(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109861742 B
(45)授权公告日 2021.10.26

(21)申请号 201910155921.8
(22)申请日 2019.03.01
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109861742 A
(43)申请公布日 2019.06.07
(73)专利权人 上海微小卫星工程中心
地址 201203 上海市浦东新区海科路99号4号楼
(72)发明人 姬聪云 吴会英 周美江 吴宅莲 齐金玲
(74)专利代理机构 上海智晟知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 31313
代理人 李镝的
(51)Int.Cl.
H04B 7/185(2006.01)
H04W 16/18(2009.01)
H04W 24/06(2009.01)
H04W 84/06(2009.01)

(56)对比文件
CN 106156417 A,2016.11.23
CN 107329146 A,2017.11.07
CN 106446333 A,2017.02.22
CN 105335541 A,2016.02.17
CN 107451316 A,2017.12.08
CN 107798187 A,2018.03.13
CN 106250616 A,2016.12.21
CN 106599398 A,2017.04.26
WO 2017068201 A1,2017.04.27

审查员 杨玖

权利要求书2页 说明书11页 附图16页

(54)发明名称

一种用于确定星座的构型的方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于确定星座的构型的方法,包括:确定星座的参数;根据所述参数确定星座的可选构型;根据星座的卫星轨道特点确定仿真输入条件并执行仿真;根据仿真结果从所述可选构型中选择构型。通过该方法,可以从星座构型的多种可选方案中选出较优方案,为星座系统的前期方案论证提供参考。



CN 109861742 B

1.一种用于确定星座的构型的方法,包括:

确定星座的参数;

根据所述参数确定星座的可选构型,包括:

确定星座的约束条件;以及

根据所述约束条件选择可选构型,其中所述约束条件包括强约束条件和弱约束条件,其中强约束条件是星座必须满足的约束条件,并且弱约束条件是允许星座具有10%偏差的约束条件;

其中强约束条件包括下列各项中的一个或多个:

轨道平均高度800千米,降交点地方时为10:30的太阳同步轨道;

可通信时间段内地面处于阴影区;

可通信时长大于60秒;

地面站可通信约束:仰角15°;

覆盖目标:-70°～70°,6°网格点仿真;以及

载荷视场约束:卫星飞行方向±70°,垂直于飞行方向±60°;

其中弱约束条件包括下列各项中的一个或多个:

卫星连续覆盖时间区间内,同轨道面相邻卫星对地面的覆盖间隙小于30分钟;以及

卫星连续覆盖时间区间内,临轨道面相邻卫星对地面的最长覆盖间隙小于90分钟;

根据星座的卫星轨道特点确定仿真输入条件并执行仿真;

根据仿真结果从可选构型中选择构型。

2.根据权利要求1所述的方法,其中所述参数包括下列各项中的一个或多个:

覆盖时间,其表示将某一区域目标或点目标集合全部覆盖或N%覆盖所用的时间;

覆盖空间百分比,其表示任一采样时刻被卫星覆盖的区域占整个被分析区域的百分比;

平均覆盖重数,其表示任一采样时刻对某一观测目标或网格点同时可见的卫星数目;

平均可通信时长,其表示某一观测目标或网格点单次可见的平均可通信时长;

覆盖时间百分比,其表示某一观测目标或网格点被一颗或多颗卫星覆盖的时间百分比;

最大覆盖间隙,其表示两次覆盖的最长时间间隙;

平均覆盖间隙,其表示网格点覆盖中断时间的平均长度;

重返时间达标率,其表示网格点在仿真周期内重访时间达到某一门限的百分比;

平均响应时间,其表示网格点距离本次覆盖间隙结束的时间的平均值;

响应时间达标率,其表示网格点在仿真周期内响应时间达到某一门限的百分比;

最大通信时延,其表示自用户终端与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的最长时间长度;

平均通信时延,其表示自用户终端与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的平均时间长度;

通信时延达标率,其表示网格点在仿真周期内通信时延达到某一门限的百分比;以及

时间平均间隙,其表示按时间采样求取覆盖间隙的平均值。

3.根据权利要求1所述的方法,其中星座的可选构型包括具有均匀特性的Walker星座。

4.根据权利要求1所述的方法,其中根据星座的卫星轨道特点确定仿真输入条件并执行仿真包括:

根据星座的回归特性确定回归周期;

根据回归周期确定仿真时间区间;以及

在仿真时间区间内执行仿真。

5.根据权利要求4所述的方法,其中所述仿真时间区间包括一个或多个典型的时间区间。

一种用于确定星座的构型的方法

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及轨道设计领域、更具体而言涉及星座构型对地面的覆盖性能分析领域，更确切而言，涉及一种用于确定星座的构型的方法。

背景技术

[0002] 随着科学技术的飞速发展，卫星这一高级的电子产品已经越来越为广大民众接受。卫星的优点在于能够快速地遍历全球，并满足通信、导航、对地观测等民生需求。随着用户的应用需求不断提升，单颗卫星已经力不从心，从而发展了由多星组成的星座。但是卫星不同于一般的电子产品，其价格昂贵，可靠性要求极高，没有返修的可能性，因此需要在选择卫星的空间布局时就非常谨慎，也就是说，星座的空间构型设计要经过严格的论证，使得既满足用户需求，又能节约研制成本，且能对根据用户的特殊需求进行定制，实现昂贵航天电子产品的高性价比。

[0003] 星座构型设计是轨道设计领域里面研究较长的问题，即针对具体的任务需求，提出一定的性能指标，针对性能指标的需求作星座的构型设计，给出设计结果，满足用户需求。但是，星座设计的结果并非只有唯一解，往往会存在一个庞大的解集，对于卫星轨道设计人员或者说卫星用户来说，在庞大解集里面寻找最适合项目需求的最优解是非常困难的，而且在卫星星座项目论证的前期阶段，往往只需要星座的规模以及较粗略的轨道根数用于评估项目的可行性，无需精确的论证选择。

[0004] 星座优化设计算法的研究并不少见，虽然其结果是严格的数值筛选结果，具有更强的工程参考性，但是需要大量的数学计算，难以在短时间内给出初步星座构型设计结果，且大多数项目在论证的初期阶段需要多次迭代，无需特别精确的星座构型参数，星座优化设计算法难以满足项目初期阶段的高时效性要求。

[0005] 综上，目前需要解决适用于项目论证初期的快速的星座设计方法，以作为卫星平台以及载荷设计的输入，并快速迭代为工程方案，进而通过进一步的优化算法择优。

发明内容

[0006] 本发明的任务是提供一种用于确定星座的构型的方法，通过该方法，可以从星座构型的多种可选方案中选出较优方案，为星座系统的前期方案论证提供参考。

[0007] 根据本发明，该任务通过一种用于确定星座的构型的方法来解决，该方法包括：

[0008] 确定星座的参数；

[0009] 根据所述参数确定星座的可选构型；

[0010] 根据星座的卫星轨道特点确定仿真输入条件并执行仿真；

[0011] 根据仿真结果从所述可选构型中选择构型。

[0012] 在本发明的一个优选方案中规定，所述参数包括下列各项中的一个或多个：

[0013] 覆盖时间，其表示将某一区域目标或点目标集合全部覆盖或N%覆盖所用的时间；

[0014] 覆盖空间百分比，其表示任一采样时刻被卫星覆盖的区域占整个被分析区域的百

分比；

[0015] 平均覆盖重数，其表示任一采样时刻对某一观测目标或网格点同时可见的卫星数目；

[0016] 平均可通信时长，其表示某一观测目标或网格点单次可见的平均可通信时长；

[0017] 覆盖时间百分比，其表示某一观测目标或网格点被一颗或多颗卫星覆盖的时间百分比；

[0018] 最大覆盖间隙，其表示两次覆盖的最长时间间隙；

[0019] 平均覆盖间隙，其表示网格点覆盖中断时间的平均长度；

[0020] 重返时间达标率，其表示网格点在仿真周期内重访时间达到某一门限的百分比；

[0021] 平均响应时间，其表示网格点距离本次覆盖间隙结束的时间的平均值；

[0022] 响应时间达标率，其表示网格点在仿真周期内响应时间达到某一门限的百分比；

[0023] 最大通信时延，其表示自用户终端与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的最长时间长度；

[0024] 平均通信时延，其表示自用户终端与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的平均时间长度；

[0025] 通信时延达标率，其表示网格点在仿真周期内通信时延达到某一门限的百分比；以及

[0026] 时间平均间隙，其表示按时间采样求取覆盖间隙的平均值。

[0027] 通过该优选方案，可以考虑到星座构型的各种参数，由此能够选择最佳的可选构型。

[0028] 在本发明的另一优选方案中规定，该方法还包括：

[0029] 确定星座的约束条件；以及

[0030] 根据所述约束条件选择可选构型。

[0031] 通过添加约束条件，能够考虑到更多实际因数或要求，由此制定更符合实际需要的星座构型。

[0032] 在本发明的又一优选方案中规定，所述约束条件包括强约束条件和弱约束条件，其中强约束条件是星座必须满足的约束条件，并且弱约束条件是允许星座具有10％偏差的约束条件；

[0033] 其中强约束条件包括下列各项中的一个或多个：

[0034] 轨道平均高度800千米，降交点地方时为10:30的太阳同步轨道；

[0035] 可通信时间段内地面处于阴影区；

[0036] 可通信时长大于60秒；

[0037] 地面站可通信约束：仰角15°；

[0038] 覆盖目标：-70°～70°，6°网格点仿真；以及

[0039] 载荷视场约束：卫星飞行方向±70°，垂直于飞行方向±60°；

[0040] 其中弱约束条件包括下列各项中的一个或多个：

[0041] 卫星连续覆盖时间区间内，同轨道面相邻卫星对地面的覆盖间隙小于30分钟；以及

[0042] 卫星连续覆盖时间区间内，临轨道面相邻卫星对地面的最长覆盖间隙小于90分

钟。

[0043] 通过该优选方案,可以将多种约束条件考虑到构型选择中,由此实现更好的构型选择。在此应当指出,在本发明的教导下,其它约束条件也是可设想的。

[0044] 在本发明的一个扩展方案中规定,星座的可选构型包括具有均匀特性的Walker星座。通过该扩展方案,可以实现尽量均匀的全球覆盖。

[0045] 在本发明的一个优选方案中规定,根据星座的卫星轨道特点确定仿真输入条件并执行仿真包括:

[0046] 根据星座的回归特性确定回归周期;

[0047] 根据回归周期确定仿真时间区间;以及

[0048] 在仿真时间区间内执行仿真。

[0049] 通过该优选方案,可以实现切合实际的仿真过程,由此得到更加贴近实际情况的仿真结果。

[0050] 在本发明的另一优选方案中规定,所述仿真时间区间包括一个或多个典型的时间区间。通过该优选方案,可以大大减少仿真的计算量。例如,如果严格按照遍历所有的地面站、卫星、太阳的相对位置关系,则需要仿真的时间区间为回归周期与365.25天的最小公倍数,即58×365.25=21184.5天,计算量是相当巨大的,这里选择典型的时间区间进行仿真,对于工程应用来说已经可以作为项目抉择的依据。

附图说明

[0051] 下面结合附图参考具体实施例来进一步阐述本发明。

[0052] 图1示出了根据本发明的用于确定星座的构型的方法的流程;

[0053] 图2示出了单星地面覆盖的示意图;以及

[0054] 图3至图4示出了降交点地方时相差3小时的3面12星星下点示意图;

[0055] 图5示出了9月8日卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影);

[0056] 图6示出了12月21日卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影);

[0057] 图7示出了4月8日卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影);

[0058] 图8示出了平均覆盖间隙:秋分前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30;

[0059] 图9示出了平均覆盖间隙:秋分前后29天-2轨道面与3轨道面;

[0060] 图10示出了秋分前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影);

[0061] 图11示出了平均覆盖间隙:冬至前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30;

[0062] 图12示出了平均覆盖间隙:冬至前后29天-2轨道面与3轨道面;

[0063] 图13示出了冬至前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影);

[0064] 图14示出了平均覆盖间隙:夏至前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30;

[0065] 图15示出了平均覆盖间隙:夏至前后29天-2轨道面与3轨道面;以及

[0066] 图16示出了夏至前后29天,降交点地方时9:00、10:30、16:30卫星与太阳地球的相对关系(地表深颜色为地面阴影)。

具体实施方式

[0067] 应当指出，各附图中的各组件可能为了图解说明而被夸大地示出，而不一定是比例正确的。在各附图中，给相同或功能相同的组件配备了相同的附图标记。

[0068] 在本发明中，除非特别指出，“布置在…上”、“布置在…上方”以及“布置在…之上”并未排除二者之间存在中间物的情况。

[0069] 在本发明中，各实施例仅仅旨在说明本发明的方案，而不应被理解为限制性的。

[0070] 在本发明中，除非特别指出，量词“一个”、“一”并未排除多个元素的场景。

[0071] 在此还应当指出，在本发明的实施例中，为清楚、简单起见，可能示出了仅仅一部分部件或组件，但是本领域的普通技术人员能够理解，在本发明的教导下，可根据具体场景需要添加所需的部件或组件。

[0072] 在此还应当指出，在本发明的范围内，“相同”、“相等”、“等于”等措辞并不意味着二者数值绝对相等，而是允许一定的合理误差，也就是说，所述措辞也涵盖了“基本上相同”、“基本上相等”、“基本上等于”。

[0073] 另外，本发明的各方法的步骤的编号并未限定所述方法步骤的执行顺序。除非特别指出，各方法步骤可以以不同顺序执行。

[0074] 图1示出了根据本发明的用于确定星座的构型的方法100的流程，其中虚线框表示可选步骤。

[0075] 在步骤102，确定星座的参数。

[0076] 在可选步骤104，确定星座的约束条件。

[0077] 在步骤106，根据所述参数以及可选的约束条件确定星座的可选构型。

[0078] 在可选步骤108，根据星座的回归特性确定回归周期。

[0079] 在可选步骤110，根据回归周期确定仿真时间区间。

[0080] 在步骤112，执行仿真。

[0081] 在步骤114，根据仿真结果从可选构型中选择构型。

[0082] 下面根据具体应用实例来阐述本发明。

[0083] 本发明所基于的思想是：基于项目论证初期的星座构型设计需求，给出理论分析，根据理论分析结果给出初步的星座构型设计方案，根据卫星轨道特点以及任务需求确定仿真输入条件并进行仿真，根据仿真结果给出星座构型选择的依据。

[0084] 为了阐述上述发明，本应用实例采用如下的技术方案：

[0085] 首先，给出典型星座性能指标的具体定义，并初步分析应用领域。

[0086] 其次，根据给出的特定任务，分析任务需求，确定星座构型的初步规模，给出可选星座。

[0087] 最后，根据星座中卫星轨道特点确定仿真输入条件并仿真计算，给出仿真结果，并根据结果判断星座优劣以及对任务需求的满足度，选择星座构型。

[0088] 进一步的，本技术方案的具体实现步骤介绍如下：

[0089] 步骤1，给出典型星座性能指标的具体定义，并初步分析应用领域。

[0090] 覆盖时间T

[0091] 覆盖时间即将某一区域目标或点目标集合全部覆盖或N%覆盖所用的时间，仅对区域目标或点目标集合有效。

[0092] 此指标为覆盖性指标，适用于对地观测、通信、导航、气象卫星星座设计。

[0093] 覆盖空间百分比PecS

[0094] 覆盖空间百分比即任一采样时刻被卫星覆盖的区域占整个被分析区域的百分比，在做星座设计时，应该取所有采样时刻的平均值PecS_A，仅对区域目标或点目标集合有效。

[0095] 此指标为覆盖性指标，适用于对地观测、通信、导航、气象卫星星座设计。

[0096] 平均覆盖重数N_A

[0097] 覆盖重数即任一采样时刻对某一观测目标或网格点同时可见的卫星数目，在做星座设计时，应取所有采样时刻的平均值N_A，若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值N_AA。

[0098] 此指标为覆盖性指标，适用于对地观测、通信、导航、气象卫星星座设计。

[0099] 平均可通信时长Du_A

[0100] 平均可通信时长Du_A即某一观测目标或网格点单次可见的平均可通信时长，若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值Du_AA。

[0101] 此指标为覆盖性指标，也是计算时延的通信指标，适用于对地观测、通信、导航、气象卫星星座设计。

[0102] 覆盖时间百分比PecT

[0103] 某一观测目标或网格点被一颗或多颗卫星覆盖的时间百分比，即被一颗或多颗卫星覆盖的次数(次数以一个采样时刻为一次)除以仿真时间内采样时刻的总个数，若对于区域目标或点目标集合，则需要统计所有网格点的平均值PecT_A。

[0104] 此指标为覆盖性指标，适用于对地观测、通信、导航、气象卫星星座设计。

[0105] 最大覆盖间隙RevTMax

[0106] 覆盖间隙即两次覆盖的时间间隙，也称重访时间，最大覆盖间隙RevTMax(Maximum Coverage Gap)即网格点的最长覆盖间隙，简称最大间隙，等于最长响应时间(Maximum Response Time)。若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值RevTMax_A。

[0107] 这个覆盖性能指标只能给出星座对地面覆盖的最恶劣情况，对星座的整体覆盖性能的评估并非好的指标。

[0108] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0109] 平均覆盖间隙RevT_A

[0110] 平均覆盖间隙RevT_A(Mean Coverage Gap)简称平均间隙，即网格点覆盖中断时间的平均长度，即总的间隙长度除以间隙个数。若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值RevT_AA。

[0111] 其表达式为

[0112] $$\text{平均覆盖间隙} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \text{覆盖间隙}_i}{N} \qquad (1)$$

[0113] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0114] 重访时间达标率PecRev

[0115] 重访时间达标率PecRev即网格点在仿真周期内重访时间达到某一门限的百分比。若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值PecRev_A。

[0116] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0117] 平均响应时间MRT

[0118] 响应时间为网格点距离本次覆盖间隙结束(即下次覆盖开始)的时间，平均响应时间MRT(Mean Response Time)即对此网格点的响应时间的平均值。若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值MRT_A。

[0119] 当采样点足够多时，有平均响应时间与时间平均间隙的关系为

[0120] $$\text{平均响应时间}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\text{响应时间}}{N}\xrightarrow{N\to\infty}\frac{\text{时间平均间隙}}{2} \qquad (2)$$

[0121] 由于统计时采样时刻点一般会较多，考虑到上述关系，因此后续做星座覆盖性能指标统计公式时不再考虑“时间平均间隙”指标。

[0122] 这一覆盖性能指标既考虑了覆盖的统计特性，又考虑了间隙的统计特性，因此很全面的反映了整个系统的性能，是评价响应性最好的覆盖性能指标。此覆盖性能指标对处理通信时延(包括数据的请求和接收时延)非常方便，可以将通信时延直接加到覆盖响应时间中，得到总的响应时间，它表示自用户请求数据到用户接收到该数据的总时间。

[0123] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0124] 响应时间达标率PecRT

[0125] 响应时间达标率PecRT即网格点在仿真周期内响应时间达到某一门限的百分比。若对于区域目标或点目标集合，则计算所有网格点的平均值PecRT_A。

[0126] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0127] 最大通信时延SYMax

[0128] 最大通信时延SYMax即自用户终端(或网格点，不构成网络)与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的最长时间长度。若对于区域终端，则计算所有终端或网格点的平均值SYMax_A。

[0129] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0130] 平均通信时延SY_A

[0131] 平均通信时延SY_A即自用户终端(或网格点，不构成网络)与星座可通信时刻到下次星座与地面通信网络系统可通信时刻的平均时间长度。若对于区域终端，则计算所有终端或网格点的平均值SY_AA。

[0132] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0133] 通信时延达标率PecSY

[0134] 通信时延达标率PecSY即网格点在仿真周期内通信时延达到某一门限的百分比。若对于区域终端，则计算所有终端或网格点的平均值PecSY_A。

[0135] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0136] 时间平均间隙TAG

[0137] 时间平均间隙(Time Average Gap)即按时间采样求取覆盖间隙的平均值，其表达式为

[0138] $$\text{时间平均间隙}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\text{覆盖间隙}_i^2}{\text{总时间}}$$

[0139] 此指标为计算时延的通信指标，适用于通信卫星星座设计。

[0140] 步骤2，根据给出的特定任务，分析任务需求，确定星座构型的初步规模，给出可选星座。

[0141] 卫星星座的应用近年来日趋多样化，但基于卫星本身相对地球的运动特点，星座的应用主要集中于以下几个方面：

[0142] (1)通信

[0143] 通信卫星的应用主要还是地面用户，当今时代是一个电子时代，人和人之间的联系有60％以上都是通过电子通信渠道，地面的通信网络有其难以克服的缺点需要卫星来弥补。地球上人烟稀少的深山，大洋中央的孤岛，用于科学实验的特殊场地等都需要卫星的覆盖进行通信。

[0144] 通信卫星的覆盖与星上载荷的特性有关，例如量子通信载荷需要地面处于地影且天气晴朗少云才能确保通信的误码率不会超过设计门限，满足正常通信的需求。

[0145] (2)导航

[0146] 与“通信”的需求类似，要求星座的设计尽量保证全球的均匀覆盖，但不同的是基于地面定位需求，要求同一时刻地面覆盖的卫星个数尽量多，且几何分布较好。

[0147] 导航卫星的规模一般较大，涉及到经费与其产生的效能的关系，因此在项目论证初期就应该快速抉择星座规模，并做进一步的深化论证分析，本专利仅分析项目论证初期星座的设计方法，作为工程经费的估算以及初步卫星方案的确定。

[0148] (3)遥感

[0149] 遥感卫星与“通信”、“导航”卫星最大的不同在于其需要对地成像，这就与星上的载荷类型有很大的关系，最常见的光学载荷要求卫星每次过目标时太阳高度角有一定的约束，这样才能有好的成像效果，同时基于光学成像的光照需求，对地遥感卫星往往有回归要求，以满足光照情况类似，用于便携的提取目标图像并做拼接或比对。

[0150] 遥感卫星应用较广，需要根据其载荷特点决定其设计约束，选择合理轨道并设计卫星星座。

[0151] (4)电子侦察

[0152] 电子侦察卫星多用于军事，由于重点目标确定的原因，无需全球覆盖，有明显的区域性，且由于星上具体载荷不同会导致星座构型设计有本质的差别。例如SAR载荷由于发射功率的问题，轨道高度的约束会比较强烈，且电子侦察卫星的星座有相对较严格的基线，需要考虑轨道控制的频度、精度以及燃料需求。

[0153] 电子侦察卫星星座较特殊，需要根据具体的载荷约束设计轨道以及星座构型。

[0154] 步骤3，根据星座中卫星轨道特点确定仿真输入条件并仿真计算，给出仿真结果，并根据结果判断星座优劣以及对任务需求的满足度，选择星座构型。

[0155] 步骤2中介绍了几种典型应用的卫星星座，在用户明确卫星应用领域后，即可根据具体需求设计卫星星座构型。首先，根据初步的理论分析确定星座中卫星的具体分布，确定满足需求的最小规模星座；其次，根据选择出来的最小规模星座以及任务约束确定仿真输入条件，进行仿真验证理论分析的正确性，并通过理论分析解释仿真计算结果的特点，达到理论和实际相结合的目的；最后，根据仿真结果选择较优的星座用于工程初步方案的输入。

[0156] 星座设计约束

[0157] 本专利针对我国已经发射的量子通信卫星(墨子号)的后续应用需求,开展低轨卫星星座设计。具体的约束条件有:

[0158] (一)强约束

[0159] 此类约束是设计前必须考虑的,即在如下的前提条件下进行设计。

[0160] (1)卫星约束:轨道平均高度800km(对应半长轴7178.137km),降交点地方时为10:30的太阳同步轨道

[0161] (2)可通信时间段内地面处于阴影区

[0162] (3)可通信时长:大于60s

[0163] (4)地面站可通信约束:仰角15°

[0164] (5)覆盖目标:-70°～70°,6°网格点仿真

[0165] (6)载荷视场约束:Rectangular,Vertical:60°Horizontal:70°,即卫星飞行方向±70°,垂直于飞行方向±60°

[0166] (二)弱约束

[0167] 此类约束是设计时兼顾考虑的因素,但是由于设计时只是粗略估算,设计结果可能会有一定的偏差,最多允许10%不满足指标。

[0168] (1)卫星连续覆盖时间区间内,同轨道面相邻卫星对地面的覆盖间隙小于30min;

[0169] (2)卫星连续覆盖时间区间内,临轨道面相邻卫星对地面的最长覆盖间隙小于90min。

[0170] 确定两类星座

[0171] 此星座要求全球尽量均匀覆盖,因此选择具备均匀特性的Walker星座。

[0172] (1)Walker星座的基本概念

[0173] 星座参考码为T/P/F,其中T为星座中卫星总个数,P为轨道面数,F是用来确定相邻轨道面卫星相对相位的因子(F=0,1,2,3,…,P-1),相邻轨道面卫星的相位相差为F个星座基本单位PU(Pattern Unit),PU=360°/T。

[0174] (2)相同轨道面内卫星个数

[0175] 卫星在天上运行连续两次通过交点的时间间隔称为交点周期,平均交点周期的表达式如公式(3)所示。

[0176] $$T_N = 2\pi\left(\frac{a^3}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}\left[1-\frac{3J_2R_e^{\ 2}}{2a^2\left(1-e^2\right)^2}\left(3-4\sin^2 i\right)\right] \quad (3)$$

[0177] 公式(3)中的相关符号解释如下:

[0178] 1)a为卫星轨道平半长轴;

[0179] 2)μ=398600.4418×$10^9$$m^3/s^2$为地球引力常数;

[0180] 3)J_2=1.08263×10^{-3},为地球引力场二阶带谐项系数;

[0181] 4)R_e=6378137m,地球赤道平均半径;

[0182] 5)e为卫星轨道平偏心率;

[0183] 6)i为卫星轨道平倾角。

[0184] 经计算,800km平均轨道高度的太阳同步卫星的平均交点周期为101min,考虑“卫星连续覆盖时间区间内,覆盖间隙小于30min”的弱约束条件,一个轨道面内布4颗卫星可满

足此条件。

[0185] (3)不同轨道面的间隔

[0186] 以地球赤道平均半径R_e=6378.137km估算,单星地面覆盖性示意如图2所示。

[0187] 图2中,A为地面上覆盖边界点,卫星与地心的连线与地球椭球体的交点G称为卫星的星下点;卫星与地球的切线称为卫星的几何地平,P称为水平点。

[0188] 根据简单的三角函数正弦关系,有

[0189] $$\frac{R_e+h}{\sin(90°+\theta)}=\frac{R_e}{\sin\alpha}=\frac{R_{max}}{\sin(90°-\alpha-\theta)} \quad (4)$$

[0190] 即

[0191] $$\frac{R_e+h}{\cos\theta}=\frac{R_e}{\sin\alpha}=\frac{R_{max}}{\cos(\alpha+\theta)} \quad (5)$$

[0192] 根据上式可以解算出卫星覆盖地面的角度(90°-α-θ),对于800km平均轨道高度的卫星,根据15°仰角约束,计算出90°-α-θ为15.88°,对应对地覆盖半波束角α为59.12°。对于太阳同步轨道卫星,地球相对卫星的运动速度为360°/24hour=1°/4min,因此,同一卫星的星下点轨迹在赤道上的经度差为101/4=25.25°。同一轨道面上的相邻卫星的下点轨迹在赤道上的经度差为101/4/4=6.31°,考虑设计弱约束“卫星连续覆盖时间区间内,临轨道面相邻卫星对地面的最短覆盖间隙小于90min”,初步设计相邻轨道面之间的间隔为45°,相当于降交点地方时相差3小时。可参见图3、图4。

[0193] (4)确定星座类型

[0194] 1)第一类星座-星座1

[0195] 3个轨道面,每个轨道面4颗卫星,轨道面间隔45度(即降交点地方时间隔3小时),最左边的轨道面(种子卫星轨道面)降交点地方时为9:00。

[0196] 按照Walker星座的设计原则,降交点地方时9:00(种子星,135度均分,135/3=45)、12:00、15:00;T=12、P=3、F=2。

[0197] 2)第二类星座-星座2

[0198] 与星座1唯一的不同在于最左边的轨道面(种子卫星轨道面)降交点地方时为10:30。

[0199] 考虑到星座中卫星的发射不可能同时,首批星选择易于选择搭载机会的降交点地方时为10:30的轨道,另外两个轨道面的降交点地方时依次平移3小时。

[0200] 仿真输入要求

[0201] 此轨道为太阳同步回归轨道,载荷工作时间为地面处于阴影区的时间段,因此需要全面考虑卫星和太阳以及地面的相对位置关系,选择一年中的夏至前后、秋分前后、冬至前后3个典型回归周期时间区间作为仿真时间段。

[0202] 根据回归轨道定义,计算出800km太阳同步轨道的回归周期为58天,选择夏天5月23日～7月20日、秋天8月23日～10月20日、冬天11月23日～次年1月20日作为仿真时间区间。

[0203] 另外,考虑地球绕太阳的公转周期为一年,也就是说光照情况与地球卫星的关系的长周期为一年,还可以将一年作为仿真时间进行分析。

[0204] 需要说明的是:如果严格按照遍历所有的地面站、卫星、太阳的相对位置关系,则

需要仿真的时间区间为回归周期与365.25天的最小公倍数，即58×365.25＝21184.5天，计算量是相当巨大的，这里选择典型的时间区间进行仿真，对于工程应用来说已经可以作为项目抉择的依据。

[0205] 具体仿真结果

[0206] 由于通信卫星的最重要指标为覆盖间隙(也称重访时间)，此指标决定了卫星能够多久重新访问同一地点，因此，本专利的具体实施例以平均覆盖间隙作为统计分析指标，并选取典型地点1(经度纬度都为0的赤道上的点)以及典型地点2(北京)分析3个时间段以及1年内连续覆盖时间区间内的最长覆盖间隙统计，以验证弱约束的第二条“卫星连续覆盖时间区间内，临轨道面相邻卫星对地面的最长覆盖间隙小于90min”满足。具体结果参见表1。

[0207] 表1连续覆盖时间区间内的最长覆盖间隙统计(分钟)

[0208]

时间段	典型地点	地点 1 (0, 0)	北京 (40.12° N, 116.23°E)	备注
0523~0720 (夏至前后)	星座 1	80	32	
	星座 2	80	31	
0823~1020 (秋分前后)	星座 1	80	32	
	星座 2	80	32	北京 132~155，占比 3.6%
1123~次年 0120 (冬至前后)	星座 1	80	32	北京 132~155，占比 3.7%
	星座 2	80	54	北京 132~155，占比 4.5%
0523~次年 0523 (1 年)	星座 1	80	32	北京 132~155，占比 0.8%
	星座 2	80	54	北京 132~155，占比 2.8%

[0209] 关于表1，可见：

[0210] (1)对于赤道上的地点1，星座1与星座2无差别；

[0211] (2)对于北半球中纬度地点北京，星座1在11月12日～次年1月13日、星座2在9月8日～次年4月10日的时间段内都有132min～155min的超标结果，但百分比并未超过10％，原因是：降交点地方时为15:00的卫星轨道以及16:30的卫星轨道在上述时间区间，每天都有1次短暂的降轨通信机会(示意图详见5、图6、图7)，由于设计星座时仅仅考虑了升轨通信，对于降轨靠近昏线(地面由白昼到黑夜的分界线)的下午轨道，基于季节原因的降轨通信并不在设计考虑的范围内，可以不做统计；

[0212] (3)对于出现的少量54min的覆盖间隙，原因是地面仰角太低，失去了和某一颗星的可通信机会，等待与同轨道面内的相邻卫星通信。

[0213] 另外，对于-70°～70°的地球表面，以6°一个点划分地面区域，作为分析覆盖的目标区域，仿真计算两类星座的3个时间段的平均覆盖间隙，具体的结果参见图8、图9、图11、图12、图14、图15，得到结论如下：

[0214] (1)在太阳处于赤道附近的秋分前后，降交点地方时9:00、10:30轨道的平均覆盖间隙基本相同，但与16:30的平均覆盖间隙差别较大，原因在于16:30轨道降轨距离昏线较近(可参见图8和图10)，增加了部分降轨可通信时间，但对两类星座的平均覆盖间隙影响并

不明显，可参见9。

[0215] (2)在太阳处于南半球的冬至前后，与秋分的情况类似，但差异化更加明显，尤其体现在16:30轨道南北半球覆盖的差异性上，可参见图11、图12与示意图图13。

[0216] (3)在太阳处于北半球的夏至前后，降交点地方时9:00、10:30、16:30轨道的平均覆盖间隙在南半球差异不大，但在北半球，降轨距离晨线(地面由黑夜到白昼的分界线)较近的9:00轨道与降轨距离昏线较近的16:30轨道的平均覆盖间隙在北半球较大，原因在于夏天北极附近处于阳照，减少了可通信时间，但对两类星座的平均覆盖间隙影响并不明显，可参见图14、图15以及示意图图16。

[0217] 综上，对于全球均匀覆盖的需求，选择更具有晨昏线对称性的星座1；若需求倾向于北半球的覆盖，可以考虑非晨昏线对称的星座2。此判断准则可作为工程项目论证的依据。

[0218] 虽然本发明的一些实施方式已经在本申请文件中予以了描述，但是本领域技术人员能够理解，这些实施方式仅仅是作为示例示出的。本领域技术人员在本发明的教导下可以想到众多的变型方案、替代方案和改进方案而不超出本发明的范围。所附权利要求书旨在限定本发明的范围，并藉此涵盖这些权利要求本身及其等同变换的范围内的方法和结构。


100
开始
102 确定星座的参数
104 确定星座的约束条件
106 确定星座的可选构型
108 根据星座的回归特性确定回归周期
110 根据回归周期确定仿真时间区间
112 执行仿真
114 根据仿真结果从所述可选构型中选择构型
结束

图1

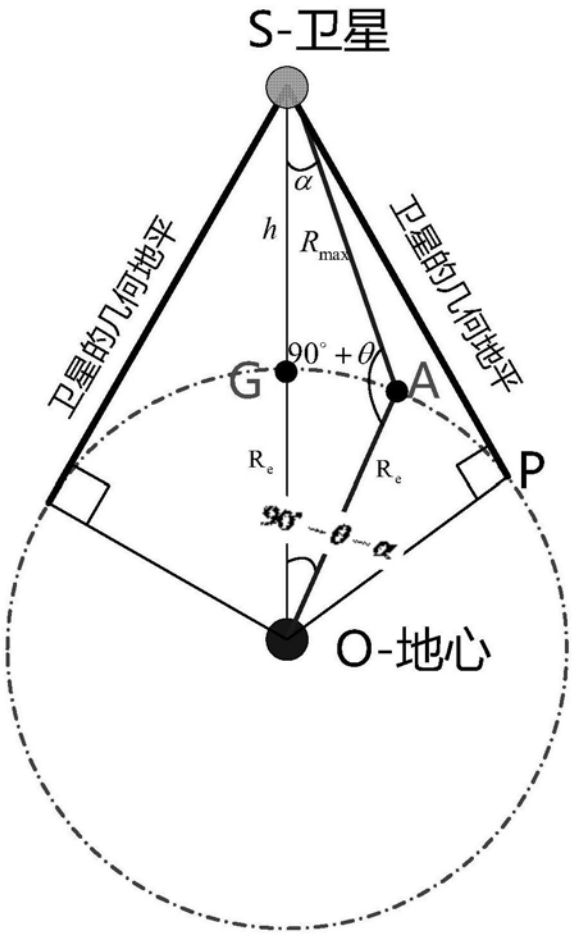

S-卫星
α
h
R_{max}
卫星的几何地平
卫星的几何地平
$90^\circ+\theta$
G
A
P
R_e
R_e
$90^\circ-\theta-\alpha$
O-地心

图2

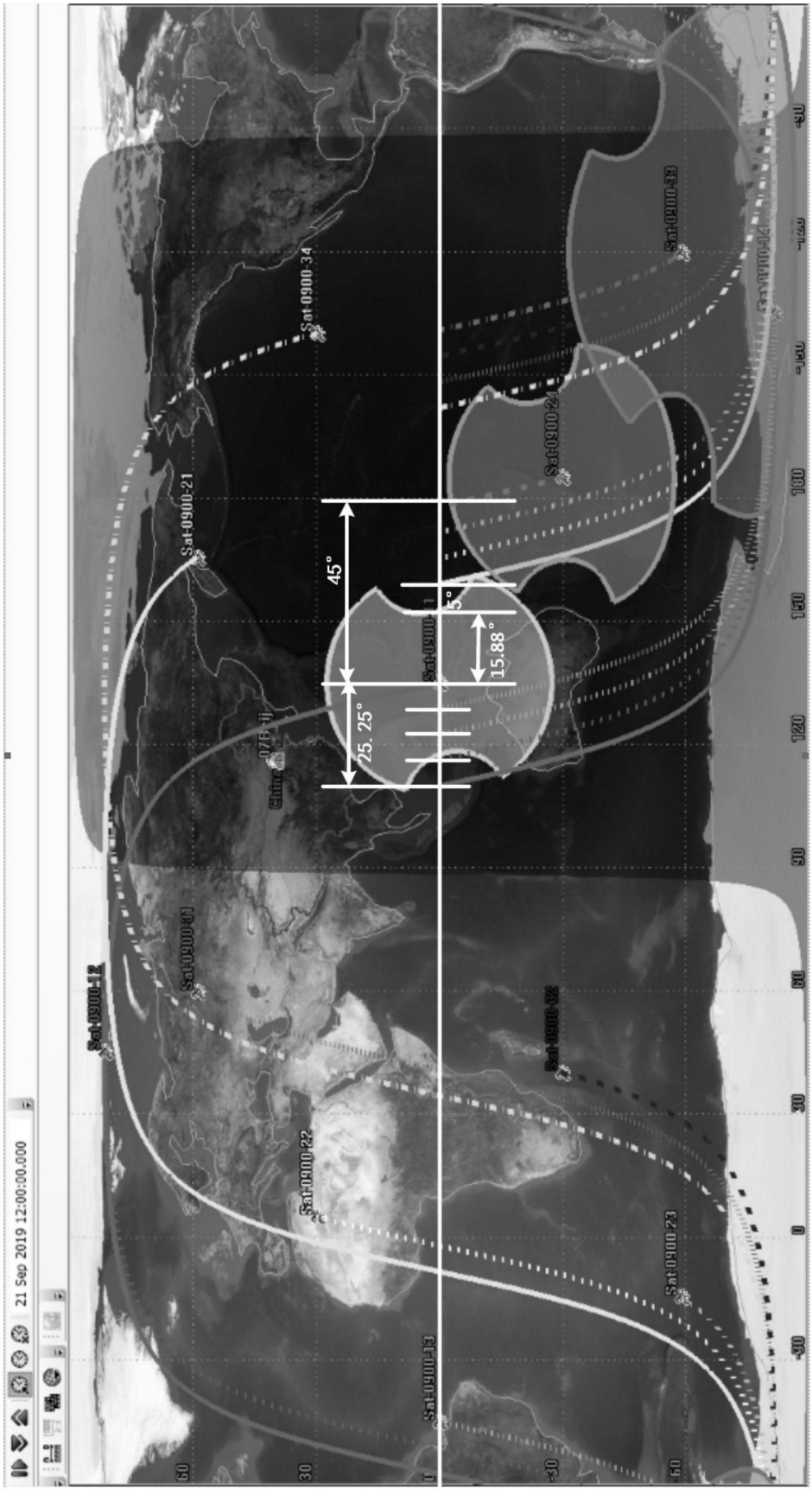

45°
5°
15.88°
25. 25°
Sat-0900-12
Sat-0900-67
Sat-0900-22
Sat-0900-34
Sat-0900-21
Sat-0900-23
21 Sep 2019 12:00:00.000

图3

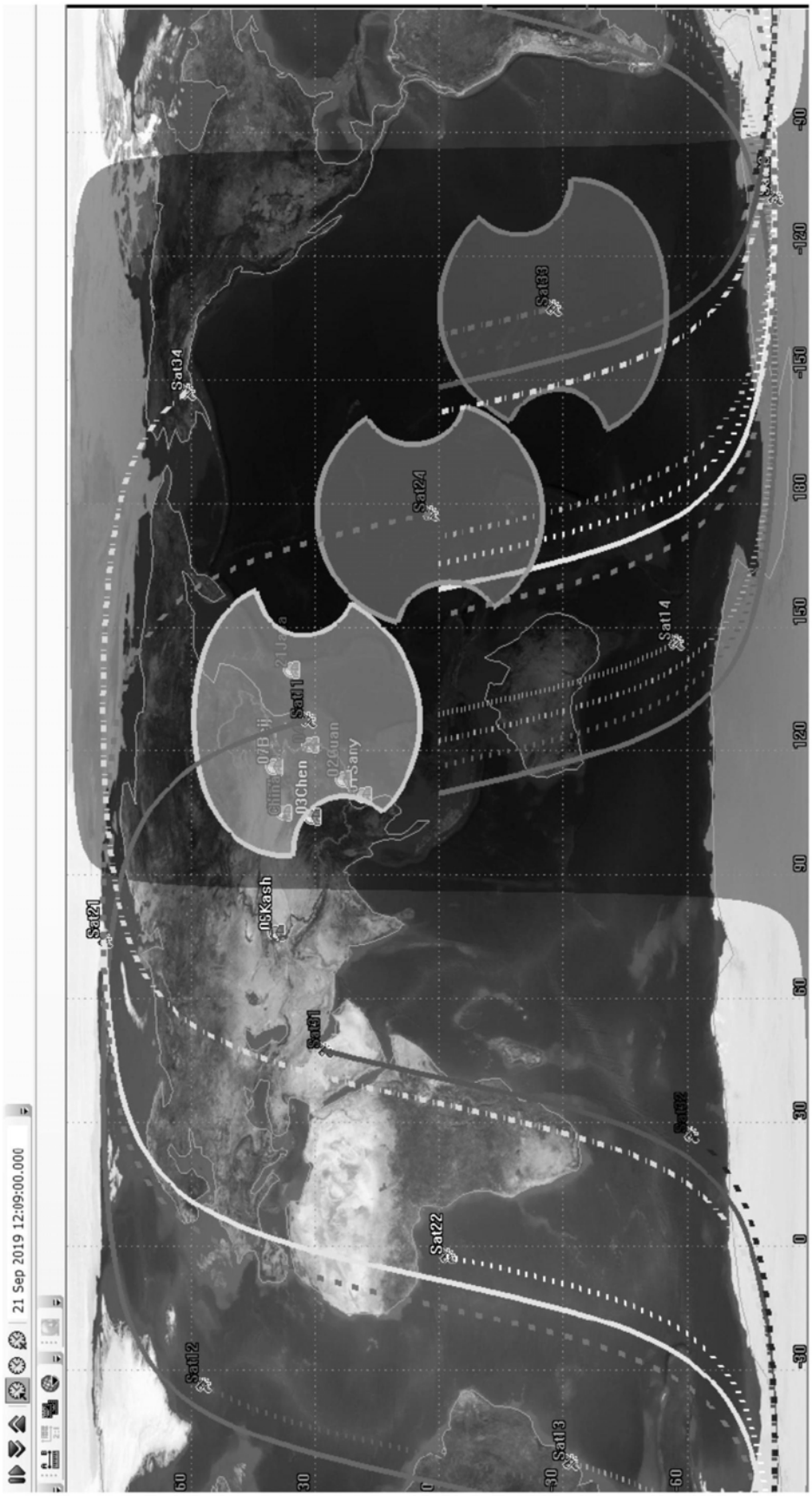

21 Sep 2019 12:09:00.000
Sat21
Sat34
Sat33
Sat24
Sat14
Sat11
Sat31
Sat22
Sat12
Sat13
06Kash
03Chen
02Guan
Sany
-90
-120
-150
180
150
120
90
60
30
0
-30
-60
60
30
0
-30
-60

图4

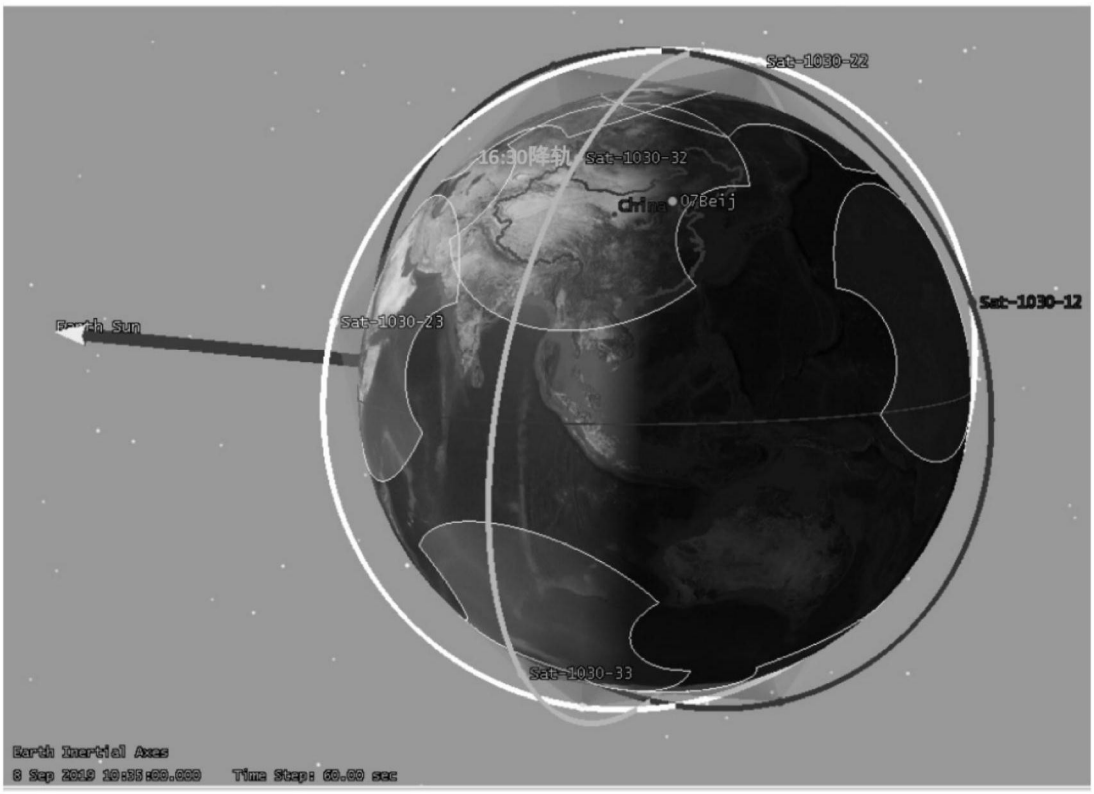

Sat-1030-22
16:30降轨
Sat-1030-32
Beijing
Sat-1030-12
Earth_Sun
Sat-1030-23
Sat-1030-33
Earth Inertial Axes
8 Sep 2019 10:35:09.000
Time Step: 60.00 sec

图5

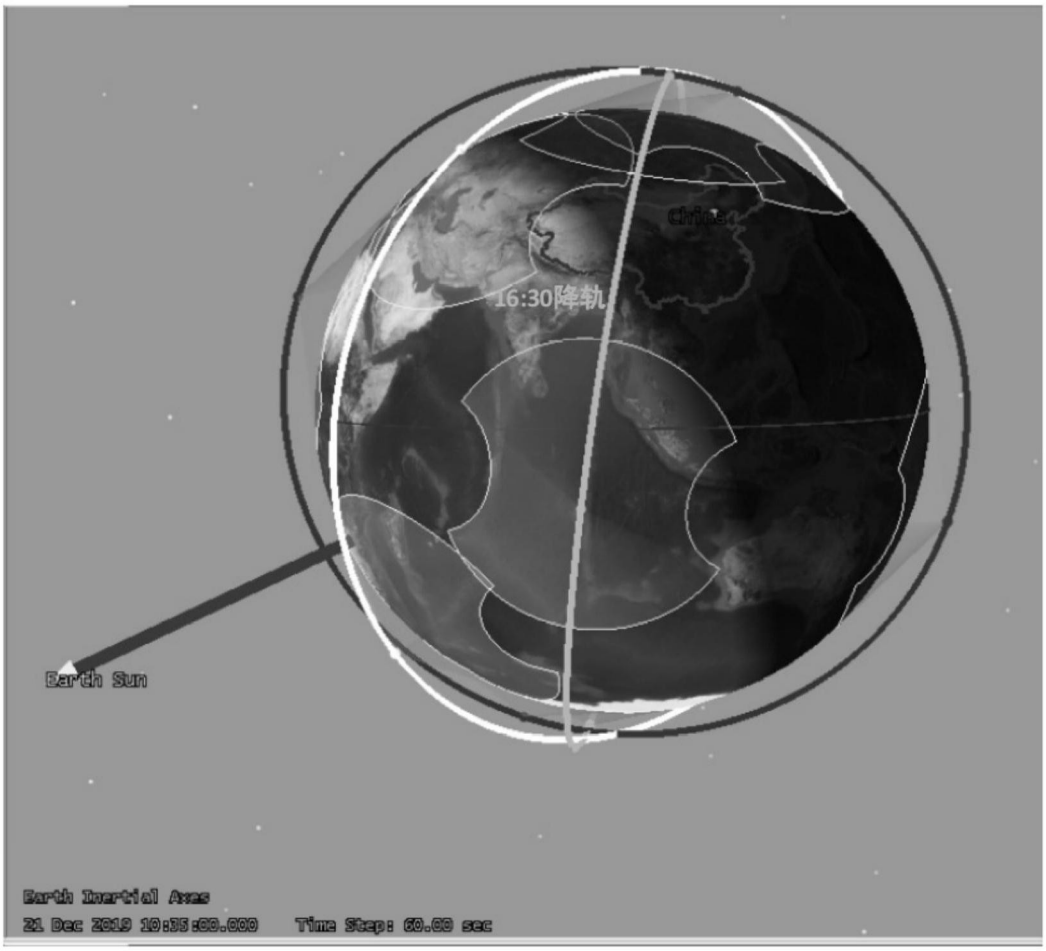

16:30降轨
Earth Sun
Earth Inertial Axes
21 Dec 2019 10:35:00.000 Time Step: 60.00 sec

图6

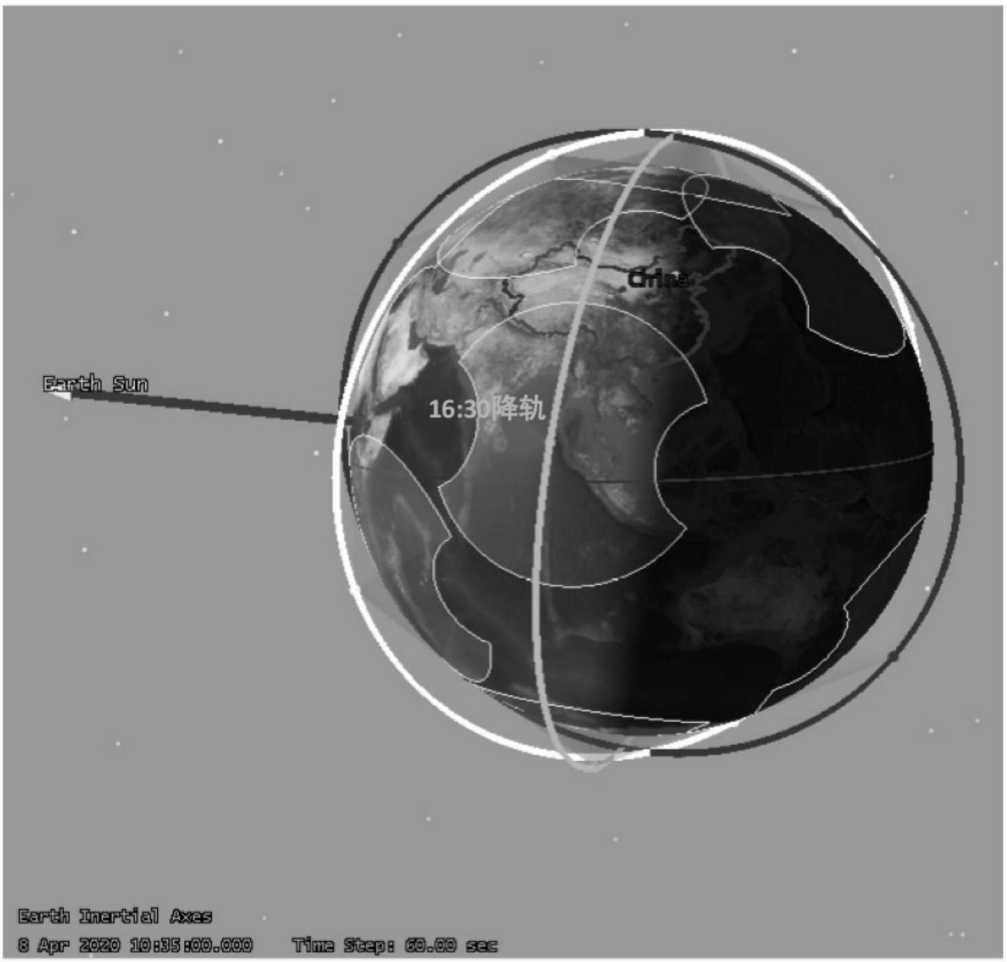

China
Earth Sun
16:30降轨
Earth Inertial Axes
8 Apr 2020 10:35:00.000
Time Step: 60.00 sec

图7

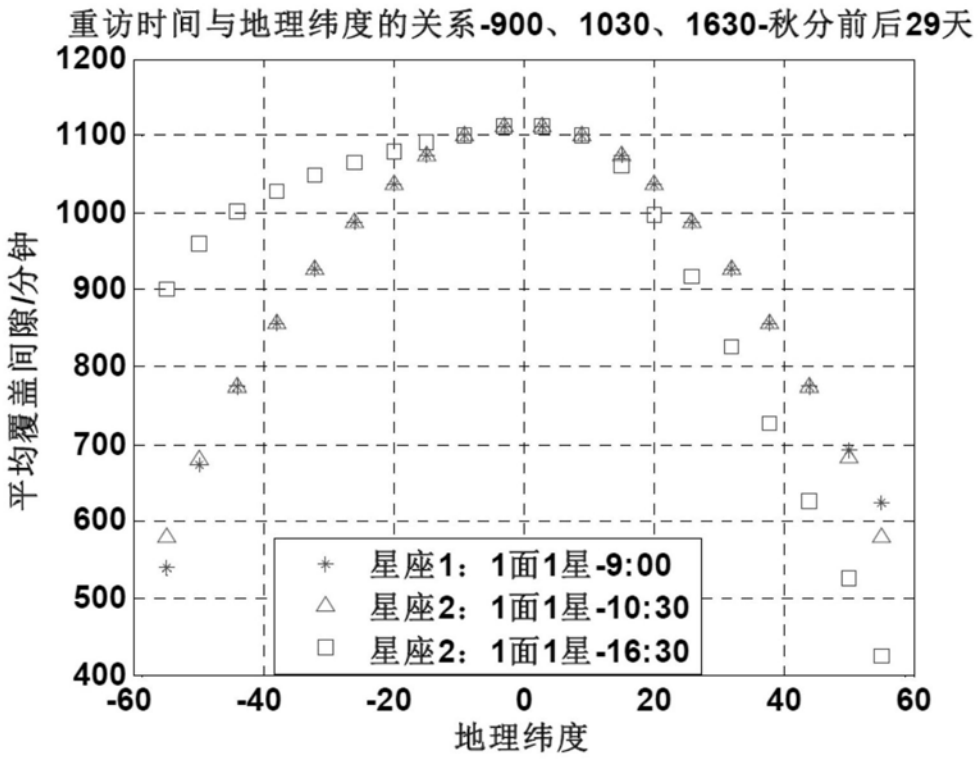

重访时间与地理纬度的关系-900、1030、1630-秋分前后29天
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
-60
-40
-20
0
20
40
60
星座1：1面1星-9:00
星座2：1面1星-10:30
星座2：1面1星-16:30

图8

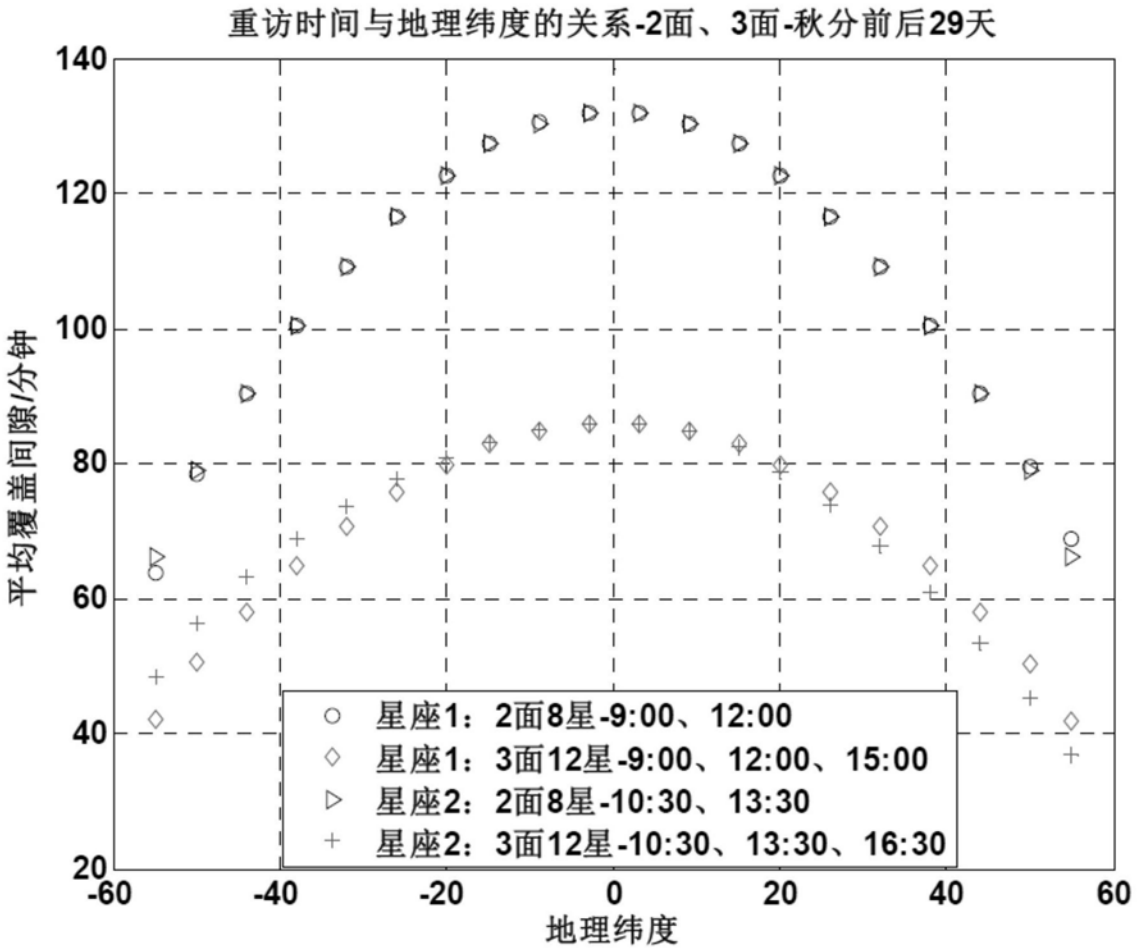

重访时间与地理纬度的关系-2面、3面-秋分前后29天
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
140
120
100
80
60
40
20
-60
-40
-20
0
20
40
60
星座1：2面8星-9:00、12:00
星座1：3面12星-9:00、12:00、15:00
星座2：2面8星-10:30、13:30
星座2：3面12星-10:30、13:30、16:30

图9

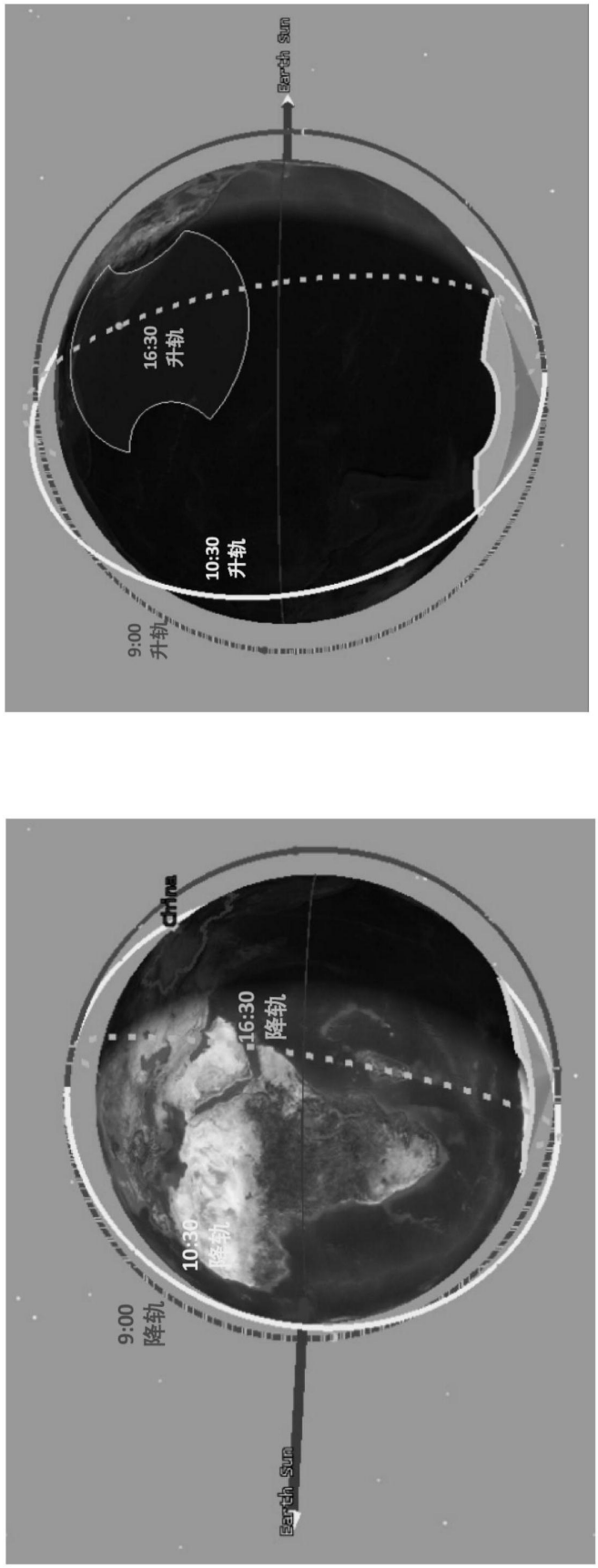

Earth Sun
16:30
升轨
10:30
升轨
9:00
升轨
China
16:30
降轨
10:30
降轨
9:00
降轨
Earth Sun

图10

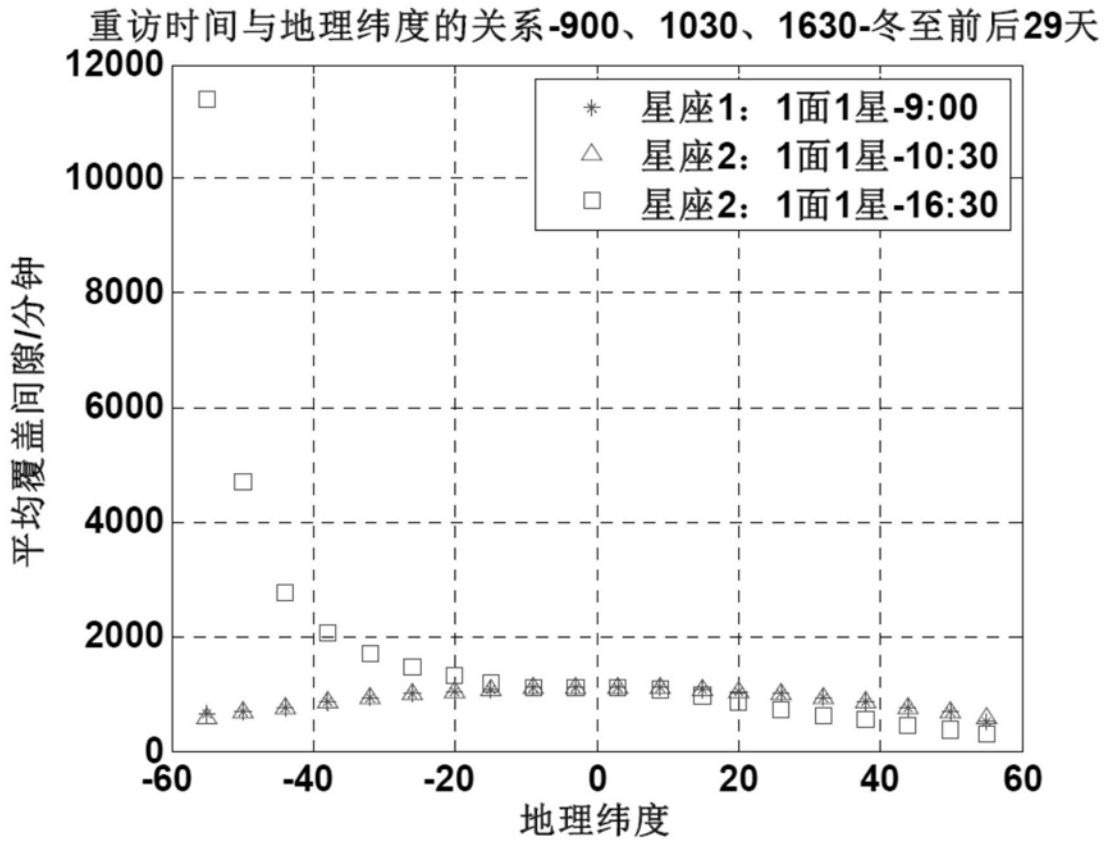

重访时间与地理纬度的关系-900、1030、1630-冬至前后29天
星座1：1面1星-9:00
星座2：1面1星-10:30
星座2：1面1星-16:30
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
-60
-40
-20
0
20
40
60

图11

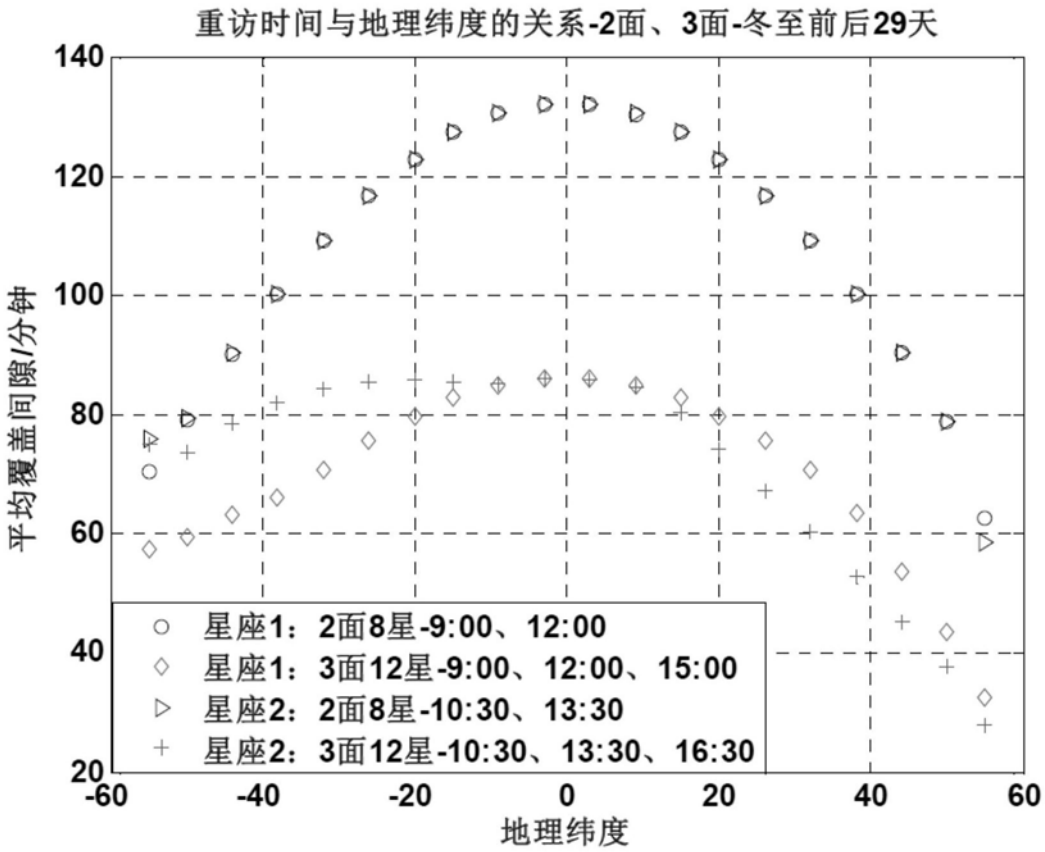

重访时间与地理纬度的关系-2面、3面-冬至前后29天
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
140
120
100
80
60
40
20
-60
-40
-20
0
20
40
60
星座1：2面8星-9:00、12:00
星座1：3面12星-9:00、12:00、15:00
星座2：2面8星-10:30、13:30
星座2：3面12星-10:30、13:30、16:30

图12

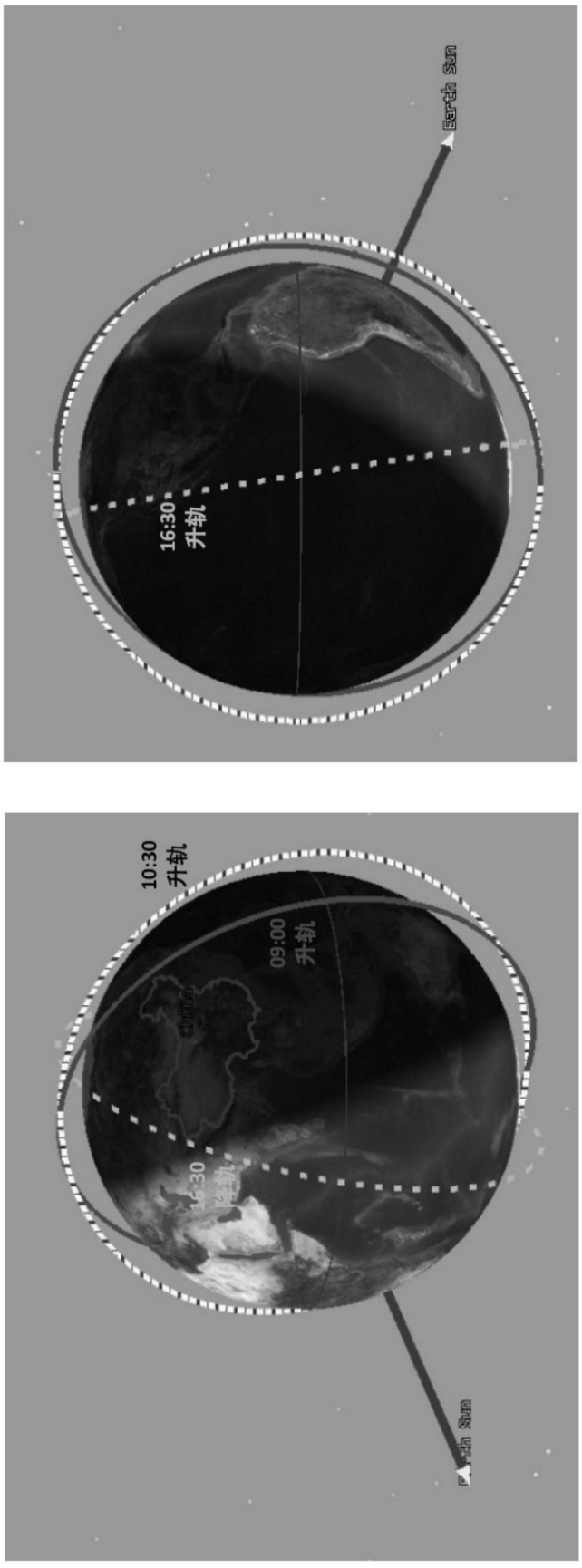


图13

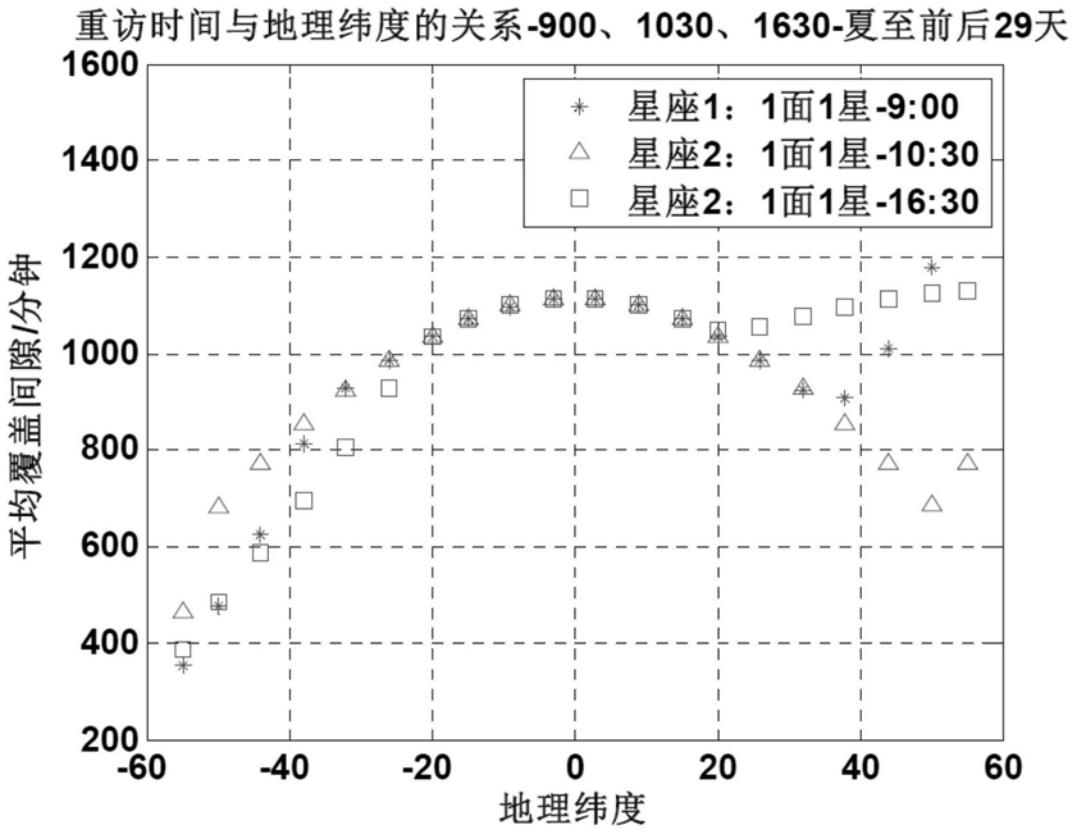

重访时间与地理纬度的关系-900、1030、1630-夏至前后29天
星座1：1面1星-9:00
星座2：1面1星-10:30
星座2：1面1星-16:30
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
-60
-40
-20
0
20
40
60

图14

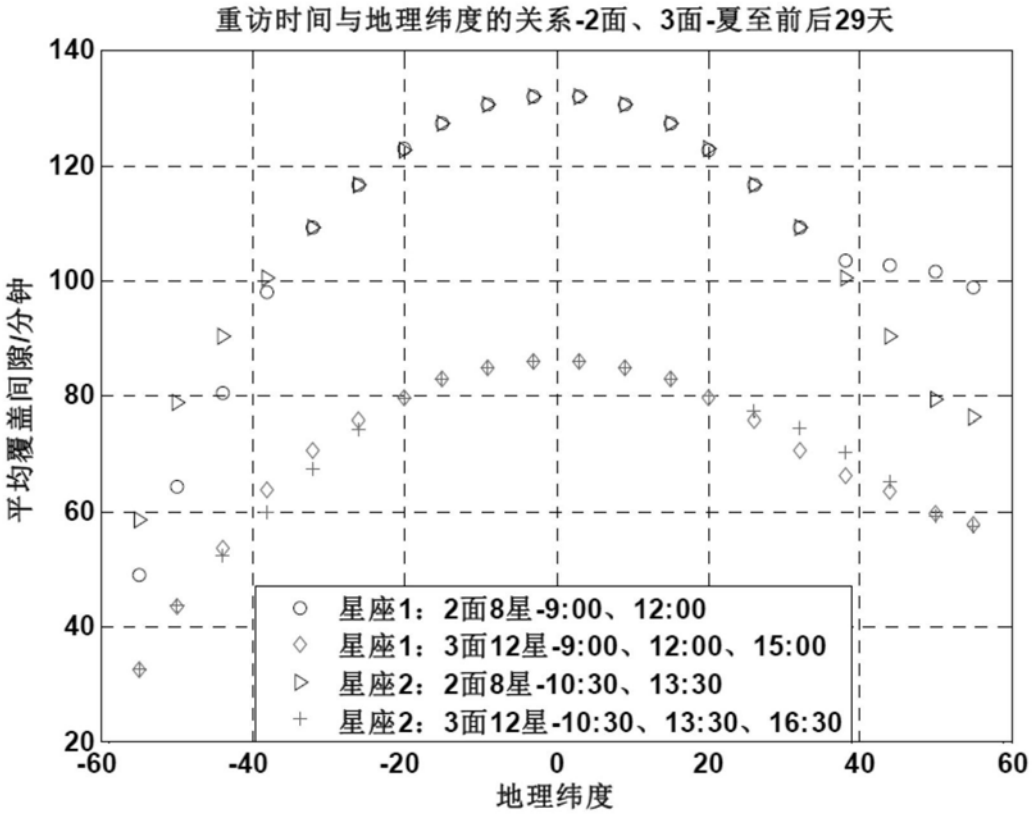
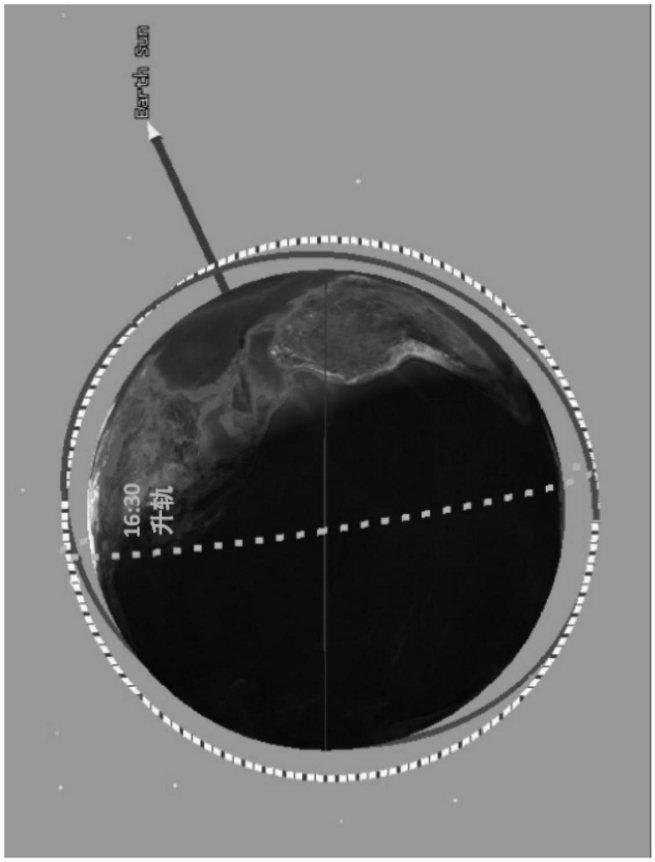

重访时间与地理纬度的关系-2面、3面-夏至前后29天
平均覆盖间隙/分钟
地理纬度
140
120
100
80
60
40
20
-60
-40
-20
0
20
40
60
星座1：2面8星-9:00、12:00
星座1：3面12星-9:00、12:00、15:00
星座2：2面8星-10:30、13:30
星座2：3面12星-10:30、13:30、16:30

图15



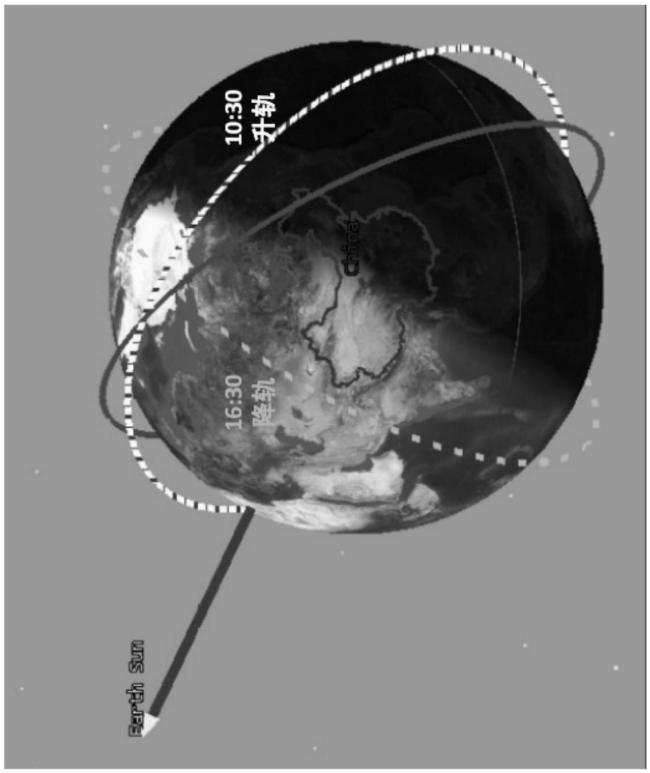


图16