(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 112685685 B
(45)授权公告日 2021.06.04

(21)申请号 202110284280.3
(22)申请日 2021.03.17
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112685685 A
(43)申请公布日 2021.04.20
(73)专利权人 中国人民解放军国防科技大学
地址 410073 湖南省长沙市开福区德雅路109号
(72)发明人 李海阳 何湘粤 杨路易 陆林 赵建磊
(74)专利代理机构 长沙国科天河知识产权代理有限公司 43225
代理人 邱轶
(51)Int.Cl.
G06F 17/10(2006.01)
G01S 19/50(2010.01)

(56)对比文件
CN 112462401 A,2021.03.09
CN 110519695 A,2019.11.29
KR 20190136851 A,2019.12.10
US 2019181947 A1,2019.06.13
CN 112118041 A,2020.12.22
何成龙.《一种提高地基伪卫星系统接收机测距性能的反馈校正算法》.《“2015 年全国遥感遥测遥控学术年会”论文集》.2015,
吴晓洋.《基于几何拓扑的遥感卫星高精度对地覆盖分布式算法研究与应用》.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技Ⅱ辑》.2017,

审查员 柯露

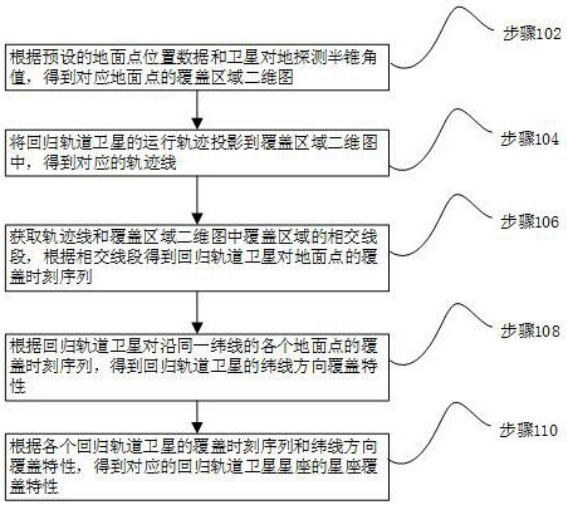
权利要求书1页 说明书20页 附图9页

(54)发明名称

一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法

(57)摘要

本申请涉及一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法。所述方法包括:根据地面点位置和卫星对地探测半锥角值得到对应地面点的覆盖区域二维图,将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中得到对应的轨迹线,根据轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段,得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列,根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列,得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性,根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性,得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。上述方法可快速计算回归轨道卫星星座对地面点以及全球的覆盖情况,统计包括重访时长和覆盖时长在内的多种覆盖性能参数。



CN 112685685 B

1.一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法,其特征在于,所述方法包括:

根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值,得到对应地面点的覆盖区域二维图;其中,地面点的覆盖区域二维图的获取方式为,分别以卫星在惯性空间中的升交点赤经和纬度幅角为X轴和Y轴建立二维坐标系,根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值,在所述二维坐标系中得到对应的地面点和卫星的相互可见区域;

在地固系下获取回归轨道卫星的运行轨迹,根据相对位置关系将所述运行轨迹投影到所述覆盖区域二维图中,得到所述回归轨道卫星在所述二维坐标系中的轨迹线;

获取所述轨迹线和所述覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段,计算所述相交线段对应的时段信息,根据得到的时段信息的集合,得到所述回归轨道卫星对所述地面点的覆盖时刻序列;

根据所述回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的所述覆盖时刻序列,得到所述回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性;其中,得到所述回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性的方式为,获取回归轨道卫星沿纬线方向的覆盖重复周期,根据所述覆盖重复周期平移所述覆盖时刻序列,得到所述回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性;

根据各个回归轨道卫星的所述覆盖时刻序列和所述纬线方向覆盖特性,得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性;其中,回归轨道卫星星座的星座覆盖特性的计算方式为,在一个回归周期内,根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的所述覆盖时刻序列,计算所述回归轨道卫星星座对单个地面点的总覆盖区间序列,在一个回归周期内,根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的所述纬线方向覆盖特性,计算所述回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列。

2.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

根据所述回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列,得到所述回归轨道卫星星座对纬线的覆盖性能参数。

一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法

技术领域

[0001] 本申请涉及卫星星座对地覆盖计算领域，一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法。

背景技术

[0002] 覆盖计算是卫星星座设计和性能分析的基本问题。针对不连续覆盖分析问题，目前使用最广泛的方法是网格点法。网格点法的基本思想是：在待分析的区域内设置一定数量的点，在给定的时间区间和时间步长下，通过仿真分析每个步长中每个地面点与所有卫星之间的相对位置关系，即可得到该时间区间内星座对所有地面点的覆盖特性。然而网格点法非常耗时，覆盖计算的精度很大程度上取决于所选地面点的数目、时间区间和时间步长。一些研究集中在地面点的选取策略上，但是评估星座的全球覆盖性能仍然需要花费大量的时间。此外，现有的不连续覆盖的解析分析方法都存在计算精度较低，应用范围有限等情况。

发明内容

[0003] 基于此，有必要针对上述技术问题，提供一种能够快速、准确地计算卫星星座对地不连续覆盖的回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法。

[0004] 一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法，方法包括：

[0005] 根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图。

[0006] 将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0007] 获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0008] 根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0009] 根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0010] 其中一个实施例中，地面点的覆盖区域二维图的获取方式包括：

[0011] 分别以卫星在惯性空间中的升交点赤经和纬度幅角为X轴和Y轴建立二维坐标系。

[0012] 根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，在二维坐标系中得到对应的地面点和卫星的相互可见区域。

[0013] 其中一个实施例中，将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线的方式包括：

[0014] 在地固系下获取回归轨道卫星的运行轨迹。

[0015] 根据相对位置关系将运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到回归轨道卫星在二维坐标系中的轨迹线。

[0016] 其中一个实施例中，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列的步骤包括：

[0017] 计算相交线段对应的时段信息。

[0018] 根据得到的时段信息的集合，得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0019] 其中一个实施例中，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性的方式包括：

[0020] 获取回归轨道卫星沿纬线方向的覆盖重复周期。

[0021] 根据覆盖重复周期平移覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0022] 其中一个实施例中，回归轨道卫星星座的星座覆盖特性的计算方式包括：

[0023] 在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列，计算回归轨道卫星星座对单个地面点的总覆盖区间序列。

[0024] 在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性，计算回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列。

[0025] 其中一个实施例中，所述方法还包括：

[0026] 根据回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列，得到回归轨道卫星星座对纬线的覆盖性能参数。一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算装置，包括：

[0027] 覆盖区域二维图生成模块，用于根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图。

[0028] 卫星轨迹投影模块，用于将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0029] 覆盖时刻序列计算模块，用于获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0030] 纬线方向覆盖特性解析模块，用于根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0031] 星座覆盖特性解析模块，用于根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0032] 一种计算机设备，包括存储器和处理器，所述存储器存储有计算机程序，所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任意一个实施例中所述方法的步骤。

[0033] 一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现上述任意一个实施例中所述方法的步骤。

[0034] 与现有技术相比，上述一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法、装置、计算机设备和存储介质，根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图，将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中得到对应的轨迹线，根据轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列，根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性，根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。本申请拓展了覆盖区域二维图形的应用，可快速计算回归轨道卫星星座对地面点、区域目标以及全球的覆盖情况，统计包括重访时长和覆盖时长在内的多种覆盖性能参数。

附图说明

[0035] 图1为一个实施例中一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法的步骤图；

[0036] 图2为从北极点俯瞰的升降点示意图；

[0037] 图3为卫星对地覆盖示意图；

[0038] 图4为高低纬覆盖界限示意图；

[0039] 图5为低纬地区圆形覆盖范围示意图；

[0040] 图6为四种覆盖情形示意图；

[0041] 图7为四种覆盖区域示意图；

[0042] 图8为卫星与覆盖区域的关系示意图；

[0043] 图9为地固系中卫星与覆盖区域关系示意图；

[0044] 图10为回归参数为5/1的单星对单目标点的覆盖分析示意图；

[0045] 图11为卫星轨迹直线与覆盖区域交点计算示意图；

[0046] 图12为单星对低纬纬线的覆盖情况示意图；

[0047] 图13为纬线最大覆盖范围与覆盖区域的关系示意图；

[0048] 图14为单星对低纬纬线覆盖分段情况示意图；

[0049] 图15为单星对普通高纬纬线覆盖分段情况示意图；

[0050] 图16为三颗卫星覆盖区间合并示意图；

[0051] 图17为各卫星轨迹与赤道交点的相对位置关系示意图；

[0052] 图18为各卫星覆盖区间分布示意图；

[0053] 图19为一个实施例中计算机设备的结构示意图。

具体实施方式

[0054] 为了使本申请的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本申请进行进一步详细说明。应当理解，此处描述的具体实施例仅仅用以解释本申请，并不用于限定本申请。

[0055] 在一个实施例中，如图1所示，提供了一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法，包括以下步骤：

[0056] 步骤102，根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图。

[0057] 覆盖区域用于表示圆锥形视场下卫星与地面点之间的相互可见性，任意一地面点所对应的覆盖区域表示：当前时刻，对该地面点具备覆盖能力的卫星所有可能的升交点赤经与纬度幅角的组合。对于任意一个地面点，其在该空间中的覆盖图形可能是凸的，也可能是凹的，还有可能分开成为两个独立的凸图形。

[0058] 步骤104，将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0059] 在惯性空间中，单颗卫星在覆盖区域二维图中的运行轨迹是一条直线，其倾斜度由J2长期项摄动下升交点赤经的变化决定；而某条纬线对应的覆盖区域的形状则随着地球自转匀速移动，移动速度与地球自转角速度相关。因此可以利用回归轨道卫星和覆盖区域

二维图之间的相对位置关系，将一个轨道周期中的卫星运行轨迹投影为一条直线，多个轨道周期则对应多条直线。

[0060] 步骤106，获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0061] 卫星的运行轨迹投影得到的执行穿过覆盖区域二维图中的覆盖区域时，二者相交的相交线段即表示该卫星可以覆盖该地面点的时间区间。根据多条直线和覆盖区域相交得到的每一个相交线段均表示该卫星覆盖该地面点的一个时间区间，根据这些相交线段就可以得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0062] 步骤108，根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0063] 反复执行步骤102至步骤106计算同一纬线上多个地面点的覆盖时刻序列，就可以得到回归轨道卫星沿该纬线的纬线方向覆盖特性。

[0064] 步骤110，根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0065] 类似地，根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，可以得到整个星座的星座覆盖特性。

[0066] 本实施例该方法拓展了覆盖区域二维图形的应用，将回归轨道卫星的运动轨迹转化为覆盖区域二维图形上的若干条直线，通过分析直线与覆盖区相交的情况，得到卫星对地面点的覆盖时间序列，并通过进一步分析覆盖特性沿纬线变化的情况，可以得到星座对纬线和全球覆盖性能。该方法可快速计算回归轨道卫星星座对地面点、区域目标以及全球的覆盖情况，统计包括重访时长和覆盖时长在内的多种覆盖性能参数。

[0067] 其中一个实施例中，提供了一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法，包括以下步骤：

[0068] 步骤202，分别以卫星在惯性空间中的升交点赤经和纬度幅角为X轴和Y轴建立二维坐标系。根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，在二维坐标系中得到对应的地面点和卫星的相互可见区域。

[0069] 本实施例中，为保证任意一个地面点的覆盖序列在一个回归周期内可以重复，并获得不连续覆盖的稳定解析解，因此以回归圆轨道为例进行计算说明，且星座中所有卫星的轨道半径和倾角均相同。

[0070] 设卫星轨道的交点周期为T_p（定义为航天器连续两次通过升交点的时间间隔），交点周期对应的卫星轨道角速度为n_p；设一个交点日为T_d（交点日定义为地球上零经度线相对于卫星轨道的升交点旋转一周的时间间隔）。上述两个周期存在如下关系：

[0071] $$T_r = mT_p = nT_d \qquad (1)$$

[0072] 其中，T_r称为回归周期，m与n为互质的正整数，m/n表示回归参数。

[0073] 设R_e为地球的赤道半径，ω_e为地球的角速度，μ为地心引力常数。假设轨道半径为r，倾角为i，平均角速度为n_0，有$n_0 = \sqrt{\mu/r^3}$。另外，假设升交点赤经、近地点幅角

和真近点角的变化率分别为$\dot{\Omega}$，$\dot{\omega}$与$\dot{M}$，则交点日和交点周期可以定义为：

[0074] $$T_d = \frac{2\pi}{\omega_e - \dot{\Omega}} \qquad (2)$$

[0075] $$T_p = \frac{2\pi}{n_0 + \dot{M} + \dot{\omega}} \qquad (3)$$

[0076] 同时，设在J_2摄动影响下，卫星的升交点赤经、近心点幅角和平近点角变化率分别可表示为：

[0077] $$\begin{cases} \dot{\omega} = \xi n_0 \left(4 - 5\sin^2 i\right) \\ \dot{\Omega} = -2\xi n_0 \cos i \\ \dot{M} = -\xi n_0 \left(3\sin^2 i - 2\right) \end{cases} \qquad (4)$$

[0078] 其中，$\xi = 3a_E^2 J_2 / \left(4p^2\right)$，参数$J_2$为地球引力势展开中的二次纬向谐波系数。

[0079] 因此，设某回归圆轨道回归周期对应的交点日数为n，回归周期期间卫星运行的轨道交点周期数为m，轨道倾角为i，轨道半径为r，则有：

[0080] $$r^{3.5} + b_1 r^2 + b_2 = 0 \qquad (5)$$

[0081] 其中

[0082] $$\begin{cases} b_1 = -\dfrac{n\sqrt{\mu}}{m\omega_e} \\ b_2 = \dfrac{3nJ_2 R_e^2 \sqrt{\mu}}{2m\omega_e}\left[\left(1 - 4\cos^2 i\right) + \dfrac{m}{n}\cos i\right] \end{cases} \qquad (6)$$

[0083] 实际上，对于任何轨道半径(或高度)r_0和倾角i_0，可以找到由倾斜角定义的回归轨道的回归参数m/n，满足$i = i_0$，并且半径r可以任意接近任何预先指定的精度。然而，任意的轨道半径和倾角往往会导致较大的m值和较长的回归周期。

[0084] 下面分析回归轨道卫星的星下点轨迹与纬线的交点情况；这里以北半球的纬线覆盖为例展开分析。取$i_0 = \min\left(i, \pi - i\right)$，当$\varphi < i_0$时，单颗卫星在一个轨道周期内，其星下点轨迹将两次穿过该纬线，这里将地固系中星下点轨迹与纬线的交点记为“升点”和“降点”。图2给出了从北极点俯瞰的升点和降点。其中图2a为升点，用字母A表示；图2b为降点，用字母D表示。其中回归参数为5/1，纬线位于北半球。升点与降点环绕该纬线均匀分布，相邻升点或降点之间的间隔ΔL满足：

[0085] $$\Delta L = \frac{2\pi}{m} \qquad (7)$$

[0086] 因此对于低纬地区，相邻升点和降点之间在当前纬度圈上对应的圆心角始终相

同。当$\varphi > i_0$的时，卫星单轨仅有在纬度为i_0时，该星下点才最接近相应的纬线。这里记这类点为“顶点”，用字母V表示，显然相邻顶点之间的间隔同样为ΔL。因此对于圆回归轨道，同一纬线上位置相邻的轨迹之间的经度间隔始终保持为ΔL。

[0087] 本实施例中卫星的覆盖模型主要分析卫星星下点穿过给定的纬线时，单星的覆盖区域在该纬线上所能达到的最大范围(对应一段弧度)。设地球为一标准的椭球体，地心为O_E，半长轴(赤道半径)为a_E，扁率为f；卫星运行圆轨道的半径为R_0，对地圆锥形覆盖的半锥角为β。被覆盖的纬线地心纬度为φ，对应的地心距为R_φ，如图3所示。则当卫星正好能覆盖到纬线时，地心距R_φ可近似地表示为：

[0088] $$R_\varphi = a_E\left(1 - f\sin^2\varphi\right) \tag{8}$$

[0089] 对应的地心覆盖角可表示为：

[0090] $$\theta(\varphi) = \arcsin\left(\frac{r\sin\beta}{R_\varphi}\right) - \beta \tag{9}$$

[0091] 考虑需要分析的纬度为φ，对应的地心角为θ与φ相关，可表示为φ的函数$\theta(\varphi)$。考虑以下两个方程：

[0092] $$|\varphi| = \max\left(i_0 - \theta(\varphi), \theta(\varphi) - i_0\right) \tag{10}$$

[0093] $$|\varphi| = \min\left(i_0 + \theta(\varphi), \pi - i_0 - \theta(\varphi)\right) \tag{11}$$

[0094] 设上述两方程的非负根分别为φ_1、φ_2，对应的覆盖角θ_1、θ_2分别表示低纬和高纬界限处的覆盖角，则对于$|\varphi| < i_0 - \theta_1$的低纬地区，卫星上下行都将穿过纬线，由于地球自转，其在纬线上的左右覆盖范围将有一定的差别，但上下行穿过时的覆盖范围成对称关系；对于$i_0 - \theta_1 \le |\varphi| \le i_0 + \theta_2$的高纬地区，也就是卫星接近“顶点”时，卫星对纬线的覆盖只有一次，此时左右覆盖范围相等。低纬和高纬界限如图4所示。考虑卫星为圆形覆盖时，低纬情况下，其经过升点或降点时，并不能直接通过解析计算得到左右最大覆盖范围的解析表达式，这是由于圆形覆盖的特殊性，以及地球自转的影响。低纬圆形覆盖如图5所示。

[0095] 图5中，星下点轨迹与纬线的交点A即为前文所述的“升点”。卫星经过升点附近时，纬线上的一定范围将会被扫描到，设该扫描范围的左端点为A_L，右端点为A_R。设该范围的左端点A_L与升点A在纬线上对应的圆心角距离为α_L，右端点A_R与升点A在纬线上对应的圆心角距离为α_R，在纬线上的总覆盖范围$\alpha = \alpha_L + \alpha_R$，下面给出计算方法。纬线上升点的左端最大覆盖范围$\alpha_L$将出现为卫星纬度幅角$u$位于区间$\left[u_I, u_\varphi\right]$内的某一位置，而

对应的右端最大覆盖范围α_R将出现为卫星纬度幅角u位于区间$\left[u_\varphi, u_F\right]$内的某一位置。左右覆盖范围的表达式为：

$$\alpha_L = \arctan\left(\cos i \tan u_\varphi\right) - sign(\cos i)\frac{n}{m}u_\varphi + \max_{u\in[u_I,u_\varphi]}\left[\arccos\frac{\cos\theta - \sin\varphi\sin u\sin i}{\cos\varphi\sqrt{1-\sin^2 u\sin^2 i}} - \arctan\left(\cos i\tan u\right) + sign(\cos i)\frac{n}{m}u\right] \tag{12}$$

[0096]

$$\alpha_R = -\arctan\left(\cos i \tan u_\varphi\right) + sign(\cos i)\frac{n}{m}u_\varphi + \max_{u\in[u_\varphi,u_F]}\left[\arccos\frac{\cos\theta - \sin\varphi\sin u\sin i}{\cos\varphi\sqrt{1-\sin^2 u\sin^2 i}} + \arctan\left(\cos i\tan u\right) - sign(\cos i)\frac{n}{m}u\right] \tag{13}$$

[0097]

[0098] 其中，

$$\begin{cases} u_I = \arcsin\dfrac{\sin(\varphi-\theta)}{\sin i} \\ u_\varphi = \arcsin\dfrac{\sin\varphi}{\sin i} \\ u_F = \arcsin\dfrac{\sin(\varphi+\theta)}{\sin i} \end{cases} \tag{14}$$

[0099]

[0100] 对于高纬地区，同样需要进行迭代求解覆盖范围的最大值，这里给出表达式：

$$\alpha = \pi\left[1 - sign(\cos i)\frac{n}{m}\right] + 2\max_{u\in[u_I,\pi/2]}\left[\arccos\frac{\cos\theta - \sin\varphi\sin u\sin i}{\cos\varphi\sqrt{1-\sin^2 u\sin^2 i}} - \arctan\left(\cos i\tan u\right) + sign(\cos i)\frac{n}{m}u\right] \tag{15}$$

[0101]

[0102] 高纬地区以顶点为基准，有$\alpha_L = \alpha_R = \alpha/2$。求解上述式子时，通过在给定区间内进行多次迭代，可求得满足精度要求的纬度幅角值，进而得到α_L与α_R值。

[0103] 本实施例中在计算卫星覆盖区域时，以卫星在惯性空间中的升交点赤经(RAAN)为X轴，以卫星的纬度幅角(AOL)为Y轴建立二维坐标系，得到的覆盖区域是在该二维空间中的闭合区域。

[0104] 一个地面点的覆盖图形可能是凸的，也可能是凹的，还有可能分开成为两个独立的凸图形。覆盖区间可通过球面三角形相关公式进行解析计算，下面进行详细说明。设需要分析的地面点地心纬度为$\varphi\in\left[-\pi/2,\pi/2\right]$，而地面点地心经度的不同只会导致图形沿着X轴平移。设圆轨道卫星的轨道倾角为i，并记$i_0 = \min\left(i,\pi-i\right)$，地面点纬度上，圆锥视场对应的覆盖地心角为$\theta$。生成覆盖区间时，需要按照纬度不同区分为四种情况考虑，如图6所示。图6中P表示北极点，图6中a表示低纬的覆盖区间生成方式，b表示普通高纬的覆盖区间生成方式，c表示从北极点俯瞰方向的极圈的覆盖区间生成方式，d表示赤道环的覆盖区间生成方式，具体描述为：

[0105] (a) 低纬。满足 $|\varphi| < i_0 - \theta_1$，此时卫星上下行都可以观测地面点，对应的覆盖区间将是两个独立的图形。

[0106] (b) 普通高纬。满足 $i_0 - \theta_1 \le |\varphi| \le i_0 + \theta_2$，且满足 $i_0 + \theta_2 > \pi/2$ 时 $|\varphi| \le \pi - i_0 - \theta_2$，此时卫星上下行过程中仅覆盖地面点一次，对应的覆盖区间将是一个独立的图形。

[0107] (c) 极圈。在高纬的情况下，进一步满足 $i_0 + \theta_2 > \pi/2$ 且 $|\varphi| > \pi - i_0 - \theta_2$。此时覆盖区间贯穿整个X轴，即任意升交点赤经对应的卫星都可在某个纬度幅角区间内对地面点进行覆盖。

[0108] (d) 赤道环。在高纬情况下，进一步满足 $i_0 < \theta_1$ 且 $|\varphi| < \theta_1 - i_0$。满足该条件的纬度分布在赤道附近，且在一个轨道周期内必然能被覆盖到，对应的覆盖区间同样贯穿整个X轴。

[0109] 图6中a、b、c、d对应的覆盖区间分别如图7中a、b、c、d所示，图7中覆盖区域中间的点表示在上行或下行过程中位于地面点正上方的卫星。

[0110] 步骤204，在地固系下获取回归轨道卫星的运行轨迹。根据相对位置关系将运行轨迹投影到覆盖区域二维图，得到回归轨道卫星在二维坐标系中的轨迹线。

[0111] 基于上面描述的回归圆轨道、卫星覆盖模型和覆盖其与二维图计算单颗卫星对地面的覆盖情况。如图8所示，在惯性空间中，单颗卫星在二维图上的运行轨迹是一条基本平行于Y轴的直线，略有倾斜的原因在于J2长期项摄动下升交点赤经的变化，对应的速度为 $\dot{\Omega}$。卫星沿着Y轴正向运动，速度为考虑J2长期项摄动后的角速度 n_p。而某个纬线上对应的覆盖区域形状则随着地球自转，沿着X轴正方向匀速移动，速度为地球自转角速度 ω_E。

[0112] 因此可以考虑卫星和图形之间的相对运动关系，将图形平移的速度转移到卫星上，图形转化至地固系中，如图9所示。此时覆盖区域固定，卫星轨迹变成了倾向Y轴的直线，多个轨道周期则对应多条斜线。卫星穿过覆盖区域的区段，即表示卫星可对地面点完成覆盖的区间。此时纵坐标的含义保持不变，但横坐标转化为升交点经度(LAN)。此外，对于回归轨道，此时卫星轨迹直线的斜率 k_{sat} 可以用回归轨道参数表示为：

[0113] $$k_{sat} = -\frac{n_p}{\omega_E - \dot{\Omega}} = -\frac{m}{n} \qquad (16)$$

[0114] 因此可将二维图转换至地固系中，并将覆盖持续时间定义为卫星轨道与覆盖区域相交的部分。

[0115] 步骤206，获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，计算相交线段对应的时段信息。根据得到的时段信息的集合，得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0116] 下面以低纬为例，分析单星对单个地面点的覆盖，高纬的分析方式类似。考虑地面点在地固系中的地心经纬度分别为 λ，φ。当前时刻卫星的RAAN与AOL分别为 Ω_0，u_0，其余

参数符号均与第一节相同。当前时刻对应的格林尼治恒星时角为S_G。设此时地面点对应的覆盖图形中，上行过顶和下行过顶点的坐标分别记为(λ_1,u_1)，(λ_2,u_2)，则显然有：

[0117]
$$\begin{cases}\lambda_1=\lambda-\arcsin\left(\dfrac{\tan\varphi}{\tan i}\right)\\ \lambda_2=\lambda+\arcsin\left(\dfrac{\tan\varphi}{\tan i}\right)-\pi\\ u_1=\arcsin\left(\dfrac{\sin\varphi}{\sin i}\right)\\ u_2=\pi-\arcsin\left(\dfrac{\sin\varphi}{\sin i}\right)\end{cases}\qquad(17)$$

[0118] 根据T_1与T_2点的坐标即可确定覆盖区域在二维图中的具体位置。进一步确定卫星轨迹的位置，不妨设卫星与X轴各交点的经度分别为λ_s^j，$j=1,2,...,m$。对于当前时刻，有：

[0119]
$$\lambda_s^1=\Omega_0+\frac{n}{m}u_0-S_G\qquad(18)$$

[0120] 考虑到回归轨道的特点，卫星在二维图上的轨迹是固定的，后续轨迹与X轴的交点的经度值依次间隔$2\pi/m$，均匀分布在二维图中，图10给出了$m=5$，$n=1$的情况。

[0121] 以λ_s^1为基准，记卫星经过第j交点时对应的相对时刻为t_j，则t_j必然是卫星交点周期T_p的整数倍，这里记相应的整数为a_j，有：

[0122]
$$t_j=a_jT_p\qquad(19)$$

[0123] 其中，$a_j\in[0,m-1]$，$j=1(1)m$，且有：

[0124]
$$a_j=\frac{km+j-1}{n}\qquad(20)$$

[0125] 其中，k是使得a_j为正整数的最小非负整数。确定覆盖区域和卫星轨迹的位置后就可以计算覆盖区间情况。当卫星的轨迹与覆盖区域相交时，通过求解交点坐标可生成覆盖区间边界对应的纬度幅角值。如图11所示，覆盖区域的边界用若干个点组成，计算与上边界或下边界的交点时，找到位于直线两侧的两个点(x_1,y_1)、(x_2,y_2)，并分别计算两点与卫星轨迹直线的距离d_1、d_2，通过线性插值的方式即可得到交点处的纬度幅角值u_b，有：

[0126] $$\begin{cases} d_1 = \dfrac{|mx_1 + ny_1 - m\lambda_s|}{\sqrt{m^2+n^2}} \\ d_2 = \dfrac{|mx_2 + ny_2 - m\lambda_s|}{\sqrt{m^2+n^2}} \end{cases} \quad (21)$$

[0127] 轨迹和覆盖区域相交的y轴上的坐标值可以表示为：

[0128] $$u_b = y_1 + \frac{d_1}{d_1+d_2}(y_2 - y_1) \quad (22)$$

[0129] 在一个完整的回归周期中，卫星共有m轨，各轨可能与地面点的覆盖区域相交、相切或不相交。不妨设具备交点的轨数为C，组成的集合为$S_C \in [1,2,...,m]$，并对这些轨按相对时间从小到大的顺序重新编号为$b_1, b_2, ..., b_C$。设S_C中任意一轨b_j与图形的交点对应的纬度幅角分别为$u_{b_i}^1$、$u_{b_i}^2$，满足$j=1(1)C$，$0 \le u_{b_j}^1 \le u_{b_j}^2 < 2\pi$；轨迹在升交点的时刻为$t_{b_i}$，则轨迹的覆盖区间可表示为$\left[t_{b_j} + \frac{u_{b_j}^1}{2\pi}T_p, t_{b_j} + \frac{u_{b_j}^2}{2\pi}T_p \right]$。

[0130] 因此，可得到卫星对该地面点的覆盖序列$\left[\Delta t_{b_i} + t_{b_i}^1, \Delta t_{b_i} + t_{b_i}^2 \right]$，其中$i = 1,2,...,c$。进一步可计算卫星对该目标的最大重访时长$T_{\text{rev}}$和覆盖时长$T_{\text{cov}}$等重要品质参数，具体表达式为：

[0131] $$T_{\text{rev}} = \max_{j=2}^{C} \left(t_{b_j} + \frac{u_{b_j}^1}{2\pi}T_p - t_{b_{j-1}} - \frac{u_{b_{j-1}}^2}{2\pi}T_p, T_p + t_{b_1} + \frac{u_{b_1}^1}{2\pi}T_p - t_{b_C} - \frac{u_{b_C}^2}{2\pi}T_p \right) \quad (23)$$

[0132] $$T_{\text{cov}} = \sum_{j=1}^{C} \frac{t_{b_j}^2 - t_{b_j}^1}{T_p} \times 100\% \quad (24)$$

[0133] 需要注意的是，覆盖持续时间集的开始和结束需要合并，这样就不会错过最长的重访时间。此外，还可以通过覆盖持续时间序列获得其他覆盖特征。

[0134] 步骤210，获取回归轨道卫星沿纬线方向的覆盖重复周期，根据覆盖重复周期平移覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0135] 由于回归轨道卫星的轨迹固定，因此分析其对纬线的覆盖时，只需要通过平移覆盖区域即可代表纬线上不同经度的点，进而得到卫星对整个纬线的覆盖特性。覆盖区域图形平移$\Delta L = 2\pi/m$的长度后，卫星对单目标的覆盖情况就会出现重复，因此，分析卫星对单个纬线的覆盖特性时，只需选取$\Delta L = 2\pi/m$长的纬度段进行分析即可，这里记为特征段。随着轨迹的平移，卫星的轨迹会进入或移出图形，这很有可能导致卫星对目标的重访特

性发生较大的变化，因此一旦有卫星轨迹进入或移出图形，就需要单独分段进行统计。

[0136] 以低纬覆盖分析为例，从升轨右侧与图形相切开始，将图形逐渐向右移动，对应可能的覆盖情况如图12所示，其中加粗的线表示与图形存在相交。图12中a、b、c、d分别表示四种覆盖情况，即：(a)覆盖区域右侧图形的右端与轨迹相交；(b) 覆盖区域左侧图形的右端与轨迹相交；(c) 覆盖区域右侧图形的左端与轨迹分离；(d) 覆盖区域左侧图形的左端与轨迹分离。上述四种情况对应着有不同编号的卫星轨迹穿过覆盖区域，因此对应了四种覆盖情况。当然，后三种情况的顺序与具体的纬度有关，且有可能某些情况对应的长度很小甚至为0。此外，图形在同一种覆盖情况对应的范围内移动时，对应的覆盖时长和重访时长并不是定值，而是会发生较小的变化。

[0137] 对于普通高纬，显然只存在(a)和(d)两种情况；对于极圈或赤道环，则不存在上述情况，重访时长和覆盖时长都只是随着地面点经度的变化而轻微改变。这里将单颗卫星对单个纬线的覆盖种类数记为χ，则其取值可能是4或2或1，这与相关文献中的结论一致。

[0138] 下面进一步分析特征段上四种覆盖情况对应的长度。考虑卫星轨迹与图形正好相切的情况，基于卫星覆盖模型计算得到的纬线左右侧最大覆盖范围α_R与α_L，覆盖区域与纬线最大覆盖范围存在如图13所示的关系。图13中，沿着X轴方向上的距离$\Delta\psi$可表示为：

[0139]
$$\begin{aligned}\Delta\psi &= \lambda_1-\lambda_2-\frac{n}{m}(u_1-u_2)\\ &= \pi-2\arcsin\left(\frac{\tan\varphi}{\tan i}\right)-\frac{n}{m}\left(\pi-2\arcsin\left(\frac{\sin\varphi}{\sin i}\right)\right)\end{aligned}\tag{25}$$

[0140] 以低纬为例，对单星对纬线的覆盖分段情况进行分析。单星对纬线覆盖的分段情况如图14所示。设上行或下行图形最多可容纳的卫星轨迹数为N_m，有：

[0141]
$$N_m=\mathrm{Floor}\left(\frac{\alpha_R+\alpha_L}{\Delta L}\right)+1\tag{26}$$

[0142] 其中Floor(X)返回不超过X的最大整数。图14中有$N_m=2$。容纳N_m条轨迹后，图形沿X轴上最小剩余的空间L_m可表示为：

[0143]
$$L_m=\alpha_R+\alpha_L-(N_m-1)\Delta L\tag{27}$$

[0144] 情况(a)下，将与上行部分右侧相切的轨迹编号为1，且上行部分必然包含了N_m条轨迹，此时与下行部分相交的最右侧的轨迹的编号p可表示为：

[0145]
$$p=\mathrm{Floor}\left(\frac{\Delta\psi-\alpha_R+\alpha_L}{\Delta L}\right)+1\tag{28}$$

[0146] p轨迹与下行部分图形最右侧的距离L_p可表示为：

[0147] $$L_p=(p-1)\Delta L-(\Delta\psi-\alpha_R+\alpha_L) \tag{29}$$

[0148] 此时，需要分两种情况考虑。

[0149] 情况1：$L_p\le L_m$。此时下行部分同样包含N_m条轨迹，对应的最左侧轨迹编号为$q=p+N_m$，且与最左侧的距离L_q可表示为$L_q=L_m-L_p$，下行部分包含的轨迹数记为N_d，则有$N_d=N_m$。情况2：$L_p>L_m$。此时下行部分包含N_m-1条轨迹，有$N_d=N_m-1$，对应的最左侧轨迹编号为$q=p+N_m-1$，与最左侧的距离L_q可表示为$L_q=L_m-L_p+\Delta L$。因此，对于前文所述的情况2至4，设图形需要向右平移的量分别为L_1至L_3，则显然有：

[0150] $$\begin{cases}L_1=L_q\\L_2=\Delta L-L_p\\L_3=L_m\end{cases} \tag{30}$$

[0151] 对L_1至L_3从小到大进行排序，即可得到四种情况各自对应的段长度，以及各情况下能够对地面点完成覆盖的轨迹编号集。排序方式共有6种，每种排序下，设各段的长度分别为$l_v\ (v=1,2,\ldots,\chi)$、上行下行覆盖各自包含数轨迹数分别为N_1、N_2，下行包含轨迹的起始编号为p_d。不同排序下，单星对低纬纬线覆盖分段参数值如表1所示。其中数字表示从小到大的排序，例如123表示的是$L_1\le L_2\le L_3$。

[0152] 表1单星对低纬纬线覆盖分段参数

[0153]

排序情况		123	132	213	231	312	321
段数	参数						
1	l_1	L_1	L_1	L_2	L_2	L_3	L_3
	N_1	N_m	N_m	N_m	N_m	N_m	N_m
	N_2	N_d	N_d	N_d	N_d	N_d	N_d
	p_d	p	p	p	p	p	p
2	l_2	L_2-L_1	L_3-L_1	L_1-L_2	L_3-L_2	L_1-L_3	L_2-L_3
	N_1	N_m	N_m	N_m	N_m	N_m-1	N_m-1
	N_2	N_d-1	N_d-1	N_d+1	N_d+1	N_d	N_d
	p_d	p	p	$p-1$	$p-1$	p	p
3	l_3	L_3-L_2	L_2-L_3	L_3-L_1	L_1-L_3	L_2-L_1	L_1-L_2
	N_1	N_m	N_m-1	N_m	N_m-1	N_m-1	N_m-1
	N_2	N_d	N_d-1	N_d	N_d+1	N_d-1	N_d+1
	p_d	$p-1$	p	$p-1$	$p-1$	p	$p-1$
4	l_4	$\Delta L-L_3$	$\Delta L-L_2$	$\Delta L-L_3$	$\Delta L-L_1$	$\Delta L-L_2$	$\Delta L-L_1$
	N_1	N_m-1	N_m-1	N_m-1	N_m-1	N_m-1	N_m-1
	N_2	N_d	N_d	N_d	N_d	N_d	N_d
	p_d	$p-1$	$p-1$	$p-1$	$p-1$	$p-1$	$p-1$

[0154] 对于普通高纬，显然只存在情况(a)和(d)，对应的段数为2，如图15所示。各段长度以及包含的点个数如表2所示。

[0155] 表2单星对普通高纬纬线覆盖分段参数

[0156]

段数	段长	点数
1	L_m	N_m
2	$\Delta L-L_m$	N_m-1

[0157] 对于极圈或赤道环，显然只存在1段，段长为ΔL，对应的轨迹个数为m，也就是说，对应的覆盖特性沿着纬度变化不大，可以选取一小段作为代表分析。

[0158] 在上述分析的基础上，对于某个纬线，只需选取各弧段的中点作为代表点进行分析，即可得到当前纬线的所有可能的覆盖序列分布和重访特性。例如，分析单星对低纬的纬线覆盖时，选取4个段的中点，按照步骤202至步骤206的方法得到选取点的覆盖时刻序列，即可代表整个纬线的基本覆盖情况。

[0159] 步骤212，在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列，计算回归轨道卫星星座对单个地面点的总覆盖区间序列。

[0160] 星座的对单个地面点的覆盖可以通过组合星座中每个卫星的覆盖来分析，并且可

以获得星座中每个卫星在一个回归周期中的覆盖持续时间。设为星座中的卫星数，设J_k为第k颗卫星的覆盖区间个数，其中$k=1(1)N$。设$\left[t_j^k,t_j^k\right]$为第k颗卫星的覆盖时间，其中$j=1(1)J_k$。然后，通过组合$\left[t_j^k,t_j^k\right]$即可得到地面点的覆盖持续时间。然而，由于覆盖持续时间的初始时间被定义为轨道和赤道的第一个交点的通过时间，因此需要确定卫星的时间关系。考虑到卫星在轨道上的位置，需要在第k颗卫星的每个覆盖持续时间上增加一个额外的时间间隔，可以表示为：

[0161] $$\Delta t^k=\frac{u_k n}{2\pi m}T_r \qquad (31)$$

[0162] 其中u_k为第k颗的纬度幅角。

[0163] 此外，应该指出的是，对于每颗卫星，覆盖持续时间需要限制在一个回归周期内。此外，还应考虑各卫星覆盖时间的重叠，并将各覆盖序列的首尾进行组合，以获得准确的覆盖或重访时间。一个简单的例子如图16所示。星座对单个地面点的总覆盖区间序列C_p可表示为：

[0164] $$C_p=\bigcup_{k=1}^{N}\left(\bigcup_{j=1}^{J_k}\left[t_j^k+\Delta t^k,t_j^k+\Delta t^k\right]\right) \qquad (32)$$

[0165] 步骤214，在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性，计算回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列。

[0166] 由于单星对纬线的覆盖是分段的，比如低纬为4段，因此对于多星，由于相对位置的变化，覆盖情况是原来的N倍，其中N为卫星个数。通过RAAN与AOL即可表示出整个星座的相对构型，这里记为：$\Omega_k,u_k,k=1(1)N$。各卫星的起始经度，即在X轴上的初始位置λ_k^1，有：

[0167] $$\lambda_k^1=\Omega_k+\frac{n}{m}u_k-S_G \qquad (33)$$

[0168] 其中上标1表示轨迹的编号。这些位置分布在360度的范围内，但可以通过平移一定单位长度的ΔL，将所有卫星所在的位置转移到同一个特征段ΔL上，再对该段进行分析，如图17所示。以基准星的初始位置作为基准，设第k颗卫星平移到同一个特征段后，轨迹编号变为g_k，$g_k\in\{1,2,...,m\}$，则有：

[0169] $$g_k=\left[\mathrm{Floor}\left(\frac{\lambda_k^1-\lambda_1^1}{\Delta L}\right)\right]_m \qquad (34)$$

[0170] 其中函数$[X]_Y$确保X在区间$[0,Y)$中。每颗卫星的弧段上都对应χ个覆盖情况，每种覆盖情况的长度l_v通过表1和表2即可得到，因此，每种覆盖情况的端点位置也可求得。设第k颗卫星的第v个覆盖情况在特征段上对应的坐标s_k^v可表示为：

[0171] $$s_k^v=\left[\lambda_k^{g_k}+\sum_{j=1}^{v}l_j\right]_{\Delta L} \qquad (35)$$

[0172] 对s_k^v从小到大进行排序，即可得到新的端点序列，这里记为s_r'，其中$r=0(1)\chi N$，且$s_0'=\lambda_1^1$，$s_N'=\lambda_1^1+\Delta L$。图18展示的是低纬地区各卫星覆盖情况在同一特征段上的分布情况。卫星个数较多时，不同覆盖情况的组合将会产生一些长度很短的小段，统计这些小段对应的覆盖特性时，传统的设置多个目标点的方式很有可能略过这些小段。

[0173] 选取各小段的中点作为分析对象，即可按照单星对单目标覆盖的分析方法，得到各小段上，各卫星的覆盖序列情况。各小段中点的坐标值记为s_r''，其中$r=1(1)\chi N$，则有：

[0174] $$s_r''=\frac{s_{r-1}'+s_r'}{2} \qquad (36)$$

[0175] 考虑第k颗卫星对第$r=1(1)\chi N$段的覆盖情况，判断步骤如下：

[0176] (1) 判断第r段的中点坐标值s_r''与$\lambda_k^{g_k}$的大小关系，$s_r''<\lambda_k^{g_k}$则取$\Delta g_{kr}=g_k+1$，否则取$\Delta g_{kr}=g_k$。

[0177] (2) 判断第r段的中点坐标值s_r''与$\lambda_k^{\Delta g_{kr}}$的距离$\Delta s_{kr}=s_r''-\lambda_k^{\Delta g_{kr}}$，并通过$\Delta s_{kr}$找到其位于的区间编号，这里记为$\Delta v_{kr}$，$\Delta v_{kr}=1(1)\chi$。

[0178] (3) 采用单星对单目标覆盖的分析方法，将基准轨迹的横坐标设置为$\lambda_k^{\Delta g_{kr}}$，覆盖

情况选取为Δv_{kr}，与区段左端点的距离为$\Delta s_{kr}-\sum_{i=1}^{\Delta v_{kr}-1} l_i$，生成单星对单目标点的覆盖序列$C_{kr}$，设覆盖区间共有$\Delta J_{kr}$段，则可将覆盖序列表示为：$C_{kr}=\left\{\left[t_j^{kr1},t_j^{kr2}\right]\right\}$，$j=1(1)\Delta J_{kr}$。

[0179] (4) 考虑所有卫星与基准星的时间差，需要在覆盖序列上增加一个时间差，覆盖序列可改造为$C_{kr}=\left\{\left[t_j^{kr1}+t_{\Delta g_{kr}},t_j^{kr2}+t_{\Delta g_{kr}}\right]\right\}$，其中$t_{\Delta g_{kr}}$可通过式(19)得到。

[0180] 通过上述步骤，即可统计得到N颗卫星分别对第r段的覆盖序列，进而生成整个纬线的覆盖情况。需要注意的是，统计的覆盖序列端点时刻需约束在一个回归周期内，且不能简单通过计算覆盖区间的间隔得到重访时长，或通过直接累加覆盖区间得到覆盖时长，需要考虑覆盖序列重叠的情况，以及覆盖区段首尾相连接的情况。因此星座对第r段的总覆盖序列C_r，可以表示为：

[0181] $$C_r=\bigcup_{k=1}^{N}\left(\bigcup_{j=1}^{\Delta J_{kr}}\left[t_j^{kr1}+t_{\Delta g_{kr}},t_j^{kr2}+t_{\Delta g_{kr}}\right]\right) \quad (37)$$

[0182] 得到总覆盖序列后，也就形成了相应的重访序列。进一步可求得星座对纬度为φ的特征段上第r段的覆盖时长、重访时长等品质参数。综上所述，对于星座对纬线的覆盖，最多可以得到χN个覆盖变量，每个覆盖变量都可用上述方法求解。

[0183] 步骤216，根据回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列，得到对纬线的最大重访时间。

[0184] 对于卫星总数为N的星座，通过前文给定的方法，即可计算其对纬度为φ的纬线的覆盖情况。设卫星覆盖的最大纬度为$\varphi_{\max}\in[0,\pi/2]$，则需要分析的纬度范围为$-\varphi_{\max}$至$\varphi_{\max}$，通过在这之间设置一定数量的纬线，即可进行全球覆盖分析。

[0185] 下面以最大重访时长为例进行说明。这里设卫星总数为N的星座对纬度为φ的纬线上的第r段的最大重访时长为T_r^{φ}，$r=1(1)\chi N$，则卫星对纬线的最大重访时长可表示为$\max_{1\le r\le \chi N}\left(T_r^{\varphi}\right)$。需要注意的是，南北纬对称位置上覆盖区域图形的形状是完全相同的，因此覆盖特性沿着地球赤道堆成，全球最大重访时长$T_{\max}$可表示为：

[0186] $$T_{\max}=\max_{0\le\varphi\le\varphi_{\max}}\left(\max_{1\le r\le\chi N}\left(T_r^{\varphi}\right)\right) \qquad (38)$$

[0187] 其它全球覆盖性能参数可用类似的方法计算得到。

[0188] 应该理解的是，虽然图1的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示，但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。除非本文中有明确的说明，这些步骤的执行并没有严格的顺序限制，这些步骤可以以其它的顺序执行。而且，图1中的至少一部分步骤可以包括多个子步骤或者多个阶段，这些子步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成，而是可以在不同的时刻执行，这些子步骤或者阶段的执行顺序也不必然是依次进行，而是可以与其它步骤或者其它步骤的子步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

[0189] 下面通过算例说明本申请的技术效果。算例中使用Walker星座，其构形参数可定义为N/P/F，N表示卫星总数，P表示轨道数，F表示相位参数。分析中考虑了两种配置，即3/3/1和10/10/8。星座中卫星轨道的初始参数如表3所示。

[0190] 表3回归轨道卫星参数

[0191]

参数	符号	值	单位
回归参数	m/n	15/1	-
回归周期	T_r	1416.73	minute
交点周期	T_p	94.45	minute
交点日	T_d	1416.73	minute
半长轴	a	6874.18	km
偏心率	e	0.0	-
轨道倾角	i	50.0	degree

[0192] 覆盖参数方面，设卫星对地覆盖张开的半锥角为65度。地面目标点方面，选取经度为0的经线上，地理纬度为0至55度的目标点，按5度间隔选取，共12个。设场景开始的UTC时间为2021年1月1日0时0分0秒，STK中的场景间隔被设置为两个回归周期，以避免错过任何可能的重访持续时间。初始时刻星座中基准卫星的RAAN和AOL均为0，STK中各卫星的坐标系设置为瞬时真赤道地心系。结果比较如下：

[0193] (1) 对于3/3/1构型，本申请与STK对于各目标点的最大重访时长计算结果基本一致，偏差控制在1.5秒以内；对于各目标点的覆盖时长，本申请与STK计算结果也一致，偏差控制在0.003以内。上述两方面的比较足以说明本申请计算的准确性。

[0194] (2)对于10/10/8构型。为进一步说明本申请计算的准确性，分析10颗卫星的情况，对应的最大重访时长小于一个轨道周期。对于各地面点的最大重访时长，本申请计算结果与STK计算结果基本一致，偏差在2秒以内；对于各地面点的覆盖时长，本申请与STK计算结果也基本一致，偏差控制在0.012以内。另一个值得注意的结果是，覆盖时间的偏差比第一种情况(构型3/3/1)大，这是因为这种情况下有更多的卫星，轨道和覆盖区域的交叉点更多，覆盖时间更长。因此，由于累积，偏差可能会变大。

[0195] 为说明本申请提供方法的优越性，比较星座的全球覆盖特性计算性能。星座和覆

盖的参数根据参考文献进行设置，该文献中分析了不同Walker星座的全球覆盖最大重访时长，并比较了不同方法的结果。该文献考虑了相同星座的全局覆盖，并通过分析地球上不同的纬度间隔来计算每个星座的最大重访时长，具体结果见表4。表中最大重访时长的前三列均为该参考文献中的数据，最后一列为由本申请提出的方法计算获得。

[0196] 表4全球最大重访时长计算结果对比

[0197]

N/P/F	*i* (deg)	*m/n*	最大重访时长 (分钟)			
			Lang	STK	Yu.R.	本申请
3/3/2	90	161/12	249	249	254	249.359
4/4/0	78	147/11	313	313	316	312.517
5/5/4	84	241/18	222	160*	226	223.582
6/6/0	74	187/14	166	166	168	165.615
7/7/3	90	161/12	103	102	107	102.713
8/8/0	82	174/13	101	100	102	100.168
9/9/7	74	187/14	79	78	83	78.245
10/10/4	84	241/18	106	105	111	106.106
11/11/9	74	187/14	72	71	77	71.363
12/12/6	80	107/8	62	61	66	61.427

[0198] 对于表4中5/5/4构型的星座，STK的计算结果明显小于其他三者的计算结果。该构型下需要分析的特征段长度仅为360/241=1.49度，全球最大重访时长所在的纬度约为12度。选取该纬度上的一个特征段，可按照上述实施例的描述将其分成20小段，其中存在部分小段的最大重访时长相近或相同，最终可得到整个特征段上的最大重访时长分布情况，根据实验结果可知，该纬线上大部分位置的最大重访时长约为118分钟，但少数位置的最大重访时长达到224分钟，因此在STK中很难通过设置地面点捕捉到这样的位置，这也造成了表中计算结果的偏差，这样的偏差在文献中也有体现。因此，本申请可以找到纬线上所有可能的最大重访时长的分布情况，相比选取地面点进行统计的方法更为准确可靠。为了验证上述说法，我们在STK的纬线上设置了100个点，结果表明最大重访时长约为224.15分钟，这与本申请得到的结果是一致的。综上所述，该发明能有效地找到所有可能的覆盖特征，这比现有的网格点法要优越得多。

[0199] 在一个实施例中，一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算装置，包括：

[0200] 覆盖区域二维图生成模块，用于根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图。

[0201] 卫星轨迹投影模块，用于将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0202] 覆盖时刻序列计算模块，用于获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0203] 纬线方向覆盖特性解析模块，用于根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0204] 星座覆盖特性解析模块，用于根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0205] 其中一个实施例中，覆盖区域二维图生成模块用于分别以卫星在惯性空间中的升交点赤经和纬度幅角为X轴和Y轴建立二维坐标系。根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，在二维坐标系中得到对应的地面点和卫星的相互可见区域。

[0206] 其中一个实施例中，卫星轨迹投影模块用于在地固系下获取回归轨道卫星的运行轨迹。根据相对位置关系将运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到回归轨道卫星在二维坐标系中的轨迹线。

[0207] 其中一个实施例中，覆盖时刻序列计算模块用于计算相交线段对应的时段信息。根据得到的时段信息的集合，得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0208] 其中一个实施例中，纬线方向覆盖特性解析模块用于获取回归轨道卫星沿纬线方向的覆盖重复周期。根据覆盖重复周期平移覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0209] 其中一个实施例中，星座覆盖特性解析模块用于在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列，计算回归轨道卫星星座对单个地面点的总覆盖区间序列。在一个回归周期内，根据回归轨道卫星星座中各个回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性，计算回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列。

[0210] 其中一个实施例中，还包括最大重访时间计算模块，用于根据回归轨道卫星星座对纬线的总覆盖区间序列，得到对纬线的最大重访时间。

[0211] 关于一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算装置的具体限定可以参见上文中对于一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法的限定，在此不再赘述。上述回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算装置中的各个模块可全部或部分通过软件、硬件及其组合来实现。上述各模块可以硬件形式内嵌于或独立于计算机设备中的处理器中，也可以以软件形式存储于计算机设备中的存储器中，以便于处理器调用执行以上各个模块对应的操作。

[0212] 在一个实施例中，提供了一种计算机设备，该计算机设备可以是终端，其内部结构图可以如图19所示。该计算机设备包括通过系统总线连接的处理器、存储器、网络接口、显示屏和输入装置。其中，该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统和计算机程序。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该计算机设备的网络接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机程序被处理器执行时以实现一种回归轨道卫星星座对地不连续覆盖的解析计算方法。该计算机设备的显示屏可以是液晶显示屏或者电子墨水显示屏，该计算机设备的输入装置可以是显示屏上覆盖的触摸层，也可以是计算机设备外壳上设置的按键、轨迹球或触控板，还可以是外接的键盘、触控板或鼠标等。

[0213] 本领域技术人员可以理解，图19中示出的结构，仅仅是与本申请方案相关的部分结构的框图，并不构成对本申请方案所应用于其上的计算机设备的限定，具体的计算机设备可以包括比图中所示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者具有不同的部件布置。

[0214] 在一个实施例中，提供了一种计算机设备，包括存储器和处理器，该存储器存储有计算机程序，该处理器执行计算机程序时实现以下步骤：

[0215] 根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区

域二维图。

[0216] 将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0217] 获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0218] 根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0219] 根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0220] 在一个实施例中，提供了一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，计算机程序被处理器执行时实现以下步骤：

[0221] 根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图。

[0222] 将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线。

[0223] 获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列。

[0224] 根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性。

[0225] 根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性。

[0226] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程，是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成，所述的计算机程序可存储于一非易失性计算机可读取存储介质中，该计算机程序在执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。其中，本申请所提供的各实施例中所使用的对存储器、存储、数据库或其它介质的任何引用，均可包括非易失性和/或易失性存储器。非易失性存储器可包括只读存储器(ROM)、可编程ROM(PROM)、电可编程ROM(EPROM)、电可擦除可编程ROM(EEPROM)或闪存。易失性存储器可包括随机存取存储器(RAM)或者外部高速缓冲存储器。作为说明而非局限，RAM以多种形式可得，诸如静态RAM(SRAM)、动态RAM(DRAM)、同步DRAM(SDRAM)、双数据率SDRAM(DDRSDRAM)、增强型SDRAM(ESDRAM)、同步链路(Synchlink) DRAM(SLDRAM)、存储器总线(Rambus)直接RAM(RDRAM)、直接存储器总线动态RAM(DRDRAM)、以及存储器总线动态RAM(RDRAM)等。

[0227] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合，为使描述简洁，未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述，然而，只要这些技术特征的组合不存在矛盾，都应当认为是本说明书记载的范围。

[0228] 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式，其描述较为具体和详细，但并不能因此而理解为对发明专利范围的限制。应当指出的是，对于本领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本申请的保护范围。因此，本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

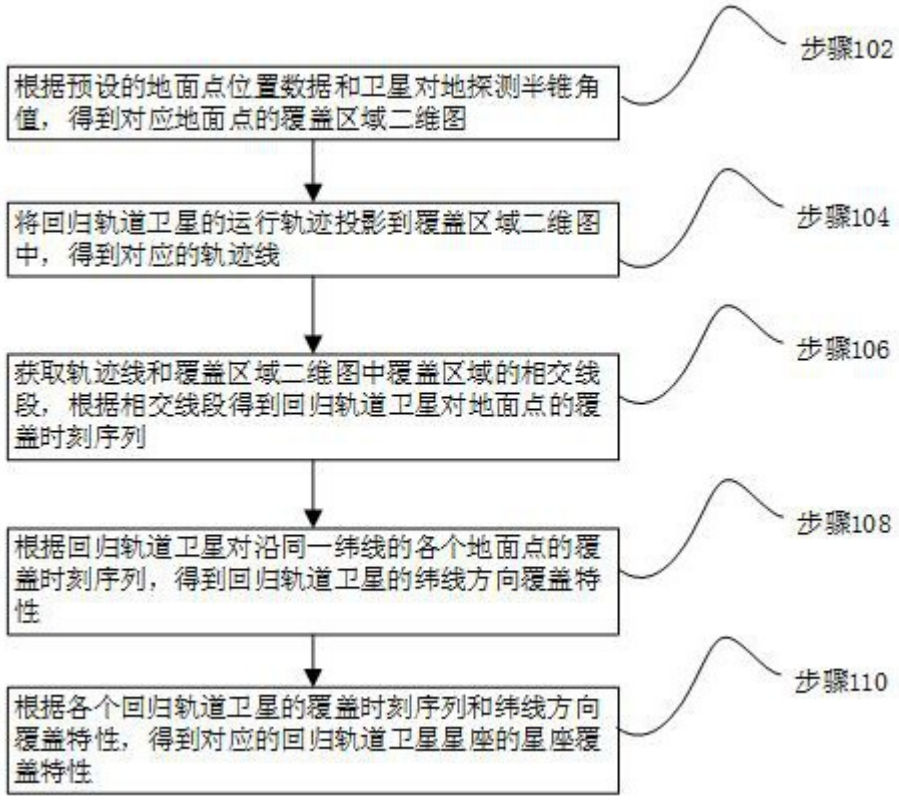

步骤102
根据预设的地面点位置数据和卫星对地探测半锥角值，得到对应地面点的覆盖区域二维图
步骤104
将回归轨道卫星的运行轨迹投影到覆盖区域二维图中，得到对应的轨迹线
步骤106
获取轨迹线和覆盖区域二维图中覆盖区域的相交线段，根据相交线段得到回归轨道卫星对地面点的覆盖时刻序列
步骤108
根据回归轨道卫星对沿同一纬线的各个地面点的覆盖时刻序列，得到回归轨道卫星的纬线方向覆盖特性
步骤110
根据各个回归轨道卫星的覆盖时刻序列和纬线方向覆盖特性，得到对应的回归轨道卫星星座的星座覆盖特性

图1

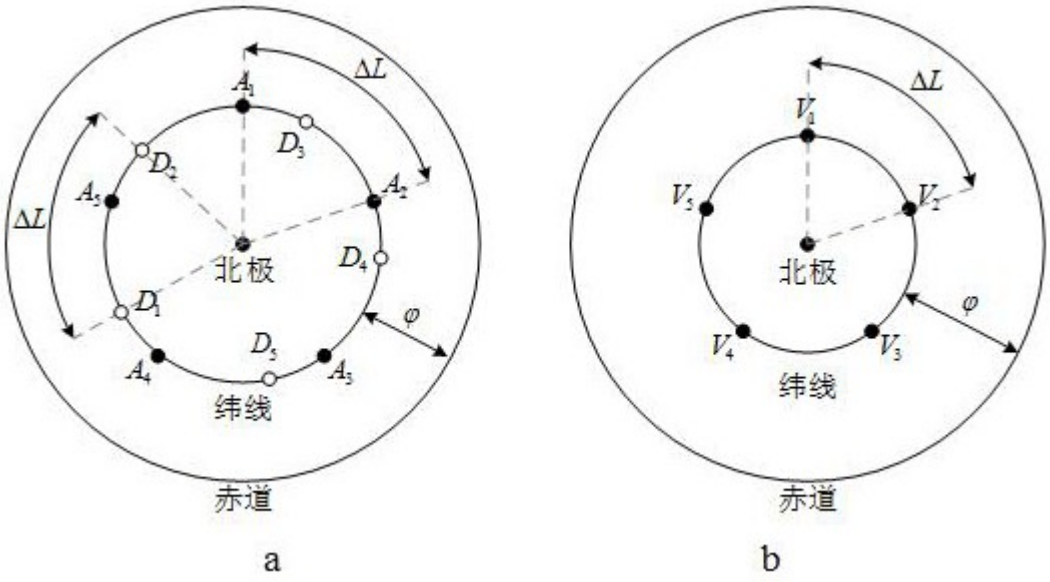

ΔL
A1
D3
D2
A2
A5
ΔL
北极
D4
D1
φ
D5
A4
A3
纬线
赤道
a
ΔL
V1
V5
V2
北极
φ
V4
V3
纬线
赤道
b

图2

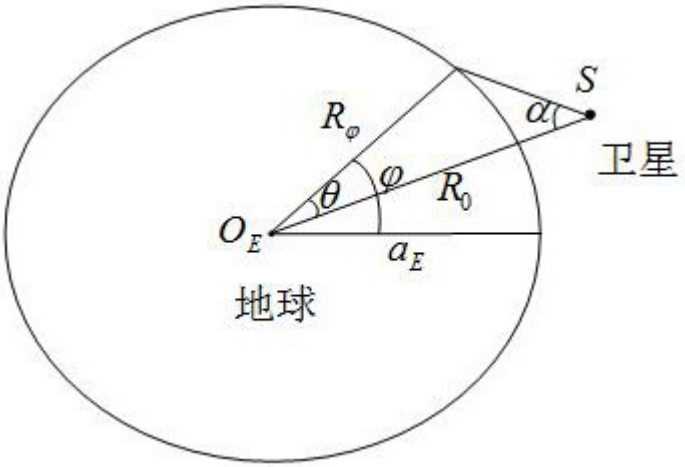

S
R_φ
α
卫星
θ
φ
R_0
O_E
a_E
地球

图3

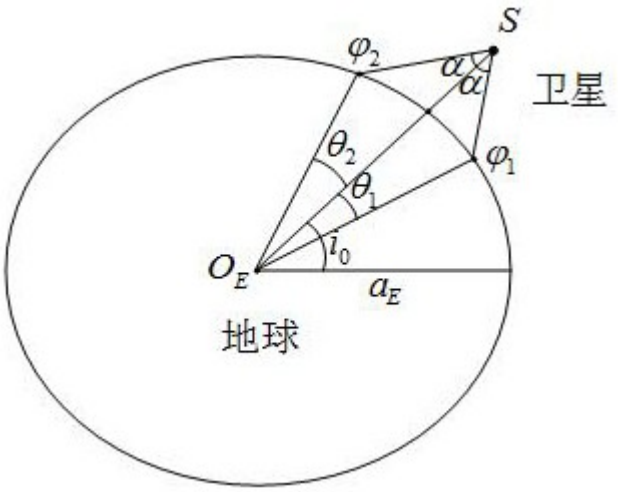

S
φ_2
α
α
卫星
θ_2
φ_1
θ_1
i_0
O_E
a_E
地球

图4

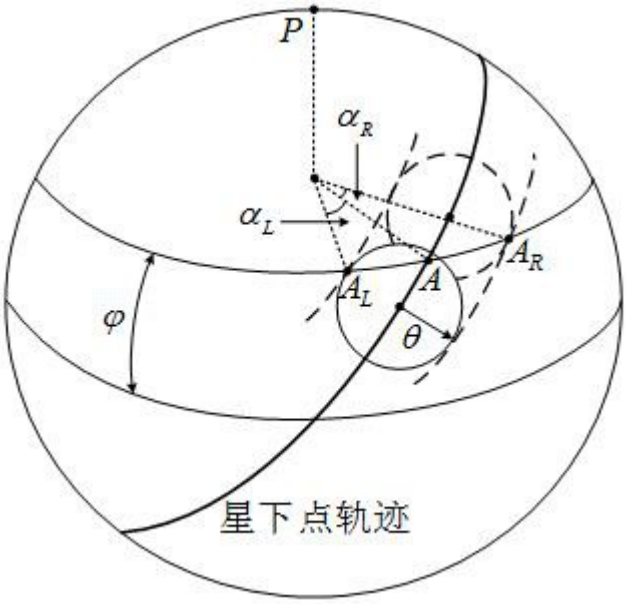

P
α_R
α_L
A_R
A
A_L
φ
θ
星下点轨迹

图5

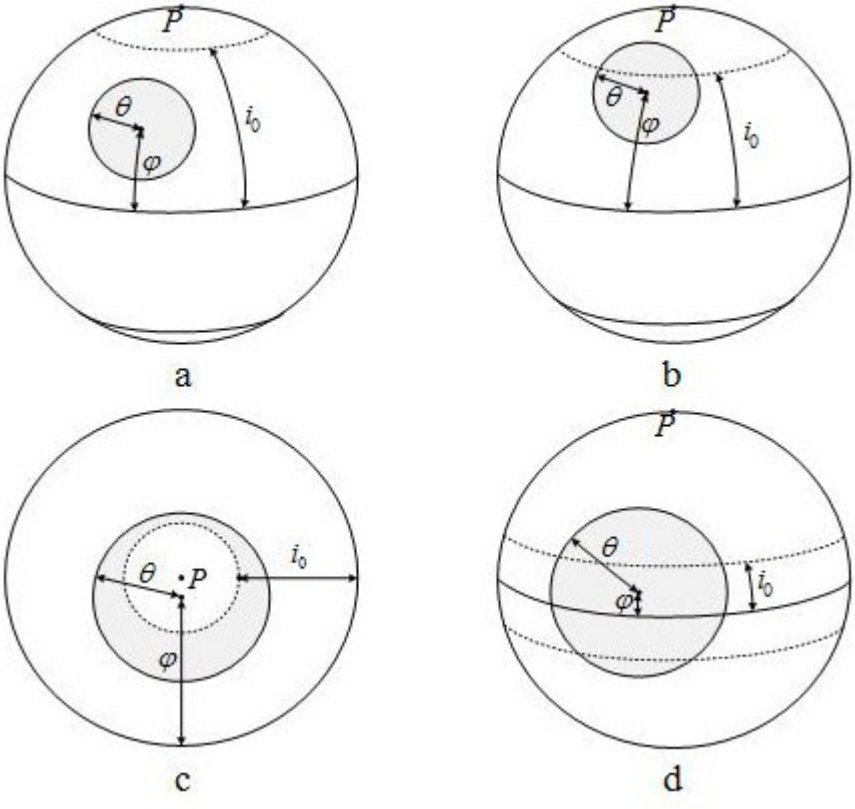

P
θ
φ
i_0
a
b
c
d

图6

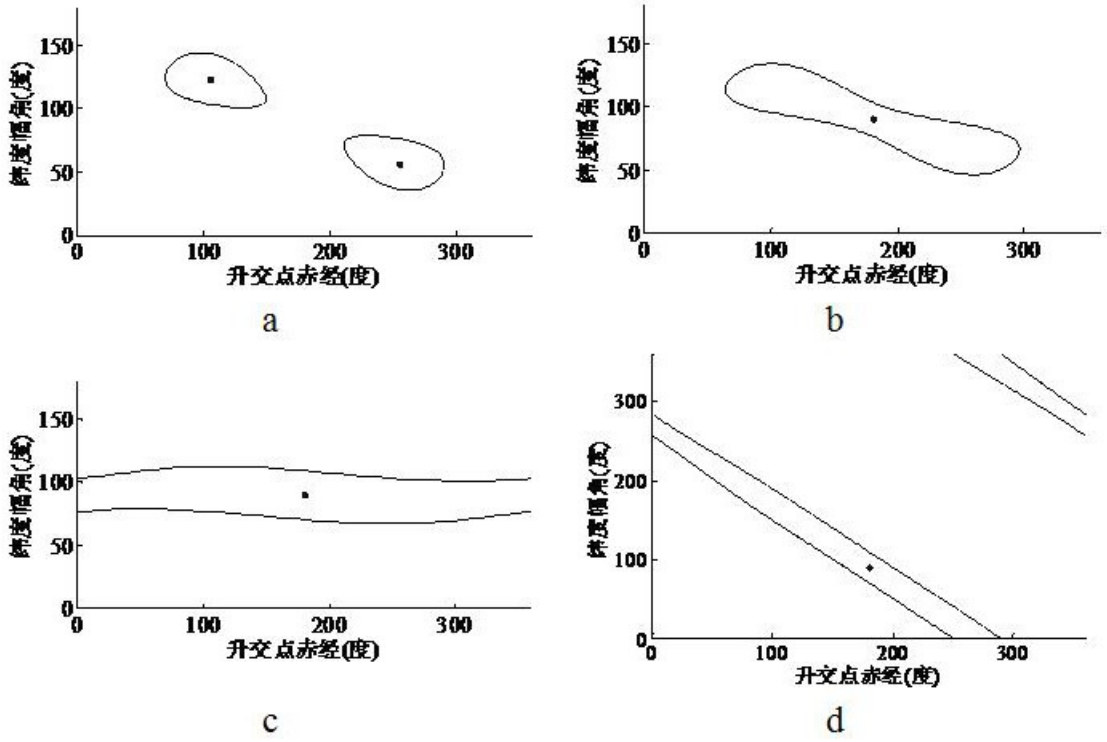

纬度幅角(度)
升交点赤经(度)
0
50
100
150
200
300
a
b
c
d

图7

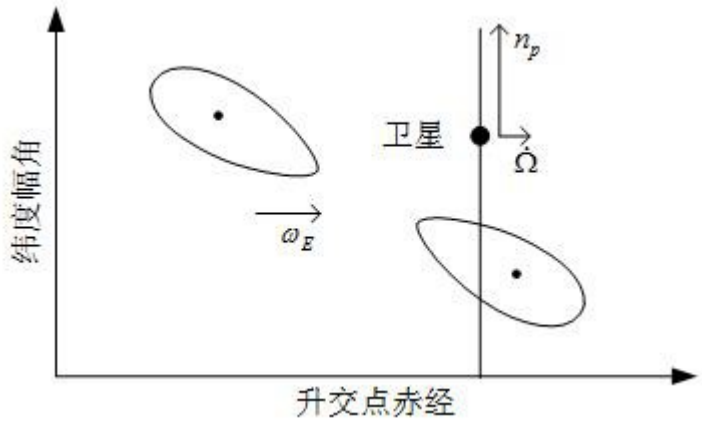

纬度幅角
升交点赤经
卫星
n_p
$\dot{\Omega}$
ω_E

图8

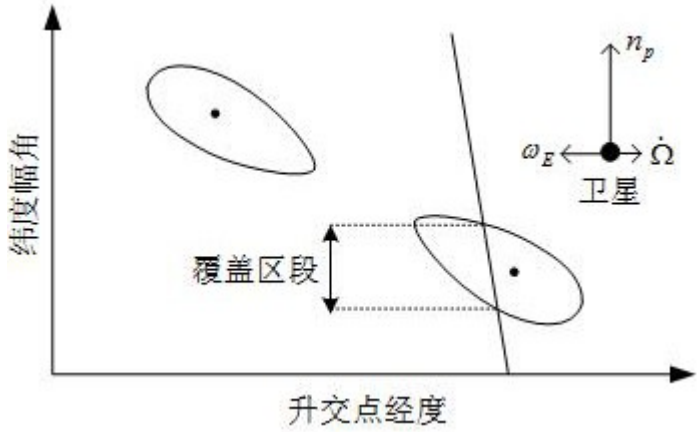

n_p
ω_E
$\dot{\Omega}$
卫星
覆盖区段
纬度幅角
升交点经度

图9

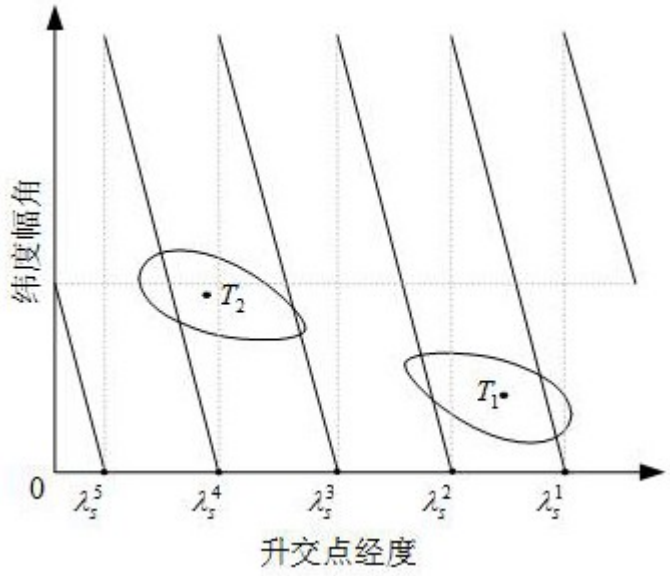

T_2
T_1
0
λ_s^5
λ_s^4
λ_s^3
λ_s^2
λ_s^1
纬度幅角
升交点经度

图10

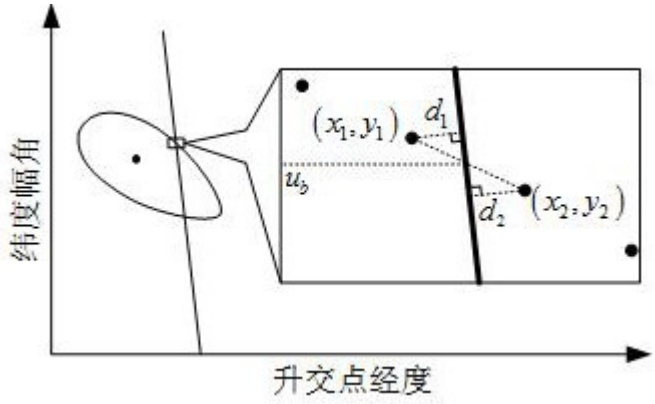

(x_1, y_1)
d_1
u_b
d_2
(x_2, y_2)
纬度幅角
升交点经度

图11

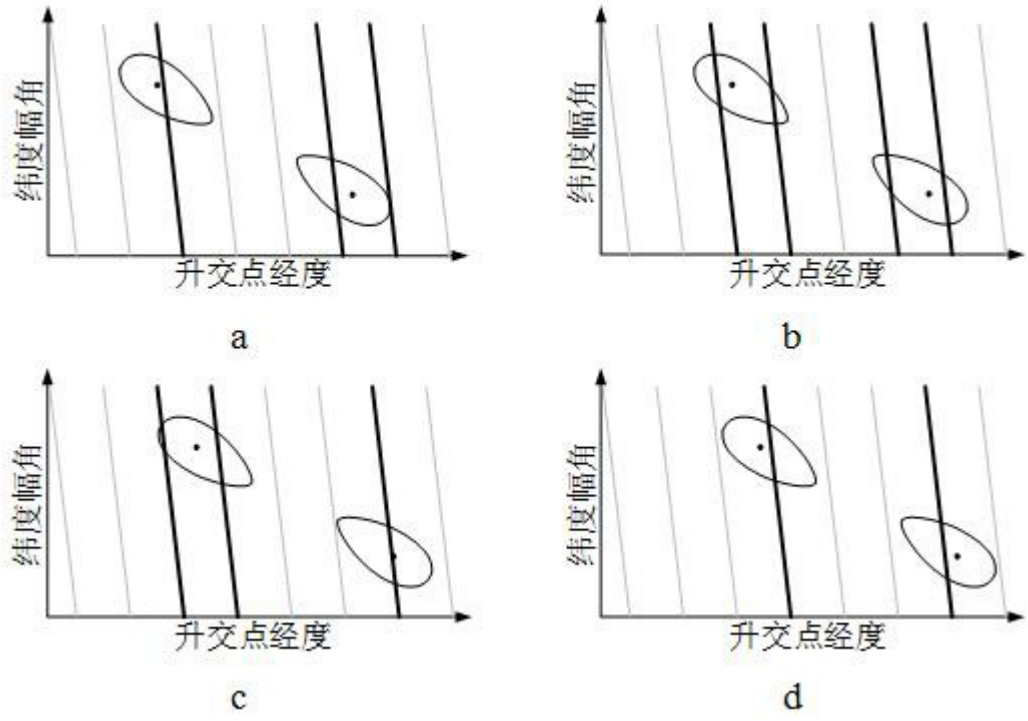

纬度幅角
升交点经度
a
b
c
d

图12

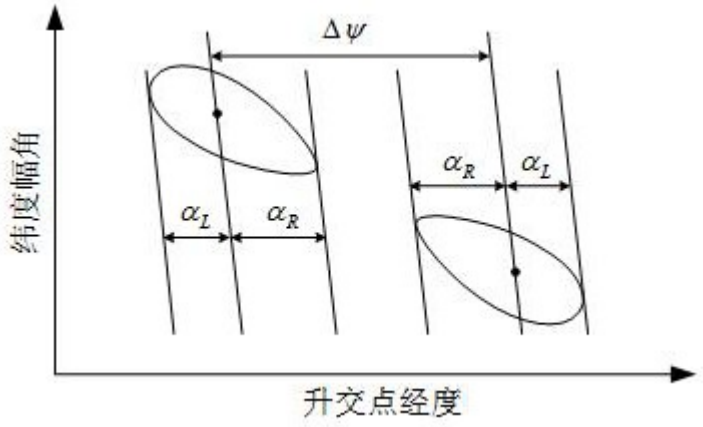

$\Delta\psi$
α_L
α_R
α_R
α_L
纬度幅角
升交点经度

图13

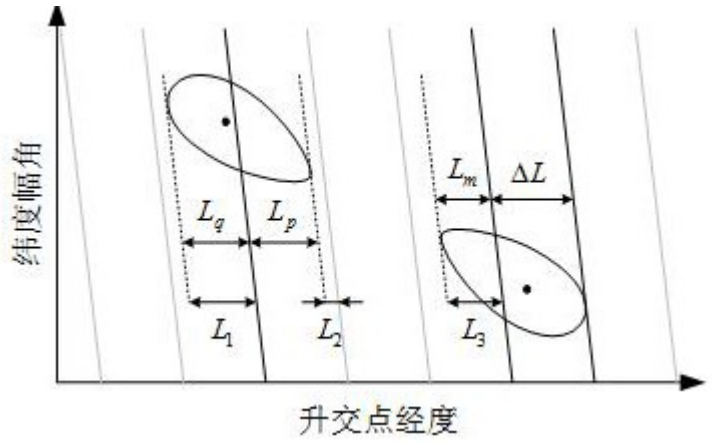


图14

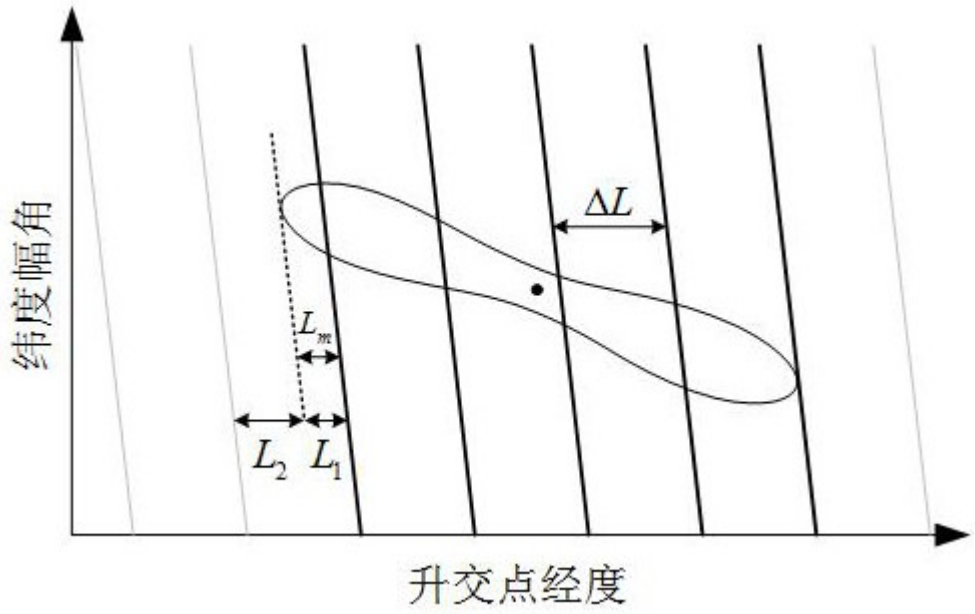


图15

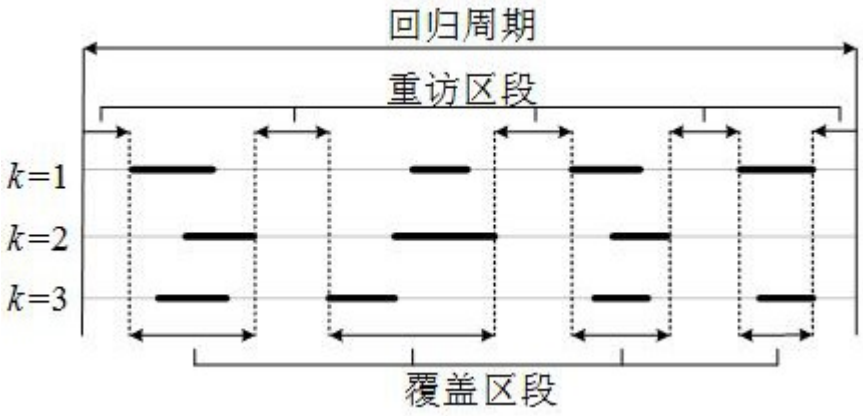


图16

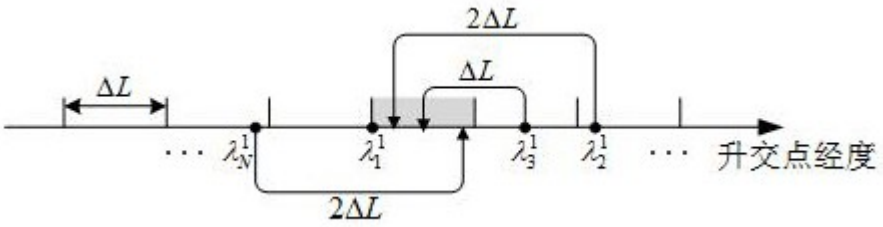


图17

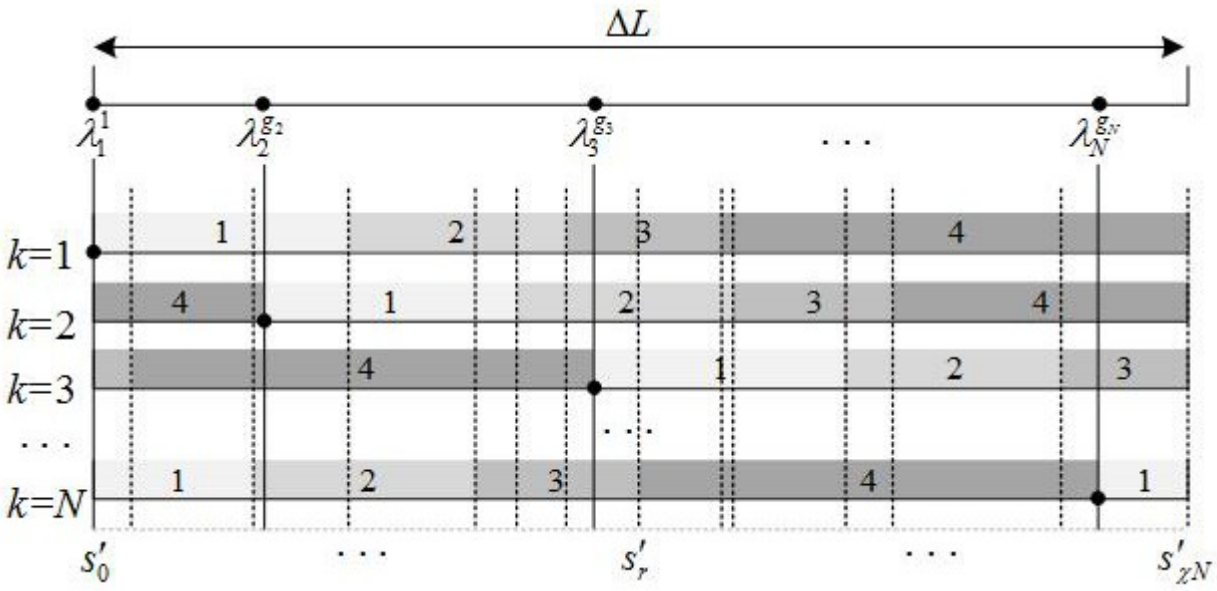


图18

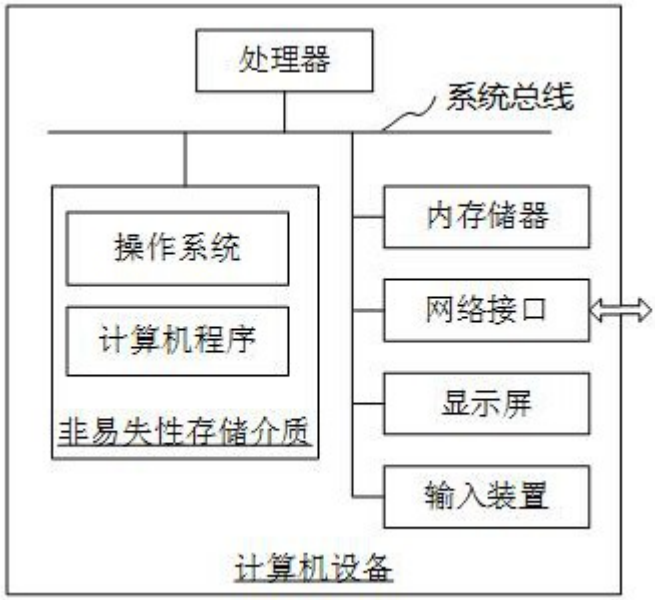


图19