划时需要先确定网关结点,然后根据网关结点的定位确定终端结点。网关结点的确定不是最终的结果,终端结点的确定才是最终的结果。该特性与贪心策略(greedy method)存在本质的相似性。这是因为一个策略的结果是随问题的解决而逐渐得出的,我们无法预先知道所选策略的结果,这与贪心

策略不考虑策略的结果和其具有后效性的特点是不谋而合的。在现有拓扑规划算法中,ADD<sup>[2]</sup>算法的基本思想是假设初始状态所有终端结点都直接连接到中心结点,通过试探性地增加集中器结点,使网络开销最小化。DROP算法<sup>[2]</sup>是ADD算法的逆过程,即假设所有终端结点均为集中器结点,通过减少集中器结点使网络开销最小。簇算法<sup>[2]</sup>的基本思想是通过合并相邻最近的两个结点产生新结点,再进行集中器定位。我们认为ADD算法、DROP算法和簇算法等都不能直接应用到数据链的规划中,其原因是:

(1) 数据链的中继站和网关站在网络参与者中产生,并且在规划过程中通常不增加结点的数量。

(2) 数据链组网约束是指每个参与者的半径范围内所有站点的组网能力和小于或等于100%,因此约束条件要应用于每个结点。伴随结点位置的变化,覆盖半径约束也相应改变。而“簇”算法产生的簇中心经常发生变化,半径约束和组网约束较难应用。

(3) DROP算法假设所有结点均为网关结点,规划结果与实际情况不相符。

本文提出时延约束的ADD算法和可靠性约束的ADD算法,可以较好地解决上述数据链的规划问题。算法的基本思想是:

- 对于组网约束条件:为了保证所有结点的互连互通,同时考虑到指挥关系、信息流向对网络拓扑的影响,假设网络有且仅有一种中心结点 $Node_0$ 。这种树型拓扑的优点是除根结点、叶结点外,信息在中间结点传播时复制的次数明显降低,有效减少带宽需求。

- 对于数据链的时延约束:数据链的时延主要由传播时延和转发时延构成,其中传播时延相对固定,影响时延约束的主要因素是转发时延。因此我们将数据链的时延约束转化为结点对间的跳数约束,即结点 $Node_i$ 到结点 $Node_j$ 的跳数小于或等于某一个数。这种跳数约束可以进一步分为:①任一结点对间的最大跳数约束;②特定结点对间的最大跳数约束;③平均跳数约束。

- 对于可靠性约束条件:为了满足与地面网络连通性最大化的规划目标,引入对地面网络的可靠性进行评估,优先增加终端可靠性较高的地面结点为候选网关结点。目前网络可靠性的研究<sup>[3~8]</sup>主要包括基于连通性(connectivity)的网络可靠性研究和基于有效性能(available performance)的网络可靠性研究。其中:

(a) 基于连通性的可靠性研究又可以分为2终端可靠性或源—宿终端可靠性(source-sink terminal reliability)、k-终端可靠性(k-reliability)和全部终端可靠性(all-terminal reliability)。其中k-终端可靠性是指在链路出现故障的情况下,网络中的 $k$ 个终端可以相互进行通信的能力。

(b) 基于有效性能的网络可靠性研究是假设网络结点集 $V$ 中的每个结点都是可靠的(不可靠的结点可以用可靠的结点和不可靠的链路代替);链路集 $E$ 中的每条链路都存在两种状态,即正常或失效;链路失效状态 $S(S \subseteq E)$ 出现的概率为 $P(S)$ ,相应的性能指标值为 $\Psi(S)$ ,则网络的可靠性指标(或称可运行性) $Perf(V, E)$ 为:

$$Perf(V, E) = \sum_{S \subseteq E} P(S) \cdot \Psi(S) \quad (3)$$

由于数据链的规划是数据链建设的第一步,大量的性能数据只能进行估计,进一步降低了性能分析的有效性,而且部分性能数据必须通过测量获得,因此本文采用基于连通度的可靠性分析。具体方法是在给定的地面网络拓扑中,计算2终端可靠性矩阵,以行向量中最小的终端可靠性为该结点的参考值(意味在最坏情况下),相应地在ADD算法中优先选择参考值较大的结点做网关结点。

以时延约束的ADD算法为例,假设全网有且只有一个中心结点 $Node_0$ ,给定跳数约束大小。算法的基本步骤如下:

第一步:随机网络生成。生成图 $G$ 的结点坐标 $(x_i, y_i)$ ,视距半径 $R_i$ , $TSDf_i$ 。

第二步:初始状态生成。除中心结点外,其余结点均直接与中心结点连接,计算当前网络开销。

第三步:试探增加网关结点。在当前物理拓扑下,逐个增加网关结点,并根据逻辑拓扑计算网络开销,找到逻辑拓扑开销最小的网关结点。如果逻辑拓扑的网络开销小于物理拓扑的网络开销,继续下一步,否则转第六步。

第四步:判断增加网关结点是否满足跳数约束。计算当前逻辑拓扑的跳数,如果满足跳数约束,则继

续下一步,否则转第六步。

第五步 修改物理拓扑。根据逻辑拓扑获得的网关结点,增加物理拓扑的网关结点,并应用组网约束修改相应的结点。如果还有未处理的结点,转第三步;如果没有未处理的结点,继续下一步。

第六步 算法结束。当前物理拓扑即为网络规划的结果。

#### 4 算法的正确性和复杂性分析

时延约束的 ADD 算法和可靠性约束的 ADD 算法的正确性可由规划问题的贪心选择性质来保证,即算法一次执行产生的新网络拓扑是下一次算法执行的开始。用  $n$  表示给定结点的数目,在时延约束的 ADD 算法中,骨干结点搜索模块的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,结点跳数计算模块的时间复杂度为  $O(n^3)$ ,子网组网模块的时间复杂度为  $O(n)$ ,算法根据未组网结点的数目循环。在最坏情况下算法总的复杂度为  $O(n^3)$ 。在可靠性约束的 ADD 算法中,增加辅助网络终端可靠性矩阵的计算。用  $n'$  表示辅助网络的结点数,在最坏情况下算法总的复杂度为  $O(n'^3) + O(n^3)$ 。

将上述算法应用到一个规模为 51 个结点的数据链网络,其中有且仅有一种中心结点,结点在  $W \times L$  的区域内随机分布。同时各个结点组网能力  $TSDF$  在  $(0, 20)$  之间随机分布,半径在区域 5 等分的基础上加上一个随机数。其中结点跳数采用 Floyd-Warshall<sup>[9]</sup> 算法,结点可靠性采用 SYREI(Symbolic termianl reliability algorithm)<sup>[5]</sup> 算法。

采用最大跳数约束条件,最大跳数为 4。采用时延约束的 ADD 算法,其中一次实验的结果如图 1 所示。中心结点的编号为 0,正方形结点代表网关结点,其余结点为终端结点,存在一个未连接结点。实验进行 500 次,平均产生的网关在 7 ~ 12 个,未连接的结点数在 3 ~ 5 个。

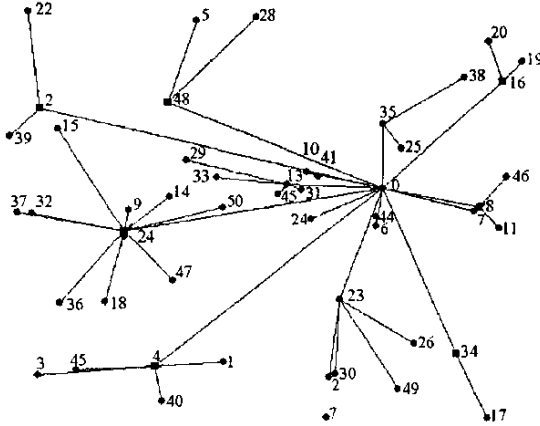


图 1 时延约束的 ADD 算法结果

Fig. 1 Delay-constrained ADD algorithm result

采用可靠性约束的 ADD 算法,地面网络结点占实验规模的 15%,地面网络结点的度小于 4,并且是 2 连通的。一次实验的结果如图 2 所示。网关结点之间的链路为地面链路,存在已知的失效概率。根据可靠性最小值最大的结点优先级评价准则,结点 3 优先被选为网关结点。图中存在 5 个未连接结点。实验进行 500 次,平均产生的网关在 8 ~ 15 个,未连接的结点数在 3 ~ 5 个。

实验证明,时延约束的 ADD 算法和可靠性约束的 ADD 算法可以较好地解决网络规划问题。存在未连接结点与结点分布的稀疏程度、结点的组网能力、结点视距覆盖半径有关。

#### 5 结论

数据链规划是数据链正确使用的前提,对数据链作战效能的发挥有重要影响。本文提出的规划算法能够较好地解决数据链规划中存在的时延约束和可靠性约束的问题。除了本文提出的规划问题,还可以增加装备约束等条件。数据链的规划问题是一个 NP-hard 问题,对怎样的约束条件下一定有解这个问题

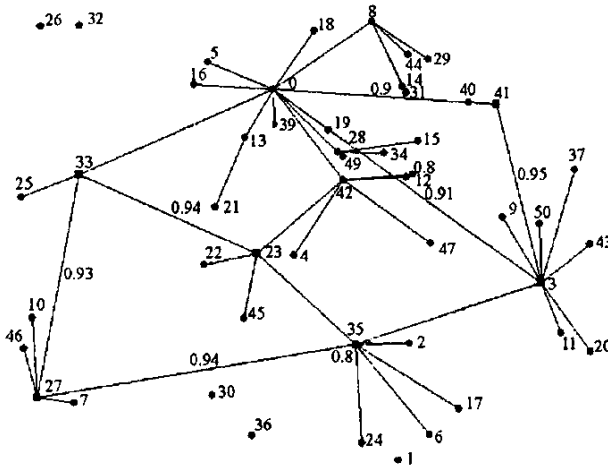


图 2 可靠性约束的 ADD 算法结果

Fig.2 Reliability-constrained ADD algorithm result

尚无结论。本文提出的启发式算法也不能保证一定有解。对剩余的结点,需要采用其他通信手段进行连接。如果采用增加结点的方法,本文提出的算法也可为候选结点位置提供参考。

参 考 文 献 :

- [ 1 ] JTIDS/MIDS Spectrum Users Guide( Version 1.1 [ R ]. United States of America Department of Defense ,April 2000.
- [ 2 ] Cahn R S. Wide Area Network Design[ M ]. America : Morgan Kaufmann Publishers , 1988.
- [ 3 ] 刘有衡. 关于通信网可靠性的研究进展[ J ]. 通信学报 ,1990 ,11( 4 ) :43 - 49.
- [ 4 ] Colbourn C J. Reliability Issues in Telecommunications Network Planning[ A ]. In Telecommunications Network Planning[ C ], Boston :Kluwer Academic Press , 1999 :135 - 146.
- [ 5 ] Hariri S , Raghavendra C S. SYREL : A Symbolic Reliability Algorithm Based on Path and Cutset Method[ J ]. IEEE Transactions on Computers , 1987 ,C-6( 10 ) :1224 - 1232.
- [ 6 ] Buchsbaum A L , Mihail M. Monte Carlo and Markov Chain Techniques for Network Reliability and Sampling[ J ]. Networks 25 , 1995 :117 - 130.
- [ 7 ] Yang Che-liang , Kubat P. Efficient Computation of Most Probable States for Communication Network with Multimode Component[ J ]. IEEE Transactions on Communications , 1989 ,37( 5 ) :535 - 538.
- [ 8 ] Sanso B , Gendreau M , Soumis F. Communication and Transportation Network Reliability Using Routing model[ J ]. IEEE Trans. Comm. 1991 ,39( 10 ) :1494 - 1501.
- [ 9 ] 谢金星, 荆文训. 网络优化[ M ]. 北京 :清华大学出版社 , 2000.



