

低轨通信星座与地球站连通规划方法

赵书阁, 李小玉, 刘 奇, 武爱景, 魏 璟

(航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100854)

摘 要: 提出一种低轨通信星座与地球站连通规划方法。考虑低轨通信星座卫星数量较多, 直接建立低轨通信星座与多个地球站的连通规划方法难度较大, 依次建立单颗卫星与单个地球站连通规划方法、星座与单个地球站连通规划方法、卫星星座与多个地球站连通规划方法, 前一规划方法是后一规划方法的基础, 后一规划方法是前一规划方法的拓展, 最终形成一种低轨通信星座与多个地球站的连通规划方法。典型的仿真算例表明, 地球站与卫星星座连通的过程中, 地球站到卫星的仰角不低于通信仰角下限; 在地球站与卫星的单个连通段内, 离轴角的变化趋势都是先变小后变大; 地球站选择的连通卫星分别展现轨道面切换和一个轨道面内的卫星依次切换, 都间接验证了连通规划策略的正确性。

关键词: 低轨通信星座; 连通规划; 地球站

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022010

Connection Planning Method Between LEO Communication Constellation and Earth Station

ZHAO Shuge, LI Xiaoyu, LIU Qi, WU Aijing, WEI Jing

CASIC Space Engineering Development Co., Ltd., Beijing 100854, China

Abstract: A connection planning method between LEO communication constellation and earth station was proposed. Considering the large number of LEO communication constellation satellites, it is difficult to directly establish the connection planning method between LEO communication constellation and multiple earth stations. The connection planning method between single satellite and single earth station, the connection planning method between satellite constellation and single earth station, the connection planning method between satellite constellation and multiple earth stations were established. The former planning method is the basis of the latter planning method, which is the expansion of the former planning method, and finally forms a connection planning method between LEO communication constellation and multiple earth stations. A typical simulation example showed that in the process of connecting between the earth station and the satellite constellation, the elevation from the earth station to the satellite was not lower than the lower limit of the communication elevation. In the single connecting section between the earth station and the satellite, the variation trend of off-axis angle decreases first and then increases. The connected satellites selected by the earth station showed the orbital plane switching and the sequential switching of satellites in an orbital plane, which indirectly verified the correctness of the connection planning strategy.

Keywords: LEO communication constellation, connectivity planning, earth station

0 引言

近年来, 国内外多家企业提出能提供数据服务、实现互联网传输功能的低轨通信星座系统^[1]。这类低轨通信星座包括以下特点: 从星座规模看, 是由成百上千颗卫

星组成的巨型星座; 从星座构成看, 是由运行在低地球轨道 (LEO) 的小卫星构成; 从提供的服务看, 主要提供宽带的互联网接入服务^[2]。

低轨通信星座系统的主要优势是能够实现全球覆

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-02-02

基金项目: 民用航天技术预先研究项目

Foundation Item: Civil Aerospace Technology Advance Research Project

盖、受地形影响小、信号时延小、传输损耗小、便于用户终端小型化以及卫星发射入轨成本低、频率资源利用率高^[3]。由于一颗低轨卫星的信号覆盖地面的面积小,为了实现全球服务,需要由上百颗,甚至上千颗低轨卫星组网形成星座,为用户提供全球范围的更高质量的互联网服务^[4]。

低轨通信星座系统通常由空间段、地面段、用户段组成。低轨通信卫星系统通过空间段的卫星为信关站和用户站之间或用户站之间建立数据连接。其中,卫星与信关站的连通链路称为馈线链路,卫星与用户站的连通链路称为用户链路。不同卫星系统的通信体制也不相同。例如,LeoSat卫星系统计划为信关站和用户站之间、或各用户站间建立数据连接^[5];OneWeb卫星系统仅计划为信关站和用户站建立数据连接^[6]。

由于对地静止轨道(GSO)卫星相对于地面的方位接近固定,所以对地静止卫星系统的用户站/信关站(以下统称“地球站”)天线指向固定,地球站与固定的GSO卫星建立通信,不需要切换卫星。而低轨卫星相对于地球表面快速运动,当卫星飞出地球站的通信范围时,地球站需要指向下一颗飞过来的卫星,因此,低轨通信卫星系统的地球站必须频繁切换卫星才能实现长期持续通信,需要建立低轨通信卫星星座与地球站连通规划方法,确定地球站与卫星星座的哪颗卫星连通,并确定卫星与地球站连通的过程中,卫星到地球站以及地球站到卫星的方向,以确定卫星天线以及地球站天线的指向。

本文提出一种低轨通信卫星星座与地球站连通规划策略,用于解决地球站与卫星星座的哪颗卫星连通的问题。

1 连通规划基础模型

1.1 坐标系描述

卫星的位置、速度通常在J2000.0赤道惯性坐标系给出,地球站的位置通常在WGS-84地心直角坐标系给出。本文中,卫星到地球站的单位方向矢量在轨道坐标系给出,地球站到卫星的单位方向矢量在东-北-天地理直角坐标系给出。以下给出J2000.0赤道惯性坐标系、WGS-84地心直角坐标系、东-北-天地理直角坐标系以及轨道坐标系4种主要坐标系的定义^[7-8]。

(1) J2000.0赤道惯性坐标系

坐标系原点:地球质心。

基本面:J2000.0地球平赤道面。

X轴:在基本平面内由地球质心指向J2000.0平春分点。

Z轴:为基本平面的法向,指向北极方向。

Y轴:与X轴、Z轴构成右手坐标系。

J2000.0是当前最新FK5星表所采用的历元,是FK5

星表所采用的天体基本参考系,也是目前卫星轨道计算所采用的基本惯性坐标系。T0为历元2000.0年(2000年1月1.5日)。

(2) WGS-84地心直角坐标系

坐标系原点:地球质心。

基本面:地球赤道面。

X轴:在基本平面内指向国际时间局BIH1984.0定义的零子午面与协议地球赤道的交点。

Z轴:为基本平面的法向,指向BIH1984.0定义的协议地极(CIP)方向。

Y轴:与X轴、Z轴构成右手坐标系。

(3) 东-北-天地理直角坐标系

坐标系原点:地球表面某点。

基本面:当地东-北方向构成的平面。

X轴:指向东。

Z轴:指向北。

Y轴:与X轴、Z轴构成右手坐标系。

(4) 轨道坐标系

坐标系原点:卫星质心。

基本面:卫星轨道面。

X轴:沿轨道平面与当地水平面交线,指向飞行方向。

Z轴:沿当地垂线指向地心。

Y轴:与X轴、Z轴构成右手坐标系,在轨道法向的反向。

由于各状态量分别在不同的坐标系给出,在卫星与地球站的连通规划计算过程中,需要经过多次不同空间坐标系之间的转换,J2000.0赤道惯性坐标系、WGS-84地心直角坐标系、东-北-天地理直角坐标系以及轨道坐标系4种主要空间坐标系的转换关系如下。

轨道坐标系中描述的状态量,转换到东-北-天地理直角坐标系,需要经历3次转换,分别是:从轨道坐标系到J2000.0赤道惯性坐标系的转换;从J2000.0赤道惯性坐标系到WGS-84地心直角坐标系的转换;从WGS-84地心直角坐标系到东-北-天地理直角坐标系的转换。其中,比较复杂的是从J2000.0赤道惯性坐标系转换到WGS-84地心直角坐标系的转换,需要先后进行岁差改正、章动改正、格林尼治真恒星时角旋转以及极移修正。岁差、章动、格林尼治真恒星时角以及极移都是与时间相关的变量,计算方法较为复杂。这些变量的计算公式以及J2000.0惯性坐标系转换到WGS-84地心直角坐标系的转换关系可以参考文献^[7-8]。空间坐标系之间的转换关系如图1所示。

1.2 离轴角和方位角

在东-北-天地理直角坐标系中,A点到B点的单位矢

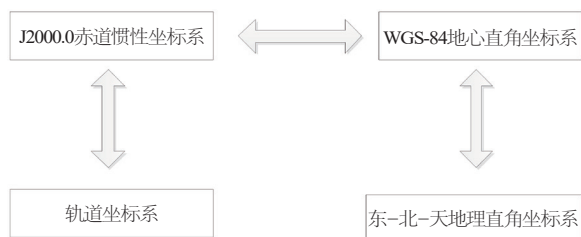


图1 空间坐标系之间的转换关系

量方向可以通过该单位矢量在坐标系的离轴角和方位角表达。离轴角和方位角的定义如下。

离轴角：单位矢量方向与+OZ轴的夹角。

方位角：单位矢量方向在XOY平面的投影与OX轴正向的夹角，逆时针为正。

离轴角和方位角的定义示意如图2所示，地球站到卫星的指向通过其在当地东-北-天地理直角坐标系的离轴角和方位角描述。卫星到地球站指向通过其在卫星轨道坐标系的离轴角和方位角描述。

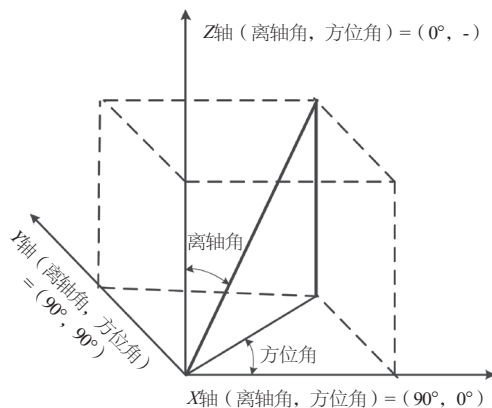


图2 离轴角和方位角的定义示意

1.3 卫星与地球站可连通判断方法

卫星与地球站在空间几何角度满足可连通条件是卫星与地球站连通的基础。在实际任务中，除了空间几何条件，卫星与地球站是否进行连通还需要考虑其他条件，例如实际通信需求。本小节仅从空间几何角度，对卫星与地球站是否满足可连通条件进行判断。

卫星相对于地球站的仰角（即离轴角的余角）通常作为空间可见性判断指标之一。本小节采用通信仰角进行可见判断，将通信仰角下限记为 γ_0 ，将地球站到卫星指向的单位矢量在东-北-天地理直角坐标系的仰角记为 γ ，可连通判断标准为：

- 当 $\gamma \geq \gamma_0$ 时，卫星与地球站可连通；

- 当 $\gamma < \gamma_0$ 时，卫星与地球站不可连通。卫星与地球站的几何示意如图3所示。

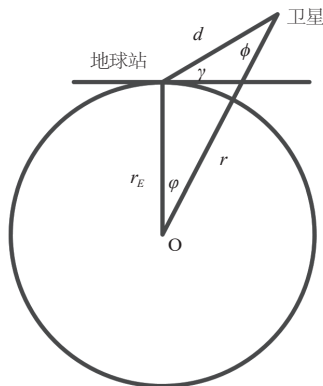


图3 卫星与地球站的几何示意

2 连通规划策略

本文连通规划策略的前提是：每个地球站由多副天线组成，最多其中的一副天线与一颗卫星建立连通关系，从而可以表达为某一时刻，一个地球站最多与一颗卫星建立连通关系；一颗卫星也最多与一个地球站建立连通关系；当地球站与多颗卫星的几何关系满足可连通几何条件时，选择连通时间最长的卫星，作为该地球站的连通卫星。

考虑到直接建立卫星星座与多个地球站的连通规划方法较为复杂，本文将依次建立单颗卫星与单个地球站连通规划方法、卫星星座与单个地球站连通规划方法、卫星星座与多个地球站连通规划方法，最终形成一种卫星星座与多个地球站的连通规划方法。

2.1 单星与单地球站连通规划方法

在进行单颗卫星与单个地球站连通规划时，首先根据卫星的初始轨道参数进行轨道预报，获得一个连通规划周期内卫星的位置、速度，本文不对轨道预报模型展开讨论，轨道模型可以见参考文献[7-8]；然后计算一个规划周期内卫星与地球站的可连通时间，以及可连通时间内卫星到地球站以及地球站到卫星的方向信息。

单颗卫星与单个地球站连通规划的主要输入参数包括：

- (1) 任务开始时刻 t_i 、任务结束时刻 t_f 、规划时间步长 Δt_s ；
- (2) 卫星初始轨道根数、地球站在WGS-84地心直角坐标系的位置；
- (3) 最小通信仰角 γ_0 。

单颗卫星与单个地球站的连通规划方法流程如下。

(1) 根据卫星的初始轨道参数进行轨道预报, 获得一个连通规划周期内, 各离散仿真时刻该卫星在J2000.0赤道惯性坐标系的位置、速度^[7-8]。

(2) 进行从J2000.0赤道惯性坐标系到WGS-84地心直角坐标系的转换, 获得各离散仿真时刻该卫星在WGS-84地心直角坐标系的位置、速度。

(3) 将卫星在WGS-84地心直角坐标系的位置与地球站在WGS-84地心直角坐标系的位置做差, 获得WGS-84地心直角坐标系中, 各离散仿真时刻地球站到卫星的指向矢量的三维分量。

(4) 进行从WGS-84地心直角坐标系到地球站所在地东-北-天地理直角坐标系的转换, 获得地球站所在地东-北-天地理直角坐标系中, 各离散仿真时刻地球站到卫星的指向矢量。

(5) 根据东-北-天地理直角坐标系中, 各离散仿真时刻地球站到卫星的指向矢量的三维分量, 计算各离散仿真时刻, 地球站到卫星的指向在东-北-天地理直角坐标系的仰角。

(6) 将所有离散仿真时刻中, 地球站到卫星的指向在东-北-天地理直角坐标系的仰角不低于通信仰角下限的时刻设置为可连通时刻, 其他时刻设置为不可连通时刻。

(7) 计算所有可连通时刻, 地球站到卫星指向在东-北-天地理直角坐标系的离轴角和方位角。

(8) 根据地球站所在地东-北-天地理直角坐标系中, 所有可连通时刻地球站到卫星的指向矢量, 依次进行从东-北-天地理直角坐标系到WGS-84地心直角坐标系的转换、从WGS-84地心直角坐标系到J2000.0赤道惯性坐标系的转换、从J2000.0赤道惯性坐标系到轨道坐标系的转换。获得轨道坐标系中, 所有可连通时刻卫星到地球站的指向矢量, 并计算所有可连通时刻, 卫星到地球站指向在轨道坐标系的离轴角和方位角。

2.2 卫星星座与单个地球站连通规划

本小节的卫星星座与单个地球站连通规划方法基于2.1小节的单星与单地球站连通规划方法实现。首先, 基于第2.1小节的方法计算卫星星座内所有卫星与地球站的几何可连通的时间段; 然后, 建立卫星星座与该地球站的连通序列。

相对于单颗卫星与单个地球站连通规划, 卫星星座与单个地球站连通规划的主要输入参数增加卫星星座所有卫星初始轨道根数。

卫星星座与单个地球站连通规划方法如下。

(1) 利用2.1小节的方法, 依次计算地球站与所有

卫星的可连通时间, 可连通期间卫星到地球站指向在轨道坐标系的离轴角和方位角、地球站到卫星指向在地理坐标系的离轴角和方位角。

(2) 从初始仿真时刻开始, 判断是否存在卫星与地球站可连通, 如果是, 确定可以与地球站连通的所有卫星的连通时长, 并将连通时长最长的卫星作为从当前时刻开始, 时长为最长连通时间的连通卫星, 然后将仿真时刻增加至该段连通的结束时刻; 否则, 将仿真时刻设置为下一离散仿真时刻, 直到结束一个连通规划周期的计算。

2.3 卫星星座与多地球站连通规划方法

本小节的卫星星座与多个地球站连通规划方法基于2.2小节的卫星星座与单个地球站连通规划方法实现。首先, 基于2.2小节的方法计算卫星星座与第1个地球站的连通序列; 然后, 将相应时间段依次与第1个地球站连通的卫星设置为其余地球站不可连通卫星, 基于2.2小节的方法计算卫星星座与第2个地球站的连通序列, 并将相应时间段依次与第2个地球站连通的卫星设置为其余地球站的不可连通卫星; 然后, 采用类似方法依次建立第3、4、…、 N 个地球站与卫星星座的连通序列。

相对于卫星星座与单个地球站连通规划, 卫星星座与多个地球站连通规划的输入参数增加所有地球站在WGS-84地心直角坐标系的位置。

利用2.2小节的方法, 卫星星座与多个地球站连通规划流程如下:

(1) 建立第1个地球站与卫星星座连通序列, 并将相应时间段依次与第1个地球站连通的卫星设置为其余地球站的不可连通卫星;

(2) 考虑上一步骤获得的不可连通时间段, 建立第2个地球站与卫星星座连通序列, 并将相应时间段依次与第2个地球站连通的卫星设置为其余地球站的不可连通卫星;

(3) 类似的, 依次建立第3、4、…、 n 、…、 N 个地球站与卫星星座的连通序列, 在建立第 n 个地球站与卫星星座的连通序列后, 将与第 n 个地球站连通的卫星设置为剩余地球站的不可连通卫星。

3 仿真算例

本文结合某低轨卫星星座系统对本文设计的连通规划方法进行仿真验证。该低轨星座系统的卫星数量为180颗, 地球站数量为10个。

3.1 仿真参数

本小节给出仿真算例的时间以及通信仰角参数、星

座初始轨道参数以及地球站位置参数。

数值仿真的时间以及通信仰角参数见表1。

表1 时间以及通信仰角参数

参数	数值
任务开始时刻	2020年1月1日0时0分0秒
任务结束时刻	2020年1月2日0时0分0秒
规划时间步长	10 s
最小通信仰角	10°

仿真算例的卫星星座构型参数见表2，根据表2的星座构型参数，可以直接确定所有卫星的半长轴、偏心率以及轨道倾角。第1个轨道面的第1颗卫星的初始升交点赤经、近地点幅角、平近点角自由选取。在本算例中取为表3所示的值。地球站到卫星的仰角为10°时，地球站到卫星方向的离轴角为80°，在轨道高度为1 050 km时，对应的卫星到地球站的离轴角为57.6°。

表2 卫星星座构型参数

构型参数	数值
卫星总数/颗	144
轨道面数/面	12
面内卫星数/颗	12
轨道高度/km	1 050
偏心率	0
轨道倾角	85°
相位参数	6
面间经度差	16.7°

表3 第1个轨道面的第1颗卫星的初始轨道要素

轨道要素	数值
半长轴/km	7 428.137
偏心率	0
轨道倾角	85°
升交点赤经	0°
近地点幅角	0°
平近点角	0°

数值仿真共包括10个地球站。10个地球站的经纬度见表4。

3.2 场景A：卫星星座与单地球站连通规划结果

按照本文给出的连通规划方法建立10个地球站与卫星星座的连通关系，以第1个地球站与卫星星座的连通结果为例，给出卫星星座与单个地球站的连通结果。

表4 地球站站址经纬度

序号	经度	纬度	高度/m
1	121.69°	23.92°	0
2	114.58°	-3.90°	0
3	80.85°	6.85°	0
4	43.68°	0.76°	0
5	-9.348°	31.48°	0
6	24.38°	70.24°	0
7	34.94°	34.69°	0
8	72.93°	35.91°	0
9	109.66°	55.54°	0
10	158.92°	53.46°	0

第1个地球站在不同时刻连通的卫星的编号如图4所示，图中红色圆圈为每段连通的开始时刻，绿色方框为每段连通的结束时刻（下同）。从图4中可以看出，地球站在不同的卫星间切换，卫星编号发生较大跳变代表跳变时刻前后，不同轨道面内的卫星分别与地球站连通；卫星编号连续变化代表一个轨道面内的卫星依次与地球站连通。图5是图4的局部放大图，在15 000~20 000 s时间段，与地球站连通卫星连续变化，一个轨道面内的卫星依次与地球站连通。

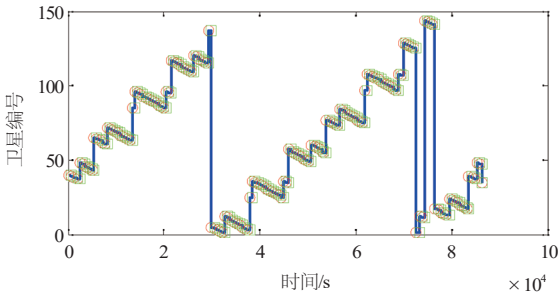


图4 第1个地球站在不同时刻连通的卫星编号

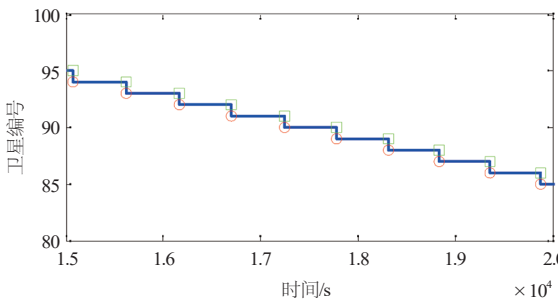


图5 第1个地球站在不同时刻连通的卫星编号的局部放大图

不同时刻,第1个地球站到相应连通卫星方向的离轴角和方位角如图6所示,可以看出地球站的仰角在 $[0, 80^\circ]$ 内变化,地球站到卫星方向的离轴角的最大值不大于 80° ,并且接近 80° ,从而满足地球站到卫星方向的仰角最小值不小于 10° 的约束,而且接近 10° 。这表明相应连通时刻,卫星相对于地球站的仰角满足连通仰角约束,而且接近连通仰角约束,从而获得较长的单段连通时间。为了使每个连通段内的方位角连续变化,图6中方位角变化范围为 $[-360^\circ, 360^\circ]$ 。图7是图6的局部放大图,可以看出在每个连通段内,离轴角的变化趋势基本都是先变小后变大,符合卫星相对于地球站的位置变化趋势。

不同时刻,相应连通卫星到第1个地球站方向的离轴角和方位角如图8所示,可以看出卫星的离轴角在 $[0, 57.6^\circ]$

内变化,离轴角的最大值(57.6°)与上述理论计算的地球站仰角为 10° 时的卫星到地球站的离轴角相同,可以获得类似于图6的结论。图9是图8的局部放大图,可以看出在每个连通段内,离轴角的变化趋势都是先变小后变大。

图4~图9给出单个地球站与卫星星座的仿真结果,从侧面验证了本文提出的单地球站与卫星星座连通规划策略的正确性。

3.3 场景B：卫星星座与多地球站连通规划结果

以10个地球站与卫星星座的连通结果为例,给出多地球站与卫星星座的连通结果。

10个地球站在不同时刻连通的卫星编号如图10所示,

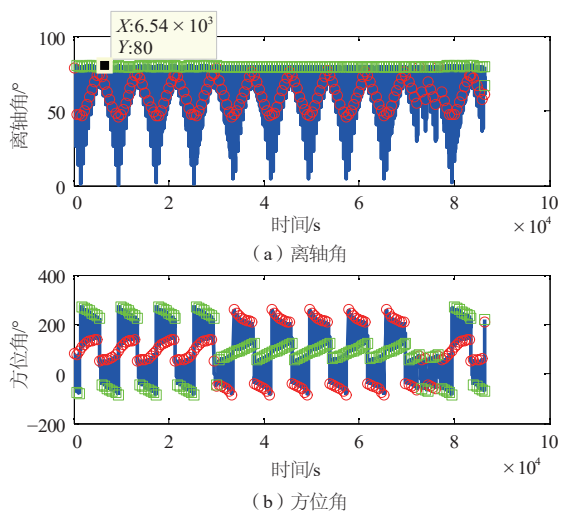


图6 第1个地球站到相应连通卫星方向的离轴角和方位角

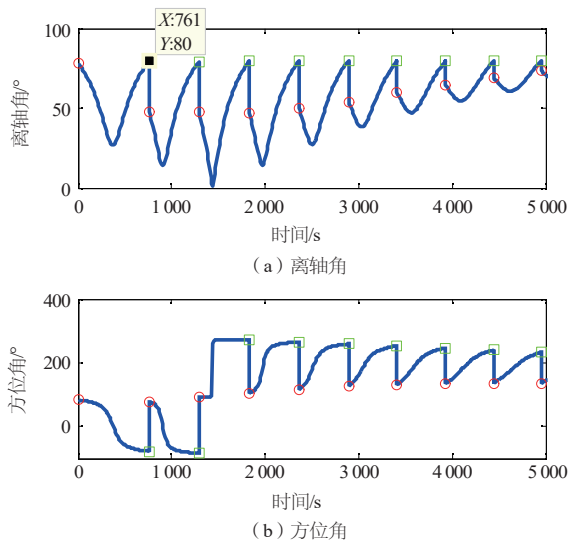


图7 第1个地球站到相应连通卫星方向的离轴角和方位角的局部放大图

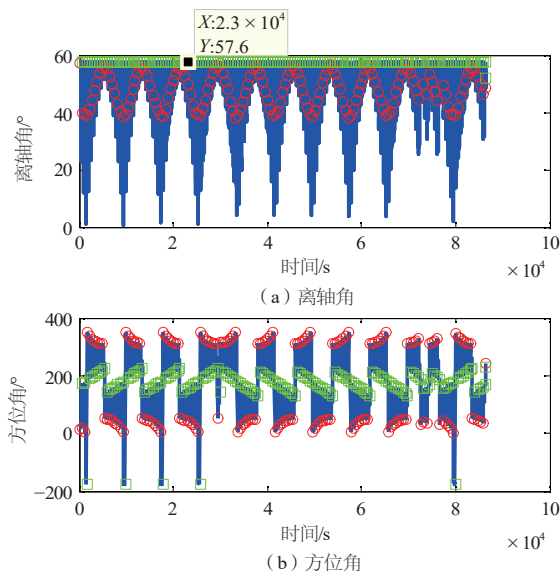


图8 相应连通卫星到第1个地球站方向的离轴角和方位角

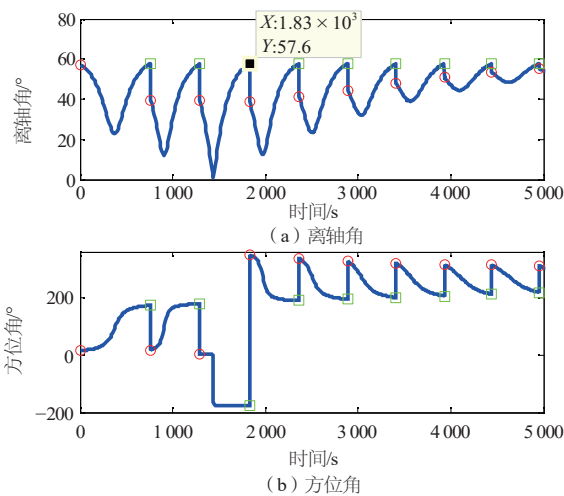


图9 相应连通卫星到第1个地球站方向的离轴角和方位角的局部放大图

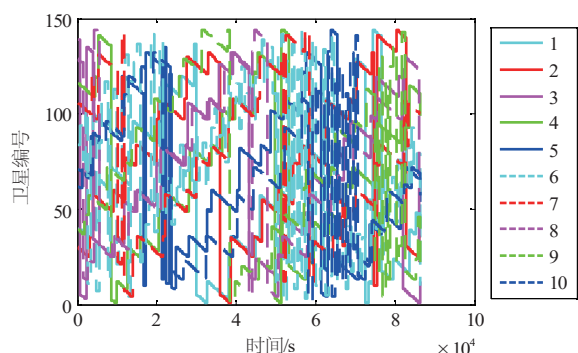


图10 10个地球站在不同时刻连通的卫星编号

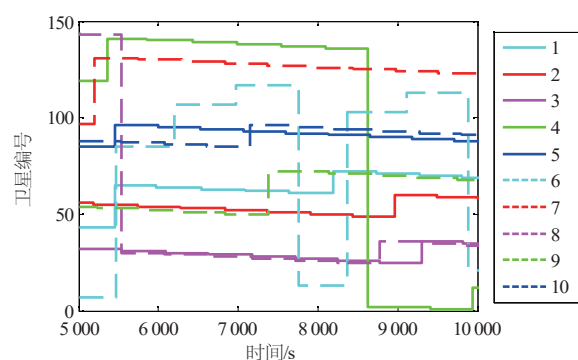


图11 10个地球站在不同时刻连通的卫星编号的局部放大图

图11是图10的局部放大图。可知每个地球站在不同时刻都具有可连通的卫星,可以实现地球站与卫星星座连续连通。

4 结束语

结合一个卫星星座系统连通规划算例,对本文提出的卫星星座与多个地球站的连通策略进行仿真验证。仿真结果表明:连通过程中,卫星相对于地球站的仰角满足连通仰角约束;单段连通的初末时刻,卫星相对于地球站的仰角接近连通仰角约束;地球站相对于卫星的离轴角接近离轴角约束。这从多个角度验证了连通规划方法的正确性。

参考文献:

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1 (1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1 (1): 1-16.
- [2] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.
LIU Y, LIAO C F. The development of overseas emerging satellite internet constellation[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(7): 139-148.

- [3] VATALARO F, CORAZZA G E, CAINI C, et al. Analysis of LEO, MEO, and GEO global mobile satellite systems in the presence of interference and fading[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 13(2): 291-300.
- [4] 梁宗闯, 陶滢, 高梓贺. 天基宽带互联网发展现状与展望[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 14-18.
LIANG Z C, TAO Y, GAO X H. Status and development trend of space broadband internet[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016, 22(4): 14-18.
- [5] LeoSat non-geostationary satellite system attachment a technical annex to supplement schedule S[Z].
- [6] OneWeb non-geostationary satellite system attachment a technical information to supplement schedule S[Z].
- [7] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
LIU L. Orbit Theory of Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [8] VALLADO D A, MCCLAIN W D. Fundamentals of astrodynamics and applications[M]. Microcosm Press, 2007.

[作者简介]



赵书阁 (1987-), 男, 航天科工空间工程发展有限公司高级工程师, 主要研究方向为轨道设计与任务规划、频率兼容性技术。



李小玉 (1984-), 女, 航天科工空间工程发展有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星星座轨道设计。



刘奇 (1994-), 男, 航天科工空间工程发展有限公司博士生, 主要研究方向为轨道设计与构型保持。



武爱景 (1986-), 女, 航天科工空间工程发展有限公司工程师, 主要研究方向为卫星系统综合测控、卫星通信技术。



魏璟 (1986-), 女, 航天科工空间工程发展有限公司工程师, 主要研究方向为卫星频谱管理政策。