



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112600609 A

(43) 申请公布日 2021.04.02

(21) 申请号 202011370551.9

(22) 申请日 2020.11.30

(71) 申请人 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 陈全 杨磊 赵勇 樊程广 宋新

郭剑鸣 刘贤锋

(74) 专利代理机构 北京奥文知识产权代理事务

所(普通合伙) 11534

代理人 张文 苗丽娟

(51) Int. Cl.

H04B 7/185 (2006.01)

H04L 12/24 (2006.01)

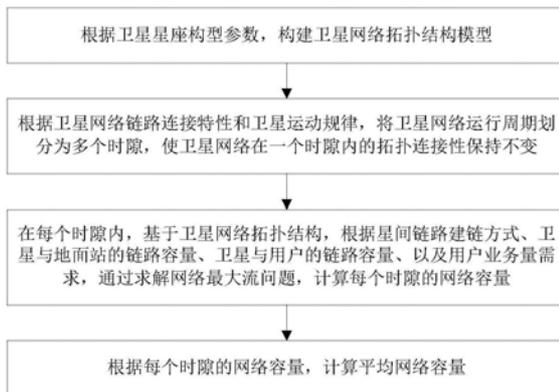
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

卫星网络系统的网络容量估算方法

(57) 摘要

本发明公开了一种卫星网络系统的网络容量估算方法,包括:根据卫星星座构型参数,构建卫星网络拓扑结构模型;根据卫星网络链路连接特性和卫星运动规律,将卫星网络运行周期划分为多个时隙,使卫星网络在一个时隙内的拓扑连接性保持不变;在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量;根据每个时隙的网络容量,计算平均网络容量。本发明能够降低网络容量估算时的计算耗费和对仿真平台的要求,且能够考虑星地连接约束、链路拓扑动态变化、链路容量约束和地面业务量分布的影响,保证估算结果的有效性和可信度。



1. 一种卫星网络系统的网络容量估算方法,其特征在于,包括:

根据卫星星座构型参数,构建卫星网络拓扑结构模型;

根据卫星网络链路连接特性和卫星运动规律,将卫星网络运行周期划分为多个时隙,使卫星网络在一个时隙内的拓扑连接性保持不变;

在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量;

根据每个时隙的网络容量,计算平均网络容量。

2. 根据权利要求1所述的卫星网络系统的网络容量估算方法,其特征在于,卫星网络拓扑结构模型采用以下方式进行构建:

每个卫星采用网络节点进行描述,两个卫星间的星间链路采用连接两个卫星对应的网络节点的无向边进行描述,建立包括网络节点和无向边的卫星网络拓扑结构模型。

3. 根据权利要求1所述的卫星网络系统的网络容量估算方法,其特征在于,所述在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量,包括:

步骤S31,根据星间链路建链方式,生成星间链路邻接矩阵;

步骤S32,在卫星网络拓扑结构模型中添加虚拟地面站节点和虚拟用户节点,构建卫星网络系统拓扑结构模型;

步骤S33,根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态;

步骤S34,获取每个卫星与地面站的链路容量;

步骤S35,计算每个卫星的覆盖区域,获取每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求;

步骤S36,获取每个卫星与用户的链路容量;

步骤S37,根据每个卫星与地面站的链路容量、每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求、以及每个卫星与用户的链路容量,对星间链路邻接矩阵进行扩充,生成扩充邻接矩阵;

步骤S38,基于扩充邻接矩阵,以虚拟地面站节点为源节点,以虚拟用户节点为汇节点,利用最大流问题求解算法求解卫星网络系统的最大流问题,确定一个时隙的网络容量;

步骤S39,针对每个时隙,分别执行步骤S31-步骤S38,获取每个时隙的网络容量。

4. 根据权利要求3所述的卫星网络系统的网络容量估算方法,其特征在于,根据卫星星

座的星间链路建链方式,生成星间链路邻接矩阵为 $M_k = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k \end{bmatrix}_{n \times n}$;

M_k 表示第k个时隙的星间链路邻接矩阵, m_{ij}^k 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 对应的邻接矩阵元素,当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内无星间链路时, $m_{ij}^k = 0$, 当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内

有星间链路时, $m_{ij}^k = C_S(S_i, S_j)$, $C_S(S_i, S_j)$ 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 的星间链路容量, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n, n$ 表示卫星星座中卫星个数, $m_{ii}^k = 0$ 。

5. 根据权利要求3所述的卫星网络系统的网络容量估算方法, 其特征在于, 根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态, 包括:

当卫星与所有地面站的通信仰角均小于最小仰角门限时, 卫星与地面站无星地链路;

当卫星存在与某一个地面站的通信仰角大于最小仰角门限时, 卫星同与其通信仰角最大的地面站建立星地链路。

6. 根据权利要求4所述的卫星网络系统的网络容量估算方法, 其特征在于, 生成扩充邻

$$\text{接矩阵为 } M'_k = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k & m_{1(n+1)}^k & m_{1(n+2)}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k & m_{2(n+1)}^k & m_{2(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k & m_{i(n+1)}^k & m_{i(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k & m_{n(n+1)}^k & m_{n(n+2)}^k \\ m_{(n+1)1}^k & m_{(n+1)2}^k & \cdots & m_{(n+1)j}^k & \cdots & m_{(n+1)n}^k & m_{(n+1)(n+1)}^k & m_{(n+1)(n+2)}^k \\ m_{(n+2)1}^k & m_{(n+2)2}^k & \cdots & m_{(n+2)j}^k & \cdots & m_{(n+2)n}^k & m_{(n+2)(n+1)}^k & m_{(n+2)(n+2)}^k \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} ;$$

M'_k 表示第 k 个时隙的扩充邻接矩阵; 当卫星 S_i 与地面站无星地链路时, 扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = 0$, 且 $m_{(n+1)i}^k = 0$; 当卫星 S_i 与地面站有星地链路时, 扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = C_G(S_i)$, 且 $m_{(n+1)i}^k = C_G(S_i)$; 当 $D(S_i) < C_U(S_i)$ 时, 扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = D(S_i)$, 且 $m_{(n+2)i}^k = D(S_i)$; 当 $D(S_i) \geq C_U(S_i)$ 时, 扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = C_U(S_i)$, 且 $m_{(n+2)i}^k = C_U(S_i)$; $C_G(S_i)$ 表示卫星 S_i 与地面站的链路容量, $D(S_i)$ 表示卫星 S_i 覆盖区域内的用户业务量需求, $C_U(S_i)$ 表示卫星 S_i 与用户的链路容量, $m_{(n+1)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+1)(n+2)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+2)}^k = 0$ 。

7. 根据权利要求1至6中任一项所述的卫星网络系统的网络容量估算方法, 其特征在于, 利用以下公式计算卫星网络系统的平均网络容量:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k)$$

C 表示卫星网络系统的平均网络容量, $C(k)$ 表示第 k 个时隙的网络容量, N 表示时隙数。

卫星网络系统的网络容量估算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及卫星通信技术领域,尤其涉及一种卫星网络系统的网络容量估算方法。

背景技术

[0002] 由于卫星可以不受地形地理条件限制地为全球任意地区用户提供网络服务,针对基于卫星的空间信息网络的研究已成为当前卫星通信领域的研究热点。在现代信息技术、网络通信技术、控制技术的支撑下,不同轨道、种类、功能的卫星通过建立星间/星地链路和网络连接,实现数据传递中继、信息互联互通,能够形成一个可以满足全球-全向-全时需求的天地一体化信息网络系统。

[0003] 在设计卫星网络系统框架、建链模式和路由算法时,均需要利用卫星网络系统的网络容量来评估设计方案或设计算法的可行性和优劣性。网络容量指的是卫星网络系统在单位时间内将数据从源端传输至终端的最大数据流量,网络容量可以衡量卫星网络系统传输数据和提供服务的能力。现有的网络容量估算方法包括基于离散事件处理数据包流转的网络仿真方法和基于简单叠加的估算方法。基于离散事件处理数据包流转的网络仿真方法根据网络系统运行特性和约束,建立数值仿真平台,对网络系统运行中各层级处理操作分别进行建模,包括网络拓扑动态性模型、数据包转发模型、数据包处理排队模型和用户业务模型等的建模;然后,在运行仿真时生成并处理大量的数据包,或对大量数据流进行寻路;最后,采用统计的方法获得卫星网络系统的总体网络容量。基于简单叠加的估算方法通过将各卫星的最大容量或各波束的最大容量进行直接相加以估计卫星网络系统的网络容量。

[0004] 然而,基于离散事件处理数据包流转的网络仿真方法的仿真设置复杂,计算量大,耗时长,且计算耗费随网络系统中节点数的增加而迅速增加,难以实现巨型卫星星座网络系统的仿真要求。基于简单叠加的估算方法未考虑卫星网络系统中节点连接性约束、地面用户业务需求分布、星间链路容量以及拥塞问题,获得的网络容量估计结果仅是最理想情况下的容量,工程指导性差。

发明内容

[0005] 为解决上述现有技术中存在的技术问题,本发明提供一种卫星网络系统的网络容量估算方法。

[0006] 本发明公开了一种卫星网络系统的网络容量估算方法,包括:

[0007] 根据卫星星座构型参数,构建卫星网络拓扑结构模型;

[0008] 根据卫星网络链路连接特性和卫星运动规律,将卫星网络运行周期划分为多个时隙,使卫星网络在一个时隙内的拓扑连接性保持不变;

[0009] 在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量;

[0010] 根据每个时隙的网络容量,计算平均网络容量。

[0011] 在一些可选的实施方式中,卫星网络拓扑结构模型采用以下方式进行构建:

[0012] 每个卫星采用网络节点进行描述,两个卫星间的星间链路采用连接两个卫星对应的网络节点的无向边进行描述,建立包括网络节点和无向边的卫星网络拓扑结构模型。

[0013] 在一些可选的实施方式中,所述在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量,包括:

[0014] 步骤S31,根据星间链路建链方式,生成星间链路邻接矩阵;

[0015] 步骤S32,在卫星网络拓扑结构模型中添加虚拟地面站节点和虚拟用户节点,构建卫星网络系统拓扑结构模型;

[0016] 步骤S33,根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态;

[0017] 步骤S34,获取每个卫星与地面站的链路容量;

[0018] 步骤S35,计算每个卫星的覆盖区域,获取每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求;

[0019] 步骤S36,获取每个卫星与用户的链路容量;

[0020] 步骤S37,根据每个卫星与地面站的链路容量、每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求、以及每个卫星与用户的链路容量,对星间链路邻接矩阵进行扩充,生成扩充邻接矩阵;

[0021] 步骤S38,基于扩充邻接矩阵,以虚拟地面站节点为源节点,以虚拟用户节点为汇节点,利用最大流问题求解算法求解卫星网络系统的最大流问题,确定一个时隙的网络容量;

[0022] 步骤S39,针对每个时隙,分别执行步骤S31-步骤S38,获取每个时隙的网络容量。

[0023] 在一些可选的实施方式中,根据卫星星座的星间链路建链方式,生成星间链路邻

接矩阵为 $M_k =$

$$\begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k \end{bmatrix}_{n \times n};$$

[0024] M_k 表示第k个时隙的星间链路邻接矩阵, m_{ij}^k 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 对应的邻接矩阵元素,当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内无星间链路时, $m_{ij}^k = 0$,当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内有星间链路时, $m_{ij}^k = C_S(S_i, S_j)$, $C_S(S_i, S_j)$ 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 的星间链路容量, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, n$ 表示卫星星座中卫星个数, $m_{ii}^k = 0$ 。

[0025] 在一些可选的实施方式中,根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态,包括:

[0026] 当卫星与所有地面站的通信仰角均小于最小仰角门限时,卫星与地面站无星地链路;

[0027] 当卫星存在与某一个地面站的通信仰角大于最小仰角门限时,卫星同与其通信仰角最大的地面站建立星地链路。

[0028] 在一些可选的实施方式中,生成扩充邻接矩阵为

$$M'_k = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k & m_{1(n+1)}^k & m_{1(n+2)}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k & m_{2(n+1)}^k & m_{2(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k & m_{i(n+1)}^k & m_{i(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k & m_{n(n+1)}^k & m_{n(n+2)}^k \\ m_{(n+1)1}^k & m_{(n+1)2}^k & \cdots & m_{(n+1)j}^k & \cdots & m_{(n+1)n}^k & m_{(n+1)(n+1)}^k & m_{(n+1)(n+2)}^k \\ m_{(n+2)1}^k & m_{(n+2)2}^k & \cdots & m_{(n+2)j}^k & \cdots & m_{(n+2)n}^k & m_{(n+2)(n+1)}^k & m_{(n+2)(n+2)}^k \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} ;$$

[0029] M'_k 表示第k个时隙的扩充邻接矩阵;当卫星 S_i 与地面站无星地链路时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = 0$, 且 $m_{(n+1)i}^k = 0$; 当卫星 S_i 与地面站有星地链路时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = C_G(S_i)$, 且 $m_{(n+1)i}^k = C_G(S_i)$; 当 $D(S_i) < C_U(S_i)$ 时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = D(S_i)$, 且 $m_{(n+2)i}^k = D(S_i)$; 当 $D(S_i) \geq C_U(S_i)$ 时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = C_U(S_i)$, 且 $m_{(n+2)i}^k = C_U(S_i)$; $C_G(S_i)$ 表示卫星 S_i 与地面站的链路容量, $D(S_i)$ 表示卫星 S_i 覆盖区域内的用户业务量需求, $C_U(S_i)$ 表示卫星 S_i 与用户的链路容量, $m_{(n+1)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+1)(n+2)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+2)}^k = 0$ 。

[0030] 在一些可选的实施方式中,利用以下公式计算卫星网络系统的平均网络容量;

$$[0031] \quad C = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k)$$

[0032] C 表示卫星网络系统的平均网络容量, $C(k)$ 表示第k个时隙的网络容量, N 表示时隙数。

[0033] 本发明的卫星网络系统的网络容量估算方法将卫星网络系统的网络容量估计问题通过建模处理转化为网络最大流问题,通过求解网络最大流问题以代替运行复杂的网络仿真,能够降低在进行网络容量估算时的计算耗费和对仿真平台的要求;同时能够考虑星地连接约束、链路拓扑动态变化、链路容量约束和地面用户业务量分布的影响,保证估算结果的有效性和可信度。

附图说明

[0034] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解,构成本发明的一部分,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。在附

[0035] 图中:

[0036] 图1为本发明一实施例的卫星网络系统架构示意图;

[0037] 图2为本发明一实施例的卫星网络系统的网络容量估算方法的流程图;

[0038] 图3为本发明一实施例的卫星网络系统的网络拓扑结构模型示意图。

具体实施方式

[0039] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明具体实施例及相应的附图对本发明技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例仅是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0040] 以下结合附图,详细说明本发明实施例提供的技术方案。

[0041] 参见图1,本发明一实施例以图1所示的卫星网络系统为例,对卫星网络系统的网络容量估算方法进行具体说明。该卫星网络系统中,每个卫星与相邻的四个卫星间建立四个星间链路,相邻的四个卫星包括同一轨道上与该卫星相邻的两个卫星和相邻的两个轨道上与该卫星相邻的两个卫星,四个星间链路包括两个同轨星间链路和两个轨间星间链路。该卫星网络系统采用卫星-地面融合网络模式,来自地面的用户请求通过卫星-用户链路被卫星接收,经星间链路转发后通过卫星-地面站链路接入地面站,地面站作为连接卫星网络与地面网络的网关,将用户请求接入地面网络,使其到达目标服务器,服务器返回下行数据,经地面站-卫星转发返回用户。

[0042] 由于在卫星网络系统为地面用户提供互联网接入服务的应用场景中,卫星-用户链路下行数据量远大于上行数据量,因此,本发明一实施例中,卫星网络系统的网络容量主要考虑地面站-卫星-用户的下行链路数据传输过程。

[0043] 参见图2,本发明一实施例提供了一种卫星网络系统的网络容量估算方法,该方法包括:

[0044] 步骤S1,根据卫星星座构型参数,构建卫星网络拓扑结构模型;

[0045] 卫星星座构型参数包括:轨道面个数 N_p ,每轨卫星数 M_p ,轨道倾角 α 和相位因子 F 。

[0046] 参见图3,本发明一实施例中,卫星网络拓扑结构模型采用以下方式进行构建:

[0047] 每个卫星采用网络节点进行描述,两个卫星间的星间链路采用连接两个卫星对应的网络节点的无向边进行描述,建立包括网络节点和无向边的卫星网络拓扑结构模型。

[0048] 基于上述的模型构建方式,根据卫星星座构型参数,构建相应的卫星网络拓扑结构模型,并将所有卫星对应的节点集记为 S 。

[0049] 步骤S2,根据卫星网络链路连接特性和卫星运动规律,将卫星网络运行周期划分为多个时隙,使卫星网络在一个时隙内的拓扑连接性保持不变;

[0050] 卫星网络链路连接特性包括:各个时刻各卫星间是否有星间链路,以及卫星与地面间的星地链路是否连接。

[0051] 根据卫星网络链路连接特性和卫星运动规律,将卫星网络运行周期划分为 N 个时隙 $T=t(1), t(2), \dots, t(k) \dots, t(N)$,使卫星网络在一个时隙内的拓扑连接性保持不变,即卫星网络在一个时隙内可认为网络拓扑为静态, T 表示卫星网络运行周期, $t(k)$ 表示第 k 个时隙, $k=1, 2, \dots, N$ 。

[0052] 步骤S3,在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量;

[0053] 具体地,本发明一实施例中,在每个时隙内,基于卫星网络拓扑结构,根据星间链路建链方式、卫星与地面站的链路容量、卫星与用户的链路容量、以及用户业务量需求,通

过求解网络最大流问题,计算每个时隙的网络容量,包括以下步骤S31-步骤S39:

[0054] 步骤S31,根据星间链路建链方式,生成星间链路邻接矩阵;

[0055] 具体地,根据卫星星座的星间链路建链方式,生成星间链路邻接矩阵为

$$M_k = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k \end{bmatrix}_{n \times n};$$

[0056] 其中, M_k 表示第k个时隙的星间链路邻接矩阵, m_{ij}^k 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 对应的邻接矩阵元素,当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内无星间链路时, $m_{ij}^k = 0$,当卫星 S_i 与卫星 S_j 在第k个时隙内有星间链路时, $m_{ij}^k = C_s(S_i, S_j)$, $C_s(S_i, S_j)$ 表示卫星 S_i 与卫星 S_j 的星间链路容量, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, n$ 表示卫星星座中卫星个数, $m_{ii}^k = 0$ 。

[0057] 根据每个时隙内卫星星座的星间链路建链方式,能够确定每个时隙的星间链路邻接矩阵。

[0058] 步骤S32,在卫星网络拓扑结构模型中添加虚拟地面站节点和虚拟用户节点,构建卫星网络系统拓扑结构模型;

[0059] 参见图3,在卫星网络拓扑结构模型中添加虚拟地面站节点G和虚拟用户节点U,地面站与卫星间的卫星-地面站链路采用连接虚拟地面站节点和卫星节点的无向边进行描述,用户与卫星间的卫星-用户链路采用连接虚拟用户节点和卫星节点的无向边进行描述,得到卫星网络系统拓扑结构 $W = (V, E)$, $V = \{S, G, U\}$,E表示边集。

[0060] 步骤S33,根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态;

[0061] 具体地,根据每个卫星与地面站的覆盖关系确定每个卫星与地面站的连接状态,包括:

[0062] 当卫星与所有地面站的通信仰角均小于最小仰角门限时,卫星与地面站无星地链路;

[0063] 当卫星存在与某一个地面站的通信仰角大于最小仰角门限时,卫星同与其通信仰角最大的地面站建立星地链路。

[0064] 其中,星地链路指的是卫星与地面站间建立的通信链路。

[0065] 步骤S34,获取每个卫星与地面站的链路容量;

[0066] 具体地,根据卫星与地面站的连接状态、以及卫星和地面站的通信性能,确定卫星与地面站间建立的通信链路的链路容量 C_G 。

[0067] 其中,当卫星与地面站间没有星地站链路时,对应的卫星与地面站间的链路容量视为0。

[0068] 步骤S35,计算每个卫星的覆盖区域,获取每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求;

[0069] 计算确定卫星星座中每个卫星的覆盖区域,确定卫星覆盖区域内的用户以及用户

业务量需求D。

[0070] 步骤S36,获取每个卫星与用户的链路容量;

[0071] 具体地,根据卫星的覆盖区域和卫星的通信性能,确定卫星与用户的链路容量 C_U 。

[0072] 步骤S37,根据每个卫星与地面站的链路容量、每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求、以及每个卫星与用户的链路容量,对星间链路邻接矩阵进行扩充,获取扩充邻接矩阵;

[0073] 具体地,根据每个卫星与地面站的链路容量、每个卫星覆盖区域内的用户业务量需求、以及每个卫星与用户的链路容量,对星间链路邻接矩阵进行扩充,生成扩充邻接矩阵

$$\text{为 } M'_k = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & \cdots & m_{1j}^k & \cdots & m_{1n}^k & m_{1(n+1)}^k & m_{1(n+2)}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & \cdots & m_{2j}^k & \cdots & m_{2n}^k & m_{2(n+1)}^k & m_{2(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{i1}^k & m_{i2}^k & \cdots & m_{ij}^k & \cdots & m_{in}^k & m_{i(n+1)}^k & m_{i(n+2)}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1}^k & m_{n2}^k & \cdots & m_{nj}^k & \cdots & m_{nn}^k & m_{n(n+1)}^k & m_{n(n+2)}^k \\ m_{(n+1)1}^k & m_{(n+1)2}^k & \cdots & m_{(n+1)j}^k & \cdots & m_{(n+1)n}^k & m_{(n+1)(n+1)}^k & m_{(n+1)(n+2)}^k \\ m_{(n+2)1}^k & m_{(n+2)2}^k & \cdots & m_{(n+2)j}^k & \cdots & m_{(n+2)n}^k & m_{(n+2)(n+1)}^k & m_{(n+2)(n+2)}^k \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \circ$$

[0074] 其中, M'_k 表示第k个时隙的扩充邻接矩阵;当卫星 S_i 与地面站无星地链路时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = 0$,且 $m_{(n+1)i}^k = 0$;当卫星 S_i 与地面站有星地链路时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+1)}^k = C_G(S_i)$,且 $m_{(n+1)i}^k = C_G(S_i)$;当 $D(S_i) < C_U(S_i)$ 时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = D(S_i)$,且 $m_{(n+2)i}^k = D(S_i)$;当 $D(S_i) \geq C_U(S_i)$ 时,扩充邻接矩阵元素 $m_{i(n+2)}^k = C_U(S_i)$,且 $m_{(n+2)i}^k = C_U(S_i)$; $C_G(S_i)$ 表示卫星 S_i 与地面站的链路容量, $D(S_i)$ 表示卫星 S_i 覆盖区域内的用户业务量需求, $C_U(S_i)$ 表示卫星 S_i 与用户的链路容量, $m_{(n+1)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+1)(n+2)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+1)}^k = 0$, $m_{(n+2)(n+2)}^k = 0$ 。

[0075] 步骤S38,基于扩充邻接矩阵,以虚拟地面站节点为源节点,以虚拟用户节点为汇节点,利用最大流问题求解算法求解卫星网络系统的最大流问题,确定一个时隙的网络容量;

[0076] 本发明一实施例中,最大流问题求解算法包括Fold-Fulkerson算法和Edmonds-Karp算法。

[0077] 最大流问题是经典的图论问题,其求解方法包括多种,比较常见的一类算法为增广路径算法,具体算法包括Fold-Fulkerson算法,算法的具体实施实现流程可参照以下文献:胡运权,运筹学教程(第四版),清华大学出版社,2012:241-251;马东堂等,通信网络理论与应用,科学出版社,2017:141-151;贾贞,运筹学原理与实验教程,华中师范大学出版社,2008。

[0078] 步骤S39,针对每个时隙,分别执行步骤S31-步骤S38,获取每个时隙的网络容量;

[0079] 具体地,针对不同的时隙,分别执行步骤S31至步骤S38,获取每个时隙的网络容量。

[0080] 其中,在执行步骤S31-步骤S36时,步骤S31、步骤S32、步骤S33-S34、以及步骤S35-

S36的执行顺序可以任意调整。例如,可以依次执行步骤S33-S34、步骤S35-S36、步骤S32和步骤S31。

[0081] 步骤S4,根据每个时隙的网络容量,计算平均网络容量;

[0082] 根据步骤S3获取的卫星网络系统在每个时隙的网络容量,利用以下公式计算卫星网络系统的平均网络容量,平均网络容量可以视为卫星网络系统的网络容量的最终估算结果。

$$[0083] \quad C = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k)$$

[0084] 其中,C表示卫星网络系统的平均网络容量,C(k)表示第k个时隙的网络容量。

[0085] 进一步地,本发明一实施例提供的卫星网络系统的网络容量估算方法用于低轨卫星网络系统的网络容量估算。

[0086] 本发明一实施例提供的卫星网络系统的网络容量估算方法将卫星网络系统的网络容量估计问题通过建模处理转化为网络最大流问题,通过求解网络最大流问题以代替运行复杂的网络仿真,能够降低在进行网络容量估算时的计算耗费和对仿真平台的要求;同时能够考虑星地连接约束、链路拓扑动态变化、链路容量约束和地面用户业务量分布的影响,保证估算结果的有效性和可信度。

[0087] 需要说明的是,在本文中,诸如“第一”和“第二”等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。此外,本文中“前”、“后”、“左”、“右”、“上”、“下”均以附图中表示的放置状态为参照。

[0088] 最后应说明的是:以上实施例仅用于说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

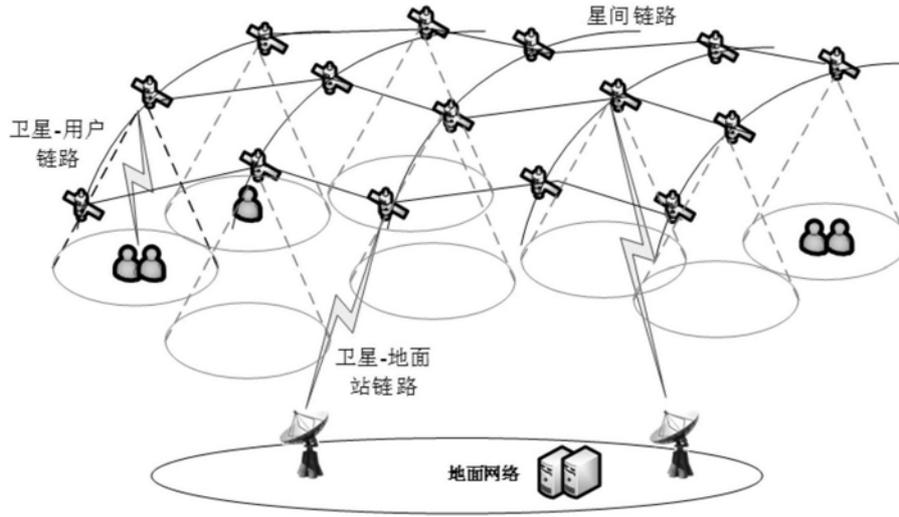


图1

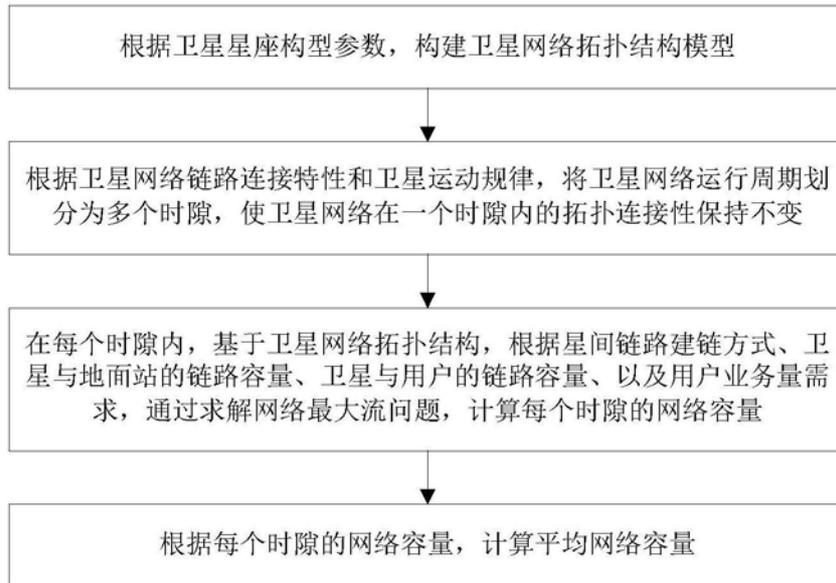


图2

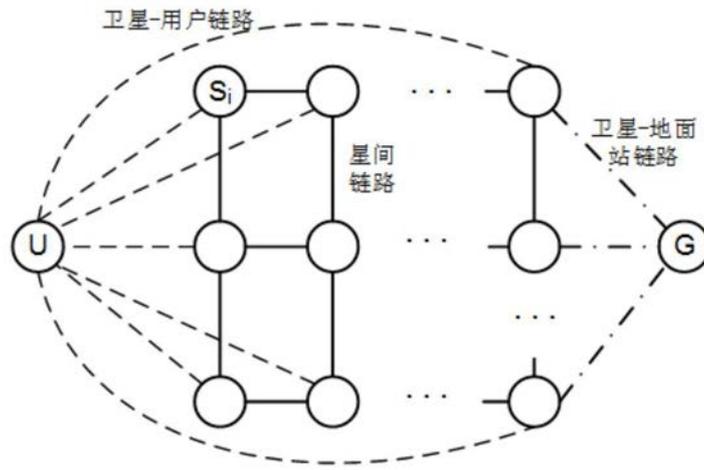


图3