

面向星间链路高动态网络的路由规划算法

朱 锋¹, 银 皓¹, 白海通², 周 淦¹

(1. 华北计算机系统工程研究所, 北京 100083;
2. 中国人民解放军陆军参谋部, 北京 100044)

摘要: 伴随着航天技术的发展, 卫星导航系统的技术也在不断提高。星间链路是在导航卫星之间建立具有精密测量和数据传输功能的无线网络, 作为提高导航系统生存能力的重要手段, 对卫星导航系统的建设至关重要。其中, 星间链路路由规划算法作为星间链路技术的重要组成部分, 也成为了星间链路技术的主要研究领域和方向之一。根据星间链路系统实际运行场景, 结合了星间链路网络的特点, 综合考虑数据传输时延和卫星节点负载等多种评价指标, 基于广度优先算法思想, 辅以多种剪枝策略, 提出了一种基于多评价因子的路由规划算法。该算法能够在应用于高动态时变网络下寻找前 N 条最优路径。同时, 对从节点间建链路径条数、节点建链情况、路径的开销代价等多种角度对于路由算法的规划结果进行分析验证, 为星间链路路由规划中路径的筛选提供理论依据。

关键词: 星间链路; 路由规划算法; 高动态时变网络; 广度优先

中图分类号: TN927

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200422

中文引用格式: 朱锋, 银皓, 周淦. 面向星间链路高动态网络的路由规划算法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 18-22.

英文引用格式: Zhu Feng, Yin Hao, Zhou Gan. Routing planning algorithm for high dynamic inter satellite link networks[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 18-22.

Routing planning algorithm for high dynamic inter satellite link networks

Zhu Feng¹, Yin Hao¹, Bai Haitong², Zhou Gan¹

(1. National Computer System Engineering Research Institute of China, Beijing 100083, China;
2. The Staff Department of People's Liberation Army, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of space technology, the technology of satellite navigation system is also improving. Inter satellite link is a wireless network with precise measurement and data transmission functions between navigation satellites. As an important means to improve the survivability of navigation system, it is very important for the construction of satellite navigation system. As an important part of inter satellite link technology, inter satellite link routing algorithm has become one of the main research fields and directions of inter satellite link technology. According to the actual operation scenario of the inter satellite link system, combined with the characteristics of the inter satellite link network, considering a variety of evaluation indexes such as data transmission delay and satellite node load, based on the idea of breadth first algorithm, supplemented by a variety of pruning strategies, this paper proposes a multi evaluation factor based routing planning algorithm. The algorithm can find the first N optimal paths in high dynamic time-varying networks. At the same time, this paper analyzes and validates the planning results of routing algorithm from many aspects, such as the number of paths between nodes, the situation of nodes building chains, the cost of path overhead and so on, so as to provide a theoretical basis for the selection of paths in the inter satellite link routing planning.

Key words: inter-satellite link; route planning algorithm; high dynamic network; breadth-first-search

0 引言

随着卫星导航系统不断发展, 利用星间链路技术实现导航系统的自主导航已经成为了新一代导航系统的发展方向^[1]。目前, 全球四大导航系统除 GPS 已经建成星间链路系统外, 都在朝着融入星间链路技术的导航星座方向迈进^[2]。星间链路技术能够极大提高全球卫星导航系统的精度和自主运行能力, 减少对地面站的依赖, 并进一步缩短全网路由时延, 提高全网传输容量^[3]。有

关星间链路的技术研究主要集中在星间链路的拓扑设计方案和星间链路路由算法两方面^[4]。路由规划算法基于导航星座网络的拓扑建链, 对网络中的数据传输进行性能优化, 保证数据的高效传输。

目前, 关于导航星座网络的路由算法规划研究有很多。并从不同方向上给出多种研究成果。文献[1]提出将 DTN 中的 CGR 启发式算法应用于星间链路网络, 并进行了可行性分析和验证。文献[2]基于 Dijkstra 算法思想,

提出一种综合考虑等待时延、链路速率、传输距离等多因子的混合路由策略。文献[3]将演化图模型用于星间链路网络,并对演化图最早到达路径算法时延性能进行仿真模拟。文献[4]提出了最少跳数最早到达时间路由算法。文献[5]则对文献[4]中的 CGR 路由算法在星间链路网络中的应用进行了改进,提高其适用性。文献[6]提出了一种应用于低轨星间链路中,基于自适应调制编码策略的 QoS 时延约束的前 N 条最短路径算法。文献[7]则从对星间链路评价因子权重参数的选取角度进行了探究和验证。

本文提出的路由规划算法基于广度优先算法思想,以传输时延和卫星负载等多种评价指标为开销代价,寻找卫星节点之间通信开销代价最小的前 N 条最优路径。同时,对路由算法的有效性和正确性进行了多角度验证工作,为星间链路的路由算法中路径筛选提供依据。

1 星间链路网络特点

星间链路是在导航卫星之间建立具有精密测量和数据传输功能的无线网络。由于地球遮挡和卫星天线角度限制,加之地球自转和卫星在轨运行等因素,致使卫星和卫星之间形成非连续可见性。卫星节点之间通过其配备的指向性天线建立链路,在 STDMA 通信体制下,一条指向性天线在同一个时间间隔内只能同一个节点建立连接。从而在每个时间间隔内,形成了一个非全连通的网络拓扑结构。因此,星间链路网络是一个典型的延迟/中断容忍网络(Delay/Disruption Tolerant Network, DTN)。为了提高链路的利用效率,提高建链卫星的个数,需要卫星不断切换天线角度,尽可能和不同卫星进行建链。

针对 STDMA 通信体制带来的星间链路网络的高动态性特点,需要在进行路由规划之前,将星间链路网络的动态拓扑关系做静态化处理,即综合考虑星间、星地可视关系及各类业务约束的基础上,可将规划时间段划分为多个规划周期,每个周期再进一步划分为多个时隙,确定规划周期内每一个时隙的星间、星地的建链关系。这一过程被称为时隙规划。时隙规划能够将星间链路网络的拓扑结构以时隙表的形式存储下来,供路由规划算

法进行路径的搜索和筛选,是路由算法规划的重要前置步骤。

本文将采用图 1 所示的时隙划分方案。将整个规划时间段 T 划分为长度为 1 min 的若干个超帧,每个超帧进一步划分,以 3 s 为单位划分成 20 个时隙。3 s 内采用双向测距,两颗卫星之间往返各建立一次链路,将一个时隙划分成两个长度为 1.5 s 的建链时长,每次建链进行发送和接收操作。

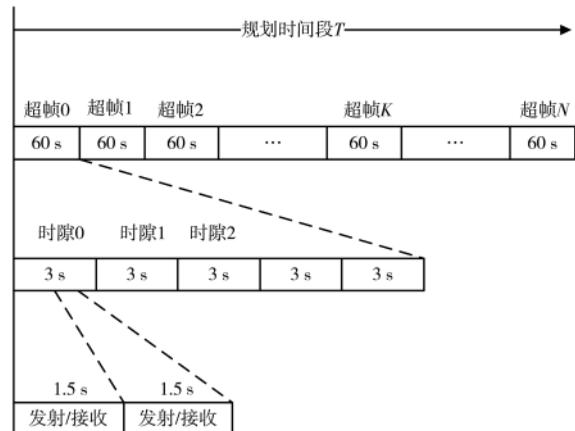


图 1 时隙划分方案

2 路由规划算法设计

本文设计的路由算法以时隙表作为输入,并根据时隙表中节点建链情况,执行路径搜索算法,时序化地进行路径搜索和筛选,确定节点之间的转发路径。因此,路由规划算法需和时隙规划采用的时隙划分方案保持一致。基于以上因素,本文设计并采用了如图 2 所示的“翻折法”路径规划方案。路由规划算法将整个规划时间段以 1 min 为单位,划分为多个路由规划区间。在路径搜索中也以 1 min 作为一个规划区间,即在 1 min 内完成节点之间路径的规划搜索,每个规划周期之间没有重叠,当前 1 min 规划结束后,直接进行下一个周期的规划。

图 3 为路由规划算法流程图。首先对时隙表文件进行解析,获取星间链路节点建链信息,同时,算法接收跳数和传输时延阈值等规划参数的输入,用于在路径搜索

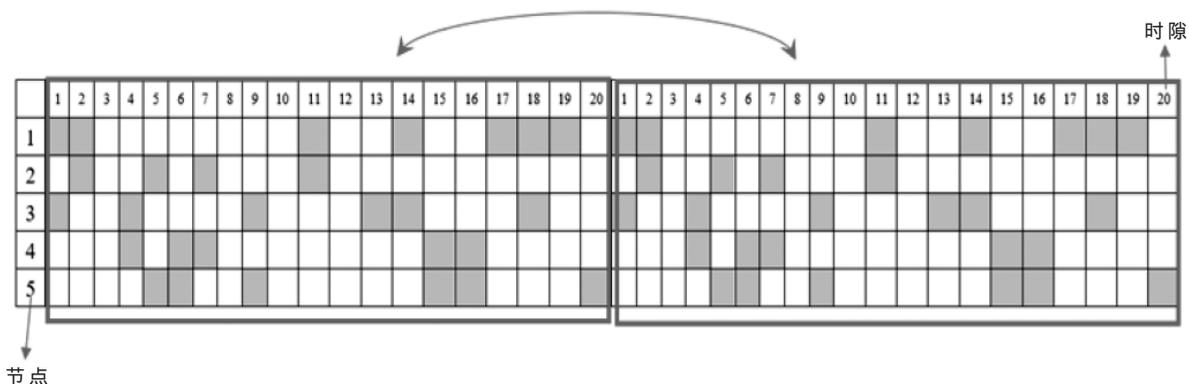


图 2 “翻折规划法”示意图

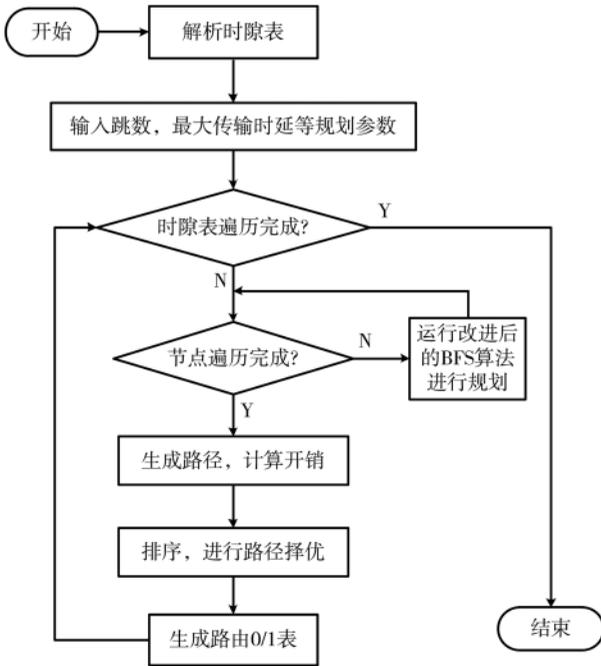


图3 路由规划算法流程图

过程中进行剪枝操作。然后循环遍历时刻表, 针对于每张时刻表, 遍历所有节点, 运行广度优先算法, 进行节点之间的路径搜索, 并将路径信息记录下来, 同时, 基于路径传输时延和负载等多种因素, 计算路径的开销代价, 并对节点之间的路径按照开销代价进行排序后选取前 N 条代价最小的路径。然后跳转到下一张时刻表, 重复上述步骤, 待所有时刻表遍历完成后, 路由规划算法运行结束。

由于广度优先算法的开销较大, 为了提高算法运行效率, 同时避免无效路径的搜索, 降低算法运行开销, 在 BFS 算法运行过程中, 采取以下策略对路径进行剪枝。

(1) 在路径搜索过程中, 针对每条路径的多个下一跳候选节点, 检测其是否已存在路径的历史节点中。若存在, 放弃该节点, 防止路径回溯。

(2) 在路径遍历过程中, 对于每条路径, 实时统计该路径所经历节点数, 若超出最大跳数阈值或最大传输时延阈值, 则放弃该路径的搜索。

(3) 在路径搜索过程中, 针对每条路径, 统计该路径从起点到目前节点所经历的传输时延, 若超出最大传输时延, 则放弃该路径的搜索。

(4) 对于任意两节点之间的路径条数, 设置最大路径阈值, 若两节点之间路径超过该值, 将不再进行继续搜索。

为满足算法上述计算需求, 需要对星间链路路径进行定义。每条路径中包含路径编号、路径经历节点以及所在时隙、该路径的总体时延、路径的负载和开销代价等属性。属性定义如表 1 所示。

在路径搜索结束后, 需要综合路径的时延和负载等

表 1 路径定义

变量符号	变量含义	存储形式
PathIndex	路径编号	整数
Path	路径节点集合	数组
Slot	路径节点对应时隙	数组
TimeDelay	路径时延	整数
Load	路径负载	整数
Cost	路径开销	整数

多种评价因子, 计算节点之间每条路径的代价, 并根据代价进行排序, 择优后选择前 n 条最优路径。在路径代价的计算过程中, 根据星间链路的规划场景要求, 为不同的评价因子赋予不同的权重参数。计算公式如下:

$$Cost = w_1 \cdot TimeDelay + w_2 \cdot Load$$

其中, $TimeDelay$ 为路径的传输时延, 可以根据数据转发起始时隙和终止时隙计算出; $Load$ 为路径负载, 可根据路径中间节点的实时负载加和计算得出; w_1 和 w_2 分别代表路径传输时延和负载的权重, 根据文献[7]中介绍的算法参数选取方案, 本文在进行仿真计算后得出结论, 当 w_1 和 w_2 的取值分别为 0.6 和 0.4 时, 计算得到的路径开销代价最精确。

3 路由算法结果验证与仿真

为了进行路由算法结果的验证和仿真, 在某国产星间链路路由算法验证平台上进行了建模和结果验证测试。本文采用的导航星座模型为 Walker 构型 MEO24/3/1+3GEO+3IGSO 的设计方案。该方案由 30 颗卫星组网而成, 包含 24 颗中轨道卫星(MEO)、3 颗地球静止轨道卫星(GEO)和 3 颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)。为了便于计算, 将 GEO 编号设置为 1 到 3, IGSO 编号设置为 4 到 6, MEO 编号设置为 7 到 30, 并为卫星节点配置相应的规划参数, 用于后续计算。同时, 规划方案时长为 604 800 s(7 天), 因此需要对 2 016 张时刻表进行路径规划。

基于此星座设计方案, 在该算法验证平台上调用可视计算算法库和时隙规划算法库, 生成时刻表。路由规划需要在时刻表的基础上进行路径规划操作。图 4 给出

16	4	5	2	3	17	0	0	0	0	19	0	24	0	0	1	6	21	11	0	18	26	25	13	23	22	0	0	0	0	
0	5	0	15	2	0	0	16	20	21	13	0	11	24	4	8	0	27	26	9	10	0	0	14	0	19	18	0	0	0	
10	0	11	8	0	0	17	4	23	1	3	16	25	26	0	12	7	0	0	0	0	0	0	9	27	13	14	24	0	0	
9	18	24	22	7	17	5	0	1	13	0	25	10	0	0	0	6	2	0	0	0	4	0	3	12	28	0	26	0	0	
11	5	0	28	2	18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	27	30	6	0	0	0	25	26	29	22	23	16	4	24	17	
0	0	0	22	29	0	24	0	15	19	27	0	0	0	9	21	0	20	10	18	16	4	26	7	0	23	11	0	5	0	
11	0	0	14	0	0	25	24	29	19	1	0	16	4	26	13	20	0	10	17	0	0	0	0	8	7	15	0	0	0	
0	0	17	8	14	25	26	4	28	30	0	18	24	5	0	0	3	12	0	0	0	0	0	13	6	7	0	9	0	10	
0	4	18	2	8	24	25	5	0	0	30	0	0	26	0	29	28	3	0	0	0	0	0	0	6	7	14	0	17	16	11
0	18	0	29	27	0	0	0	12	28	23	9	0	0	0	22	0	2	0	0	26	16	11	30	0	21	5	10	4	24	
0	0	0	28	0	0	0	17	15	12	22	10	0	0	9	19	8	0	16	26	24	11	25	21	23	20	0	4	0	0	
17	0	0	20	15	0	0	10	12	8	0	9	18	26	5	0	1	13	0	4	24	0	0	21	30	14	0	0	0	25	
16	0	4	3	15	26	18	11	0	0	8	24	25	17	5	1	14	7	0	0	0	0	0	12	13	6	0	0	0	0	
9	11	24	7	8	0	4	5	1	27	2	0	0	0	18	30	0	15	0	0	0	0	0	3	0	29	10	0	26	16	
0	4	0	2	0	0	0	0	28	22	27	0	0	0	24	23	19	0	17	0	0	10	16	15	30	29	11	9	26	25	
0	5	0	21	2	0	0	0	14	23	0	0	0	9	0	0	22	29	26	24	4	17	10	20	27	19	25	0	18	0	
0	0	0	15	21	16	0	0	0	14	17	18	11	4	6	12	13	26	25	5	0	0	27	20	19	24	0	0	0	0	
10	0	16	20	14	11	9	18	7	1	6	24	0	5	26	3	0	8	0	4	0	0	0	12	0	15	0	0	0	0	
11	0	4	3	0	24	26	0	19	21	1	25	0	0	0	28	30	0	9	0	10	0	0	6	12	7	0	16	0	17	
0	5	24	29	2	26	0	0	22	20	0	0	0	0	0	23	30	0	10	0	9	17	3	28	6	0	25	4	18	0	

图4 某张时刻表

了某一张时隙表示意图。该时隙表共 20 行,每行代表一个时隙,一共包含 20 个时隙,每个时隙的间隔为 3 s。时隙表共包含 30 列,每一列中存储该卫星在 20 个时隙的建链情况。例如,行编号为 1,列编号为 6 的表格元素为 17,代表卫星编号为 6 的节点在该分钟内的第 1 个时隙和编号为 17 的节点进行建链。若表中某元素为 0,代表该节点在该时隙下未与任何其他节点进行建链。

图 5 是一张包含 30×30 个元素的表格,该表格在图 5 的时隙表基础上,运行路由规划算法计算得出。该表格展示了 30 颗卫星之间建链路径条数。表格中某个元素代表该元素所处行代表卫星和所处列代表卫星建链的路径条数,譬如第一行第二列元素为 8,代表卫星 1 和卫星 2 之间建链路径有 8 条(注:本场景下默认卫星不和其自身建链,因此对角线位置元素为 0,代表路径条数为 0)。

0	8	14	13	12	7	8	8	12	13	9	7	6	7	12	8	9	7	8	13	13	9	19	16	12	8	8	6	12	
5	0	10	18	14	12	12	11	11	16	7	13	7	13	13	8	11	6	7	16	12	4	3	20	14	20	11	9	9	6
5	10	0	19	19	12	8	7	9	13	12	10	7	14	12	5	11	7	3	14	14	7	6	15	20	16	11	9	10	8
9	13	10	0	18	17	12	17	19	16	12	19	8	18	14	9	9	16	14	21	16	14	8	24	19	20	20	13	14	9
10	12	21	19	0	18	12	11	8	14	10	23	12	12	15	5	11	15	8	18	12	8	8	24	18	18	12	15	16	13
5	5	12	23	10	0	7	10	8	11	9	6	9	8	8	8	5	9	2	11	6	3	5	14	11	9	6	6	6	8
5	9	15	21	9	12	0	7	10	18	11	13	10	8	14	10	9	13	8	16	13	6	7	16	15	13	10	6	12	11
8	10	9	16	15	14	11	0	9	13	15	14	9	11	13	6	5	13	11	17	14	11	9	25	22	22	13	9	10	9
8	18	20	16	14	14	10	12	0	13	13	13	6	17	12	6	12	10	7	20	17	10	11	23	19	17	15	10	9	17
10	9	16	14	16	17	7	4	7	0	11	14	4	12	11	11	9	5	8	19	19	9	9	18	21	14	12	15	8	12
8	10	12	18	11	12	5	12	7	18	0	15	5	17	11	11	10	9	7	18	15	7	10	17	13	8	10	16	8	15
9	10	9	16	18	13	8	6	3	8	12	0	5	12	8	5	8	11	4	14	16	5	5	20	15	15	9	8	7	8
6	9	11	21	19	10	8	13	9	15	8	8	0	7	7	9	10	12	9	11	15	8	10	16	17	18	12	9	13	12
6	12	10	22	16	10	9	13	13	11	16	12	9	0	17	10	14	14	12	13	8	16	10	21	21	15	15	8	12	8
5	10	13	11	11	9	8	10	5	13	10	10	3	7	0	8	9	8	8	12	8	8	4	17	8	11	8	9	8	8
7	11	13	12	12	16	12	7	10	9	13	16	7	14	16	0	9	10	10	14	20	8	10	20	14	12	11	11	12	14
8	19	18	16	18	20	15	7	14	9	13	17	9	19	16	5	0	12	5	25	25	8	8	25	19	15	15	12	8	12
8	14	16	21	16	16	9	10	9	12	14	14	8	17	14	9	0	8	19	18	10	10	20	12	14	14	17	16	13	
7	10	10	17	15	7	9	9	11	9	14	9	4	6	8	9	10	6	0	8	8	12	12	17	19	8	11	12	5	8
6	11	10	15	14	7	12	6	13	9	14	8	4	9	13	4	3	5	7	0	7	13	7	22	18	10	8	10	6	7
5	6	18	22	9	12	10	5	11	9	8	13	6	3	9	12	7	6	8	9	0	7	7	19	21	12	7	14	16	13
8	10	8	11	17	10	9	11	8	20	20	10	3	14	17	6	14	12	5	9	12	0	6	25	9	16	10	11	8	8
8	6	13	14	13	9	7	10	4	10	8	15	4	11	9	7	10	10	5	9	9	6	0	26	11	9	3	7	8	12
11	18	17	24	14	11	13	19	8	17	15	12	10	15	16	13	15	19	11	19	12	11	15	0	19	17	16	15	22	13
7	7	12	16	11	8	8	8	7	12	9	7	9	17	9	10	12	9	15	17	6	7	16	0	13	7	7	14	9	8
8	12	18	22	22	12	8	18	11	14	11	18	8	12	16	13	10	10	8	13	7	13	7	22	14	0	15	13	11	13
6	8	13	17	8	9	6	10	6	12	5	12	7	8	8	7	10	9	3	12	11	4	8	13	17	12	0	10	9	11
10	12	9	12	23	17	9	11	9	14	20	13	5	16	14	6	11	9	5	12	9	9	7	25	22	15	14	0	5	7
7	8	8	11	16	11	10	10	12	14	9	5	12	15	9	10	10	11	7	11	6	17	12	14	11	6	0	5	5	5
6	7	17	18	12	7	6	5	4	10	10	12	3	11	7	4	7	5	0	15	8	2	5	19	13	8	10	7	4	0

图 5 30 颗卫星的路由规划结果

为了进一步对算法结果进行分析验证,本文以卫星 1 作为目标卫星,分析卫星 1 和其他 29 卫星节点的建链。图 6 展示了同一场景下,运行本算法和 CGR 算法,卫星 1 和其他 29 颗卫星节点之间,在整个规划时间段内,生成

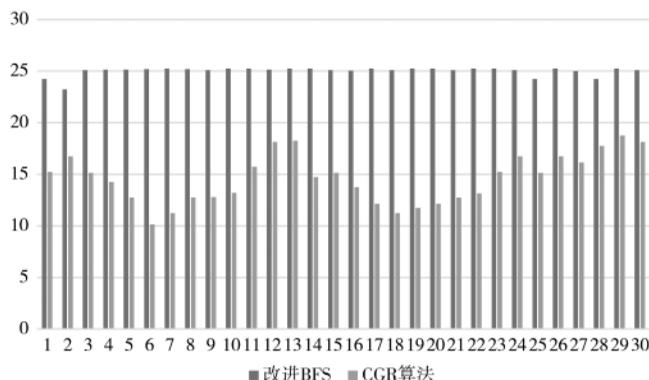


图 6 同一场景下两种算法的生成路径数对比

平均路径数量对比图(横轴为卫星编号)。大多数算法在考虑最优路径时,若以数据传输经过的时隙总长度作为传输时延,无论采用何种算法,在建链结果及优化目标相同的情况下,实际上得出的最优路径是一致的^[5]。因此,若算法能够生成更多的路径,便能提供更多的筛选方案。由图可知,本算法下,卫星 1 和其他卫星的生成可供筛选的建链路径数大部分在 24~25.5 条之间。相比较其他能够生成多条候选路径的算法,本算法能够提供更多的路径方案。

图 7 是从算法运行时间的角度对算法的运行效率进行比较。在对同一场景进行规划条件下,分别对采取剪枝的 BFS 算法、未采取剪枝的 BFS 算法和 CGR 算法进行运行时间上的对比。规划时间段长度以天为单位(在实际对比计算中,转化为对多少张时隙表进行路由规划,譬如,规划时长为 7 天,相当于对 2016 张时隙表进行运算,以此类推),分别对比三者之间的运行时长。根据图 7 可以得出结论,三种算法运行时间和天数之间基本成线性关系,此外,在运行时间上,采取剪枝策略的 BFS 算法 < CGR 算法 < 未采取剪枝策略的 BFS 算法。因此,本算法具有更高的运行效率,前文中剪枝策略不仅避免了无效路径的遍历,同时也提高了算法的运行效率。

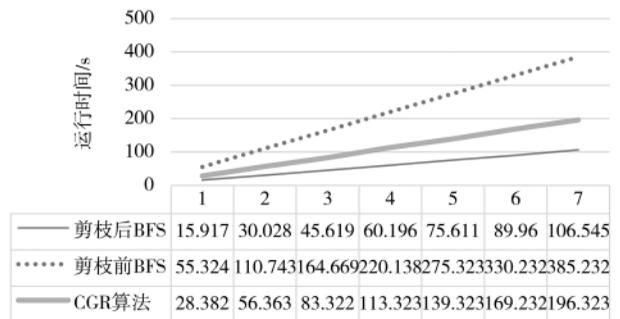


图 7 算法运行时间对比图

为了进一步分析算法的生成结果以及每条路径的详细信息,针对一个时隙内,选卫星 1 为目标卫星,分析该卫星和其他卫星的建链情况。图 8 展示了在图 4 时隙表运行本算法得出的卫星 1 和其他 29 颗卫星的建链情况。

表 2 给出了本次规划中,基于图 4 的时隙表中卫星之间的建链情况,运行本文规划算法得出的路径详细信息。本文选择卫星节点 1 为起始节点,以卫星节点 24 为目的节点,抽取了卫星 1 和卫星 24 之间的建链结果,根据表 1 中路径结构体定义,从路径所经节点、路径起始时隙、路径终止时隙、路径跳数和路径开销代价(由前文代价公式计算得出)等角度,对所生成候选路径信息进行展示。

本算法在计算多条候选路径的同时,根据计算的路径代价大小来作为转发依据,将节点网络负载、所经历

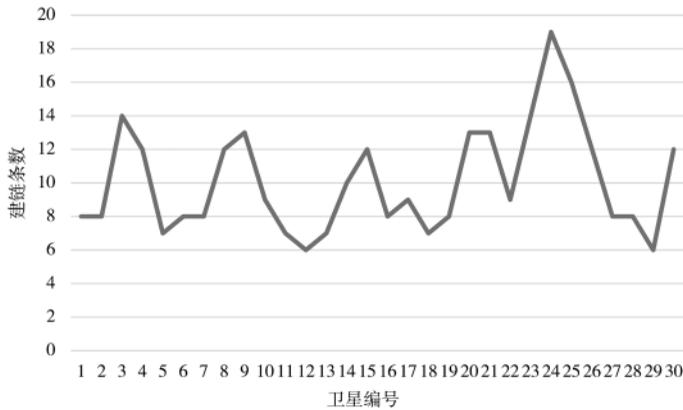


图8 卫星1在某个时隙下和其他卫星的建链路径数

表2 卫星1到卫星24的路径计算结果

路径	起始时隙	终止时隙	路径跳数	路径代价
1->16->8->24	1	7	3	0.260 00
1->16->13->24	1	8	3	0.366 42
1->10->13->24	3	8	3	0.246 48
1->10->30->24	3	10	3	0.448 26
1->9->12->24	4	13	3	0.627 92
1->9->12->24	4	13	3	0.590 32
1->11->30->24	5	10	3	0.390 26
1->11->30->24	7	10	3	0.283 59
1->17->12->24	12	18	3	0.417 05
1->16->6->24	13	19	3	0.487 83
1->16->3->24	13	20	3	0.538 95
1->16->12->25->6->24	1	9	5	0.503 80
1->16->27->11->30->24	1	10	5	0.616 86
1->9->15->26->21->24	4	11	5	0.607 52
1->9->15->26->21->24	4	12	5	0.636 52
1->9->28->10->12->24	4	13	5	0.818 15
1->17->14->11->6->24	12	19	5	0.731 39
1->16->30->25->27->24	13	17	5	0.624 48
1->9->14->11->6->24	14	19	5	0.686 66

跳数、路径时延的因素考虑进来,从而大大降低了网络拥塞发生的概率。因此,根据表2中的路径计算结果,若 N 取值为5,即获得最优的前5条路径,那么结果为1->10->13->24,1->16->8->24,1->11->30->24,1->16->13->24,1->11->30->24。

4 结论

本文针对高动态的星间链路网络,基于广度优先搜索思想,综合考虑数据传输时延和网络节点负载的等因素,提出了一种多评价因子的路由规划算法。同时,本文对从多种角度对于路由算法的规划结果进行分析,譬如算法运行时间、节点间建链路径条数、节点建链情况、路径的开销代价等,从而实现对于路由算法的有效性和正确性进行了多角度验证工作,为星间链路的路由算法中路径筛选提供了依据。

参考文献

- [1] 燕洪成,张庆君,孙勇.基于连接图路由算法的导航星座网络路由性能研究[J].第五届中国卫星导航学术年会论文集-S8 卫星导航模型与方法,2014.
- [2] 张方,周淦,喻瑶瑶,等.面向导航星座的混合路由技术研究[J].信息技术与网络安全,2018,37(6):98-102.
- [3] 王彦,刘波,虞万荣,等.基于演化图的导航星座星间路由算法[J].中国空间科学技术,2012,32(5):76-83.
- [4] 张之学.基于演化图理论的导航卫星星座动态路由准则及算法[C].第七届中国卫星导航学术年会论文集 S07 卫星导航增强技术,2016:11-16.
- [5] 李子璇.导航星座网络建链算法与路由算法研究[D].南京:南京大学,2019.
- [6] 黎若楠.星间链路跨层路由算法的研究[D].北京:北京邮电大学,2018.
- [7] 王嗣鑫.基于多目标优化的星间链路网络路由规划算法研究[D].北京:中国电子信息产业集团有限公司第六研究所,2019.
- [8] YI X, SUN Z, YAO F, et al. Satellite constellation of MEO and IGSO network routing with dynamic grouping[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2013, 31(6): 277-302.
- [9] CAINI C, CRUICKSHANK H, FARRELL S, et al. Delay- and disruption-tolerant networking (DTN): an alternative solution for future satellite networking applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1980-1997.
- [10] BIRANE E J. Congestion modeling in graph-routed delay tolerant networks with predictive capacity consumption[C]. GLOBECOM 2013-2013 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2013.
- [11] FRAIRE J A, MADOERY P, BURLEIGH S, et al. Assessing contact graph routing performance and reliability in distributed satellite constellations[J]. Journal of Computer Networks & Communications, 2017(6): 1-18.

(收稿日期:2020-05-27)

作者简介:

朱锋(1994-),男,硕士,主要研究方向:计算机软件工程、星间链路路由算法。

银皓(1991-),女,硕士,主要研究方向:电子信息工程、星间链路路由算法。

白海通(1989-),男,本科,主要研究方向:信息安全。

周淦(1988-),男,博士,主要研究方向:计算机软件工程、电子信息工程、星间链路路由算法。

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《电子技术应用》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）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、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！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所