

# 双层规划求解兼顾测量与通信的星间链路设计

张忠山<sup>1</sup>, 谢平<sup>1,2</sup>, 闫俊刚<sup>1</sup>, 谭跃进<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙 410073; 2. 中国航天科技集团公司规划计划部, 北京 100048)

**摘要:** 通过研究当前 GPS 下时分多址(TDMA)体制星间链路方案,并在分析星间链路测量和通信新需求的基础上,提出改进的分时体制星间链路方案,保证了测距和通信的同时隙执行。针对兼顾星间测量和通信的星间链路设计这一多目标优化问题,考虑测量与通信之间的依赖关系,构建双层规划模型求解,上层对星间测量进行优化,下层对星间通信进行优化,并分别设计上层启发式星间测量链路贪婪搜索分配算法(RL-HGSA)和下层基于全局“邻域”搜索的星间路由优化算法(ROA-SGN)。仿真算例表明,根据本文模型和算法构建的星间链路,星间测量链路利用率达到 100%,星间通信采用最短时间最少跳数(MTMJ)的路由策略更优。

**关键词:** 星间链路设计; 双层规划; 时变星间链路; 星间测量与通信

中图分类号: V47.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2016)05-0576-10

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.05.010

## Bilevel Programming for Solving the Inter-Satellite Link Designing Problem While Giving Consideration to Both Ranging and Communication

ZHANG Zhong-shan<sup>1</sup>, XIE Ping<sup>1,2</sup>, YAN Jun-gang<sup>1</sup>, TAN Yue-jin<sup>1</sup>

(1. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Strategy and Planning Department, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

**Abstract:** An improved inter-satellite link scheme is designed which ensures to execute inter-satellite ranging and communication at the same time-slot, based on the study of scheme of inter-satellite links on GPS time division multiple access(TDMA) basis and the analysis of the new requirements of inter-satellite ranging and communication. Considering the inter-satellite link designing of giving consideration to both ranging and communication is a multi-objective optimization problem and the dependence of ranging and communication, a bilevel programming model is put forward, in which the top level optimizes the inter-satellite ranging and the next level optimizes the inter-satellite communication. A ranging link heuristic greedy searching algorithm (RL-HGSA) and an inter-satellite routing optimization algorithm based on searching the global neighborhood (ROA-SGN) are designed. A simulation example is designed to validate the model and algorithm. The result shows the use ratio of ranging links can reach 100% and the minimum time and minimum jump (MTMJ) route strategy is better in communication.

**Key words:** Inter-satellite link designing; Bilevel programming; Time-varying inter-satellite link; Inter-satellite ranging and communication

### 0 引言

卫星导航系统已经成功应用于国防、电力、通信、农业、金融等国家支柱产业并深入到普通民众的

生产生活中,其重要性得到广泛认可<sup>[1-2]</sup>。目前国际上全球导航系统(GNSS)都已加入或正在进行星间链路的建设,GPS 通过星间链路已经实现星座自主导航,并且可以保证系统自主运行 180 天其系统

精度不会降低,极大地提高了系统的抗毁能力<sup>[3]</sup>,正在建设中的 GALILEO 和中国的北斗系统 (COMPASS) 也将加入星间链路的建设。星间链路的加入可为导航系统连续的星间观测,同时也为星地一体化连通提供可能,从而实现“单星通,整网通”以及对星座连续监视的目标<sup>[3-5]</sup>。

星间链路主要采用宽波束与点波束两种形式的星间天线,目前 GPS 的 Block IIR 和 Block IIF 星间链路采用 UHF 频段的宽波束天线<sup>[6-7]</sup>,将来的 Block III 也将是宽波束天线与点波束天线并存,如表 1 所示。可以看出,在各个星间链路阶段,所建链路必须同时支撑星间测量与通信功能。

表 1 GPS 各个阶段建立的星间链路情况<sup>[8]</sup>

Table 1 Status of inter-satellite link in each phase of GPS<sup>[8]</sup>

卫星型号	天线形式	星间链路
Block IIR/Block IIM	UHF 宽波束天线	测量-通信链路
Block IIF	UHF 宽波束天线	测量-通信链路
Block III	UHF 宽波束天线	测量-通信链路
	Ka/V 点波束天线	测量-通信链路

宽波束天线卫星间通信及测距多采用时分多址 (TDMA) 体制, GPS Block IIR 星间链路即采用这种体制,通过合理地时隙划分,规划各卫星的星间业务运行时序<sup>[6]</sup>。星间链路的构建主要实现星间测量和星间通信两大功能<sup>[9]</sup>,星间测量注重于卫星的星间建链数量,单星获得的星间测量数越多,越利于提高系统精度;星间通信注重于星间建链的质量,如星间传输的时延和稳定性等。因此,星间链路的构建优化问题是一个多目标优化问题,要实现星间测量和星间通信的双重目标。在 TDMA 体制下,由于星上波束数量远远小于可以建链的卫星数量,因此要获得足够多的星间测量数据,必须进行波束的切换建链,这使得整个星间链路网络具有时变特征。如何调度星上波束与其他卫星建立链路构成具有时变特性的星间链路网络,使 GNSS 星间链路获得最好的测量和通信效果是待研究的重要问题。

在星间链路网络构建方面,国内外已有研究,如文献<sup>[10]</sup>针对基于固定链路的星间链路设计给出设计流程、原则和方案,文献<sup>[11-12]</sup>针对具有星间链路的多卫星星座,给出星间链路设计的具体步骤,但并非用于导航星座。孙桦等<sup>[13]</sup>针对导航星座提出一种星间链路拓扑变换时间间隔恒定的方案,探索建立位置精度因子 (PDOP) 值最小的星间链路

拓扑结构生成方法,但该方法没有考虑通信的影响,只是利用 Dijkstra 算法计算并比较最短路径、最小跳数和网络流量均衡三种策略下卫星之间通信的最优路径;何家富等<sup>[14]</sup>提出按照时段连续的异轨星间链路方案,所生成的网络拓扑的切换时间间隔最小为 30 s,最大为 115 s,此方案拓扑切换过于频繁,而且时间间隔不定。而文献<sup>[15]</sup>指出,在一定时间内保持不变的拓扑结构在呼叫阻塞 (call blocking) 等性能参数上的表现优于实时更新的动态拓扑。此外,专门针对通信优化的建链方法也已有不少研究:文献<sup>[16]</sup>提出基于连接度最大的双环卫星通信网络链路分配算法,文献<sup>[17-18]</sup>提出以优化网络的拓扑鲁棒性为目标的算法,文献<sup>[19]</sup>在链路构建上着重考虑了负载均衡优化。但兼顾测量与通信需求的星间链路构建方法目前鲜有发表,目前有:文献<sup>[20]</sup>提出一种链路分配算法,在保证星间观测数量最大化的前提下,以降低整网通通信代价为优化目标,结果表明算法性能整体上优于铱星系统所采用的网状链路分配方法的性能,但算法优化目标较单一,不能完整反映导航星座实际工作特点;文献<sup>[21]</sup>针对 GNSS 中星间链路分配方法进行研究,提出一种以卫星位置精度因子最小、同时通信链路代价最小为目标的星间链路设计方法,根据该方法设计的星间链路网络,既能满足卫星的自主定轨要求,也能同时保证网络的连通性和网络的最优通信代价。但以上两篇文献都是针对点波束天线静态拓扑设计的研究。

针对宽波束天线的星间链路构建问题,王东会等<sup>[9, 22]</sup>提出一种星间分组时分测距体制,将整星座所有卫星分为若干组,在测距子帧的每个时隙中,不再只有 1 颗卫星发射信号,而是一组卫星同时发射信号,其它可视卫星进行测距。各卫星组轮流占据时隙发射信号,直到测距子帧结束,但该文分组的思想,只能在组内循环,测距数量决定于组内卫星数量,在分组较多时,单星测距数量仍然较少。文献<sup>[23]</sup>在分析传统 TDMA 体制不足的基础上,根据导航星座星间拓扑结构特点,提出一种适用于导航系统星间组网的可抢占 TDMA 体制,以及该体制下的时隙优化编排算法,有效提高了 TDMA 体制下的网络通信性能,但该算法以提高网络通信性能为最优抢占策略,没有考虑星间测量性能。文献<sup>[24]</sup>通过对星间链路的星间特性进行分析,根据星间链路构建的距离策略、时间策略、资源策略三个方面提出星

间链路周期性建链的策略,实际上是一种分时体制的建链方式。文献[25]针对 GPS 轮询时分体制可以建立的星间链路数量有限的缺陷,提出一种同步时分测距方式,虽然可建立较多的测距链路,但工程实现难度大。

本文分析现有 TDMA 体制下星间链路的建立策略,针对其不足,提出改进的建链策略,使其能够兼顾测量与通信,并建立这一多目标优化问题的数学模型,通过分析星间通信目标对星间测量目标存在依赖关系这一特点,建立双层规划模型求解该问题,设计整体求解流程及上层星间测量链路分配优化算法和下层星间路由优化算法,通过仿真试验校验算法的实用性和优越性。

## 1 问题分析与拓扑构建策略

### 1.1 GPS 系统 TDMA 体制

实际应用方面,星间组网很少单独采用 TDMA 体制,目前仅有 GPS 采用 TDMA 方式控制星座组网观测和可视卫星间的数据交换。GPS 将整个时间轴划分为不断重复的等间隔时间周期,每个周期的时间长度为 15 分钟。每个周期划分为等间隔的 25 个子帧,每个子帧占据 36 s。在各个子帧中,分别定义不同的星间工作内容,第 1 个子帧为测距子帧,剩余子帧为通信子帧。在测距子帧中,分为 24 个时隙,每颗卫星占据一个时隙发射测距信号,其它可视卫星接收信号进行测距,整星座所有卫星轮流占据时隙发射信号,直到测距子帧结束。这种星间测距方式称为轮询时分测距体制<sup>[6]</sup>。在通信子帧中进行星间数据的传输以及其它通信业务。

随着星间链路的发展,轮询时分体制已经不适应于星间链路的功能需求和发展趋势,主要表现在:

(1)从轮询时分测距过程可知,每个时隙内仅有一颗卫星发射测距信号,一个周期内每颗卫星仅发射一次信号。这种测距方式链路利用率较低,未针对联合定轨进行优化,不能完全满足区域监测网卫星导航系统利用星间链路辅助地面站提升定轨精度的需求。

(2)GPS 采用 TDMA 体制仅控制星座可视卫星间的数据交换,并未真正意义上实现星间组网通信的功能,星地数据传输依靠分布在全球的地面站完成,没有通过星间网络进行空间传输,其星间网络更多的关注于支持星座自主导航所需的数据和参数交换<sup>[23]</sup>,无法满足当前星地一体化数据传输的需求。

(3)GPS 的 TDMA 体制将测距子帧和通信子帧分开,测距子帧时无法进行通信,通信子帧时卫星只能在对应的时隙发送数据,等待时隙到达也需要消耗较长时间,这会造成通信时延变大。以 GPS IIR 卫星为例,每颗卫星时隙长度为 1.5 s,最大等待时间至少需要 34.5 s,如果其还间隔测距子帧,则等待的时间将超过 100 s,不能满足应急信息的时延要求,对于突发性任务,以及未来卫星网络的大数据传输实时性要求不能适应。

针对以上问题,本文提出一种时分体制,兼顾星地测距联合定轨和星间通信功能,并能实现星间测量和通信同时进行。

### 1.2 兼顾测量与通信的时分体制时变星间链路

本文提出的时分体制星间链路示意图如图 1 所示。每个时隙周期  $\Delta t$ (两个时间片)内所有卫星进行分组测量与通信,时隙结束后进行切换。考虑到在一个时隙内,两颗卫星间可获得相互反向的一对测距数据,可有效分离轨道及钟差<sup>[6]</sup>,并消除影响星间测距的大部分系统误差和相关性误差<sup>[26-27]</sup>,星间链路采用半双工模式的双向测量,即双单向测量,卫星某一时刻只能处于接收或发射状态,不能同时接收和发送信号,如图 1(a)所示,但每个时隙内两颗卫星可以实现双向测量与通信,如图 1(b)所示。同时,为降低星座内部卫星间的干扰,在任意时刻每颗卫星最多只存在一条星间链路。

由图 1 可以看出,本文设计的星座拓扑结构体现了时变特征。每个时隙内,星座拓扑保持不变,只是在不同的时间片下交换收发顺序,且星座某一时刻并不是连通的,但是在多个时隙组成的更长的考察周期内,保证了整个星间链路网络的全连通。

时分体制确定以后,本文参考 GPS 下 TDMA 体制等间隔时间周期的划分方式,并借鉴文献[13]中拓扑切换时间间隔恒定和文献[20]中划分可视性周期的思想,并且文献[15]指出,在一定时间内保持不变的拓扑结构在呼叫阻塞(call blocking)等性能参数上表现优于实时更新的动态拓扑。由此本文提出了网络拓扑周期变换的概念,如图 2 所示。

将整个星座运行周期划分为若干个等间隔的拓扑周期,每个拓扑周期划分为若干个等间隔的测量周期,每个测量周期内都是一个整网的动态拓扑,由若干个时隙周期的静态拓扑组成。同一个拓扑周期不同测量周期内的动态拓扑相同,不会发生变化,只

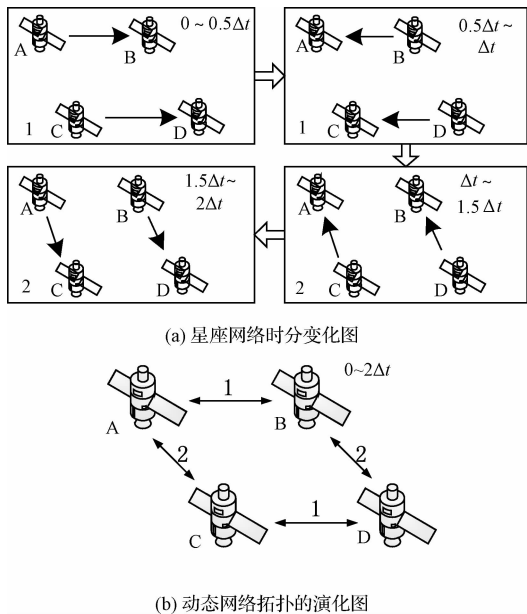


图1 兼顾测量与通信的时分体制下时变切换拓扑  
Fig.1 Time-varying switching topology under TDMA applicable to ranging and communication

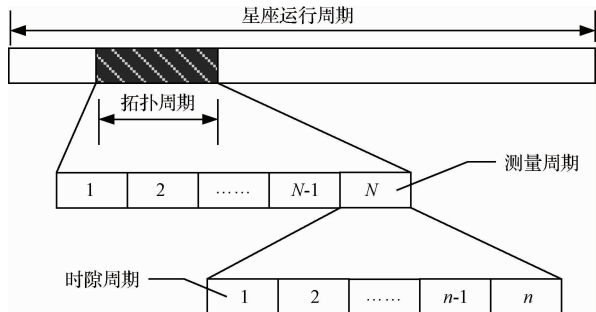


图2 基于拓扑变换的星间链路方案  
Fig.2 Scheme of inter-satellite link based on topology transformation

是为了收集更多的测量值。

因此,星间链路网络拓扑构建问题即归结为每个测量周期内星上波束如何分配建链的问题。星间链路的构建需要满足星间测量和通信两大功能,而且通信功能的实现要在测量链路建立的基础上完成,星间测量优化的结果对星间通信优化有直接指导作用,星间通信优化对星间测量结果具有依赖关系,针对这种情况,本文提出用双层规划的思想求解该多目标优化问题。

### 1.3 双层规划理论

双层规划问题一般描述为;上层先给定一个决策,下层各子系统则以这个决策为参量,根据自己的目标在可能的范围内选定一个最优决策,并将自己

的最佳反应反馈给上层,上层再在下层的最佳反应的基础上,在可能的范围内作出整体的最优决策。在双层规划模型中,位于不同层次的决策者控制着相应的决策变量,并优化各自的目标函数。上层决策者首先做出决策,下层根据上层的决策方案以优化个人的目标函数进行反应。因为双方可供选择的策略集是相互依赖的,上层的决策会影响下层的决策和目标的实现,反之亦然。

双层规划与一般常规的单层规划模型不同,其约束条件中包含一个或多个规划模型<sup>[28]</sup>,且双层规划与多目标优化问题又有本质区别,虽然两者都具有两个或两个以上的目标函数,但是前者的目标函数之间存在层次区别,主从决策关系分明,而后者并无目标函数以及主从决策变量之间的层次区别。双层规划的问题可以用以下一般模型来描述:

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \tag{1}$$

s. t.

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \tag{2}$$

式中  $\mathbf{y}$  是如下问题的解:

$$\min f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \tag{3}$$

s. t.

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \tag{4}$$

式中:上层决策者控制的变量为  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$ , 下层决策者控制的变量为  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \in \mathbf{Y} \in \mathbf{R}^m$ ,  $F(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为上层规划的决策目标,  $G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0$  是上层规划的约束条件,  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  是下层规划的目标函数,  $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0$  是下层规划的约束条件。

## 2 具有时变特征的动态星间链路网络构建模型

本节利用双层规划的思想求解具有时变特征的动态星间链路网络构建,建立问题求解数学模型和求解流程。

### 2.1 双层规划求解时变星间链路拓扑构建流程

双层规划求解时变星间链路拓扑构建的流程如图3所示。

### 2.2 具有时变特征的动态星间链路网络优化数学模型

具有时变特征的动态星间链路网络规划的上层规划是针对星间测量的优化,星间测量的评价指标主要是 PDOP 值,而 PDOP 值与单星测量数有直接关系,本文以单星最大化无重复测量率为优化目标,建立数学模型如下:

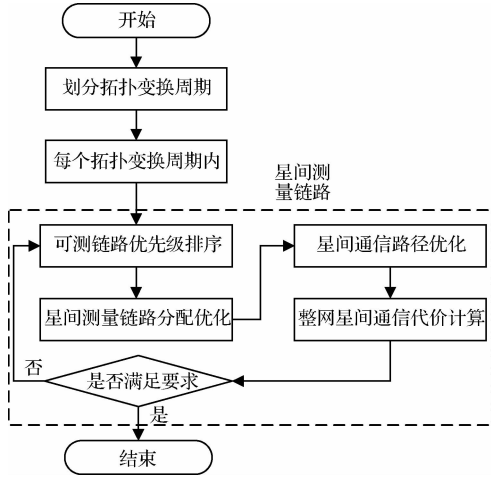


图3 双层规划求解时变星间链路拓扑构建流程图

Fig. 3 The flow chart of solving the time-varying topology building by bilevel programming

卫星:  $S = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, s\}$

星间链路拓扑:  $T = [L^1 \ \dots \ L^k \ \dots]$

拓扑  $T$  的时间范围内卫星  $i$  的可视卫星集合:

$S_{\text{visible}}^i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_n^i\}$ ,  $v_i \in S$ , 定义参数  $V_{\text{count}}^i$  为集合  $S_{\text{visible}}^i$  的元素个数。

第  $k$  个时隙的拓扑矩阵:

$$L^k = \begin{bmatrix} l_{1,1}^k & l_{1,2}^k & \dots & l_{1,s}^k \\ l_{2,1}^k & l_{2,2}^k & \dots & l_{2,s}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{s,1}^k & l_{s,2}^k & \dots & l_{s,s}^k \end{bmatrix}$$

$$l_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{卫星 } i \text{ 和 } j \text{ 在第 } k \text{ 个时隙有链接} \\ 0, & \text{卫星 } i \text{ 和 } j \text{ 在第 } k \text{ 个时隙无链接} \end{cases}$$

式中:  $\forall j | \sum_{i=1}^s l_{i,j}^k = 1$ ,  $\forall i | \sum_{j=1}^s l_{i,j}^k = 1$ , 且  $l_{i,i}^k = 0$ ,

$l_{j,i}^k = l_{i,j}^k$ , 矩阵  $L^k$  为对称矩阵。

定义  $l_i^k$  为卫星  $i$  在第  $k$  个时隙的链接卫星, 则

$l_i^k \in S$ , 且  $l_i^k \in S_{\text{visible}}^i$ 。

优化目标: 单星最大化无重复测量率, 这里统计的是单星无重复测量链路数与可测卫星总数的比值, 因为在短时间内单星的重复测量对定轨精度提升不大。

为了去除重复测量的链路, 定义一个映射集合

$p_i^k$  与  $l_i^k$  形成映射关系,  $\{p_i^k\} \in \{l_i^k\}$ , 且

$$p_i^k = \begin{cases} l_i^k, & l_i^k \notin \{p_i^k\} \\ 0, & l_i^k \in \{p_i^k\} \end{cases}$$

再定义集合  $\{n_i^k\}$ , 有

$$n_i^k = \begin{cases} 1, & p_i^k \neq 0 \\ 0, & p_i^k = 0 \end{cases}$$

卫星  $i$  的无重复测量率为:

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^K n_i^k}{V_{\text{count}}^i} \quad (5)$$

优化目标即是  $R_i$  的最大化。

具有时变特征的动态星间链路构建的下层规划是针对星间通信的优化, 星间通信优化是在星间测量链路建立的基础上对星间路径的优化, 不能改变星间拓扑, 但会对星间拓扑的构建产生影响, 星间通信的优化结果会反馈到上层的星间测量优化中, 改进星间测量方案。

通信代价:

$$\text{矩阵 } C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,s} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{s,1} & c_{s,2} & \dots & c_{s,s} \end{bmatrix}, \text{ 表示通信代价}$$

矩阵。其中:  $c_{i,j}$  表示  $i$  星到  $j$  星的通信代价, 且当  $i=j$  时无意义, 需要指出的是, 矩阵  $C$  不是对称矩阵。

下层星间通信的优化目标是整网通信代价最小:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1, j \neq i}^s c_{i,j} \quad (6)$$

下层星间通信的优化目标是最小化  $C_{\text{total}}$ 。需要指出的是,  $c_{i,j}$  作为决策变量是星间通信链路的综合评价价值, 可以考虑时延、跳数、接受信号载噪比等因素。

### 3 求解算法

#### 3.1 上层星间测量优化求解

上层的星间测量链路分配优化问题以单星最大无重复测量数为优化目标, 本文基于“可测全测”的原则和思想, 设计一种启发式星间测量链路贪婪搜索分配算法 (RL-HGSA)。首先对星间可见性进行分析, 得到所有星间可测链路集合  $J$ , 然后轮询  $J$  中每一个星间可测链路, 针对该链路顺序循环每一个时隙, 直到某一时刻能安排该链路。此算法能够最大化分配可测链路, 如图4所示。

当所有能够顺利插入各时隙的可测链路全部分配完后, 再从大到小循环每个时隙插入可测链路, 此次插入的链路将是重复测量的链路。经

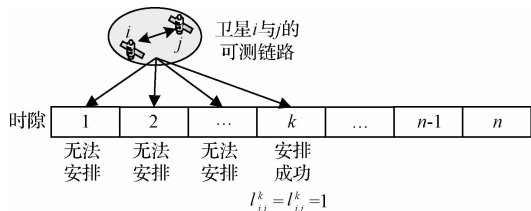


图4 启发式星间测量链路贪婪搜索分配算法

Fig. 4 Heuristic greedy search assignment algorithm of inter-satellite ranging links

过两轮插入,一方面能够保证在此顺序下可测链路已经最大化安排,另一方面能够保证所有时间片内可测链路已经最大化安排。算法流程参见图5。

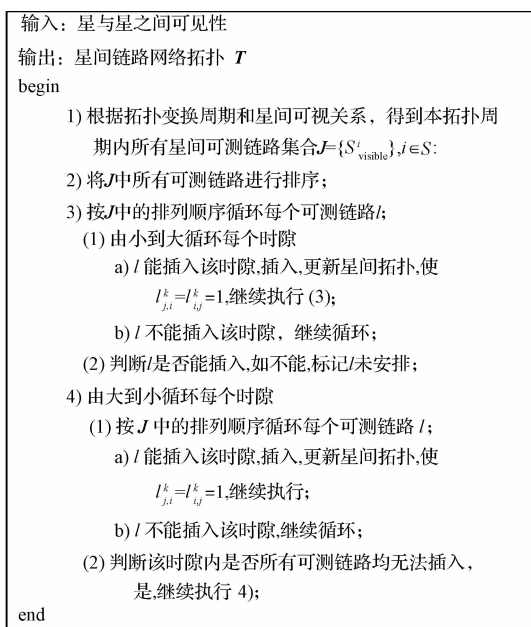


图5 星间测量链路分配优化算法

Fig. 5 Optimization algorithm for assigning inter-satellite ranging links

由上述算法容易看出,星间测量链路分配结果与星间可测链路的顺序有直接关系,通过变换星间可测链路的顺序,可以得到不同的星间测量链路分配方案。随机排列下,贪婪遍历所有排列的算法复杂度为  $n!$ , 复杂度较高,不能完全遍历,只能通过遍历次数来控制,且不能保证结果的优化。因此,本文利用遗传算法中交叉操作产生子代种群的思想,通过交叉操作产生新的排序方式,交叉方式主要有单切点交叉和多切点交叉,本文选取单切点交叉方式。

### 3.2 下层星间通信优化求解

星间通信优化即是对星间路由的优化,对于全

连通的网络,节点与节点之间有多条路径可选,如何选择最优的路径是规划要解决的问题。需要指出的是,一旦星间测量拓扑和代价计算策略确定,星间路由是客观确定的,本层优化主要是求解具有时变特征的星间链路网络的最优路由策略及该策略下的最优星间网络拓扑。

具有时变特征的星间链路网络传输有其自身特点,如图6所示,在某一时隙持续过程中,起始卫星将信息传输给与其建立链路的卫星,在该时隙结束后,会有两颗卫星拥有需要传输的数据包,并将两颗得到信息的卫星也看作起始卫星,由此类推,若星座是全连通的,则在经过若干个时隙后的某一时刻,所有目的星一定会得到传输的数据。

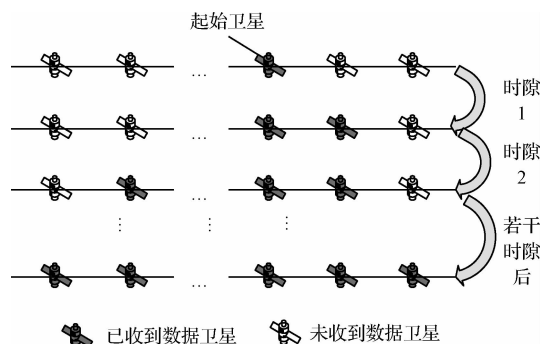


图6 具有时变特征的星间链路网络传输

Fig. 6 Inter-satellite network transmission with time-varying characteristic

由图6可以看出,由于时分体制星间链路的特点,在传输过程中,不仅传输时间是通信要考虑的因素,星间传输跳数也将是星间通信要考虑的重要因素,跳数是指由源星到目的星经过了几个中转星,随着中转星数目的增多,传输的不稳定性会大大提升,例如数据传输中误码率会随着中转次数的增多而急剧增加。

综合考虑时间和跳数因素,时分体制下星间通信考虑两种路由策略:最短时间下最少跳数策略(MTMJ)和最少跳数下最短时间策略(MJMT)。前者是首先考虑在最短的时间内将数据传输到目的星,然后从所有路径中选出跳数最短的;后者是首先考虑在最少的跳数下将数据传输到目的星,然后从所有路径中选出耗时最少的。需要指出的是,此处的时间是指因为时隙等待带来的延迟,不考虑星间传播的延迟,因为相对于时隙等待带来的延迟时间(3 s的整数倍),传播延迟可以忽略不计。

针对动态网络的路由,文献[31]针对低轨和中轨卫星动态变换的网络,为了增加卫星网络的健壮性,提出一种有效的动态路由算法,仿真结果显示,与传统的路由算法相比,该算法更有效、更可靠,花费更少的传输消耗并且聚合更快。此外,演化图理论是解决动态网络的重要方法,利用演化图理论求解卫星及其它网络路由问题已有相关研究<sup>[32]</sup>,在利用演化图理论对动态卫星网络路由的研究中,文献[33-34]针对多层卫星网络,引入图论理论,对分时隙通信的卫星网络拓扑进行了演化图建模,并在演化图模型中根据Dijkstra算法设计了新的路由算法;王彦等<sup>[24,35]</sup>基于演化图建立了导航星座动态网络拓扑的时变模型,给出了数据结构描述,并提出了相应的路由算法。文献[36]针对时分卫星网络的IP层卫星网络路由问题,用演化图模型进行建模,提出了一种基于蚁群优化的演化图QoS路由算法,对两点间最早路径进行了遍历。但上述研究的路由策略都是基于单一目标的路由策略,如文献[33-34]分别对点与点之间的最短路径、最先路径和最快路径设计了路由算法,而文献[24,35]分别对最早到达和最小跳数路径算法进行了设计。目前文献中还没有同时兼顾两种及以上策略的路由。

本文借鉴演化图理论,建立如图1所示的演化图模型,但对于具有时变特征的星间通信路由计算,因为其时变的特性,没有持续连通的星间通信路径,也不能以某单一方面的目标策略进行优化,这样会导致另一方面的通信性能降低,因此,传统的Dijkstra等算法已不适用于具有该特性的网络,为此,本文提出了考虑多种路由策略组合下基于全局“邻域”搜索的星间路由优化算法,将与当前卫星有测量链路卫星作为该星的“邻域”卫星,此处“邻域”卫星指全局的所有时间片中与当前卫星有测量链路的卫星,通过遍历所有“邻域”卫星,得到该星到目的卫星的最优路径(最小代价的路径)。算法能够解决两种路由策略组合下的路由路径求解问题,具体算法见图7。

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数设置

文献[29]证明了最佳的卫星导航星座是3个轨道面和30颗中轨卫星的星座。GPS III也将采用

```

输入: 星间测量网络拓扑  $T$ , 代价统计集合  $CS = \emptyset$ 
输出: 星间路由表  $SR$ 
begin
  1) 循环集合  $S$  中每个卫星  $s$  作为起点星, 加入起点星集合  $BS$ , 其他星作为目的星, 加入目的星集合  $DS$ ;
  2) while( $DS \neq \emptyset$ )
    (1) 循环  $BS$  中每个起点星  $bs$ 
      a) 以  $bs$  为起点, 全局查找其“邻域”卫星集合  $LS$ ;
      b) 遍历  $LS$  中卫星  $ls$ ,  $ls$  如果在  $DS$  中, 将  $bs$  和  $ls$  及路径和代价插入代价统计集合  $CS$ , 否则, 放弃, 继续执行b), 直至结束;
    (2) 循环  $DS$  中每个目的星  $ds$ 
      a) 查找  $CS$  的  $ls$  中是否存在  $ds$ , 否, 继续执行2), 是, 执行b);
      b) 查找  $CS$  中所有到达  $ds$  的路径, 找到其最小代价的路径, 将作为起始星  $s$  到达目的星  $ds$  的路径, 加入路由表  $SR$ ;
      c) 将  $ds$  作为新的起始星加入集合  $BS$ , 从  $DS$  中删除  $ds$ ;
end
  
```

图7 星间路由优化算法

Fig. 7 Optimization algorithm for assigning inter-satellite route

3个轨道面或6个轨道面的星座<sup>[30]</sup>,3个轨道面的设计是导航卫星星座的发展趋势,本文仿真算例采用3个轨道面设计,并保持卫星数量为24颗,与GPS相同,具体算例参数如表2所示。

表2 仿真参数设置

Table 2 Parameters settings of simulation

参数名称	参数设置	备注
仿真开始时间	2015-05-09 00:00:00	
仿真结束时间	2015-05-10 00:00:00	
导航星座	Walker 24/3/2	半长轴 27000 km 轨道倾角 55 度
拓扑变换周期	15 min	与 GPS 相同
星座测量周期	36 ~ 60 s	
时隙	3 s	
星上天线波束数量	1	波束扫描俯仰角 60°, 方位角 360°
通信代价计算模型	$\alpha \times$ 跳数代价 + $\beta \times$ 时延代价	$\alpha + \beta = 1$
星间通信速率	无限大	保证数据包在一个时隙内能传完

## 4.2 仿真结果分析

### 4.2.1 测量性能分析

根据文章对分时星间链路结构的设计,各个拓扑周期之间的星间拓扑相互独立,因此首先对仿真时段内第一个拓扑周期(2015-05-09 00:00:00 至 2015-05-09 00:15:00)的星间测量指标进行

分析。

因为 GPS 中一个时隙是 1.5 s, 36 s 有 24 个时隙, 能够测量 24 次, 而本文考虑交互测量和通信, 设计 3 s 为一个时隙, 36 s 只能测量 12 次, 但经过计算单星平均可测量链路为 16 次左右, 显然 36 s 作为一个测量周期测量效率较低, 已不能满足可测全测的需求。本文试验 36 ~ 60 s 这个时间范围内所有可能的测量周期(15 分钟的拓扑变换周期, 只有 36 s, 45 s, 48 s, 60 s 有完整的测量周期), 根据星间测量链路分配优化算法得到的星间链路分配结果, 并对单星测量链路利用率进行统计, 如图 8 所示, 可以看出只有在时隙周期为 60 s 时, 能保证可测链路全部被测量(测量链路利用率为 1)。(注. 结果为可测链路随机排列下 100 次循环的平均值)。

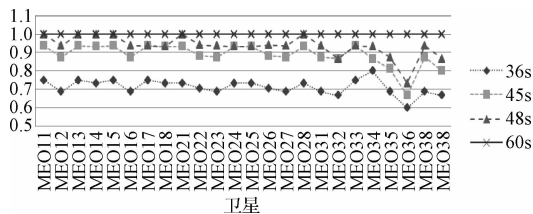


图 8 单个周期单星测量链路利用率

Fig. 8 Ranging links use ratio of single satellite in a period

进一步计算单个卫星所有拓扑周期的测量链路利用率的平均值, 如图 9 所示, 可以看出, 60 s 的时隙周期下, 所有卫星在每个拓扑周期内的测量链路利用率均为 1, 满足了可测全测的需求。

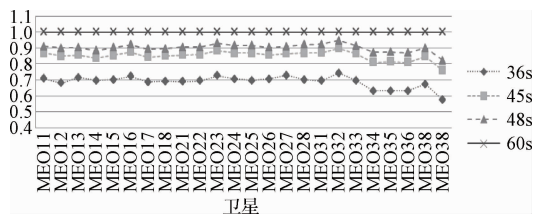


图 9 所有周期单星测量链路平均利用率

Fig. 9 Links mean use ratio of single satellite in all periods

经过以上仿真分析可以看出, 在 60 s 的拓扑周期下, 每个拓扑周期得到的拓扑结构其测量指标总能达到最优。

#### 4.2.2 通信性能分析

取跳数权重  $\alpha = 0.5$ , 时间权重  $\beta = 0.5$  作为通信代价计算的权重组合, 首先计算了仿真时段内第一个拓扑周期 100 次循环(单切点交叉)中两种路由策略下的总代价, 如图 10 所示, 可以明显看出, MTMJ 的路由策略要优于 MJMT 的路由策略。

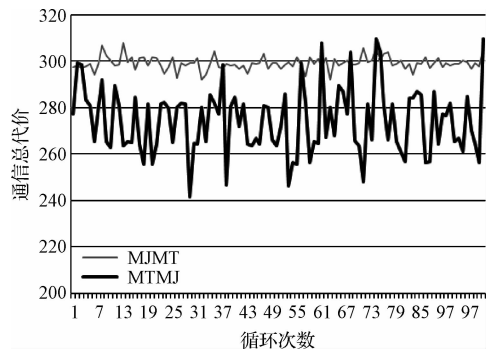


图 10 单个周期两种路由策略下通信总代价

Fig. 10 Total communication cost of two route strategies in a period

通过单切点交叉, 100 次循环下算法的收敛性如图 11 所示, 可以看出, 100 次循环基本能找到较小的代价。取 100 次循环下每种策略下最低的通信代价作为本周期的通信总代价, 其对应的星间网络拓扑也将是本周期的最优网络拓扑。

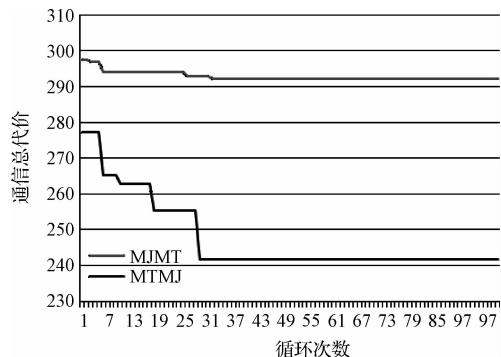


图 11 算法收敛图

Fig. 11 The algorithm astringency chart

进一步计算仿真时段内每个周期不同路由策略下的通信总代价, 如图 12 所示, 每个拓扑周期下 MTMJ 的通信总代价均优于 MJMT 的通信总代价, 因此在时间和跳数权重相等时利用 MTMJ 的路由策略进行数据传输是更优的。

## 5 结论

针对宽波束天线构建的 TDMA 体制星间链路, 分析了当前 GPS 系统下 TDMA 体制星间链路的不足, 并提出新的分时体制星间链路, 保证测量与通信同时隙执行, 针对星间链路要满足星间测量和星间通信两种需求及其之间的关系, 提出双层规划的求解思路求解星间链路构建这一多目标优化问题, 分别设计了上层启发式星间测量链路贪婪搜索分配算法和下层基于全局“邻域”搜索的星间路由优化算



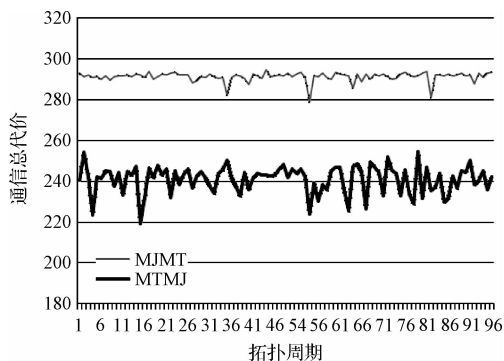


图12 所有周期两种路由策略下通信总代价

Fig. 12 Total communication cost of two route strategies in all periods

法,通过仿真结果表明本文提出的星间链路构建方案和算法是可行的,星间测量链路利用率能达到100%,星间通信采用最短时间最少跳数的路由策略更优,对于工程实践具有指导意义。

### 参 考 文 献

[1] 谭述森. 卫星导航定位工程(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

[2] Kaplan E D. GPS原理与应用(第二版)[M]. 寇艳红译. 北京:电子工业出版社,2007.

[3] Ollie L, Lany B, Art G, et al. GPS III system operations concepts[C]. The 16th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2003.

[4] Li Col H M. GPS status and modernization[C]. Munich Satellite Navigation Summit, Munich, Germany, Feb 20, 2008.

[5] Podlesney D. GPS III space segment[R]. Lockheed Martin Space Systems Company, October 2009.

[6] Rajan J A. Highlights of GPS IIR autonomous navigation[C]. The ION 58th Annual Meeting, Albuquerque, 2002.

[7] Rajan J A, Orr M. On-orbit validation of GPS IIR autonomous navigation[C]. The ION 59th Annual Meeting, Albuquerque, 2003.

[8] 孟繁智. 星座自主导航关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2013. [Meng Fan-zhi. Research on key techniques of autonomous navigation for satellite based navigation constellation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.]

[9] 王东会. 面向测距与通信性能优化的卫星导航星间链路组网技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2014. [Wang Dong-hui. Research on navigation inter-satellite links networking to optimize ranging and communication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.]

[10] 范丽,张育林. Walker星座星间链路构建准则及优化设计研究[J]. 飞行力学,2007,25(2):93-96. [Fan Li, Zhang Yu-lin. Construction rules and design optimization of ISLs in

walker constellationsn [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(2): 93-96.]

[11] 杨磊. 基于一体化卫星网络星间链路设计及网管策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009. [Yang Lei. Research on Inter-satellite links designing and network management strategy based on Integrative satellite network [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.]

[12] 黄缙,张莎莎,张新伟,等. 一种具备星间链路的中轨对地观测星座设计[J]. 宇航学报,2015,36(4):463-469. [Huang Jin, Zhang Sha-sha, Zhang Xin-wei, et al. Design of an MEO earth observation constellation with inter-satellite links[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(4): 463-469.]

[13] 孙桦,郝晓鹏,冯文全,等. 基于最小PDOP准则的星间链路拓扑方案[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(10):1245-1249. [Sun Hua, Hao Xiao-peng, Feng Wen-quan, et al. Inter-satellite links topology scenario based on minimum PDOP criterion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1245-1249.]

[14] 何家富,姜勇,张更新,等. 一种具有异轨星间链路的Walker星座网络拓扑与路由生成方案[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(5):409-413. [He Jia-fu, Jiang Yong, Zhang Geng-xin, et al. Topology and route production scenario of Walker satellite constellation network with inter-satellite link [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(5): 409-413.]

[15] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Performance comparison of static routing and dynamic routing in low-earth orbit satellite networks [C]. Vehicular Technology Conference: Mobile Technology for the Human Race, Atlanta, 1996.

[16] Harathi K, Krishna P, Newman-Wolfe R E, et al. A first link assignment algorithm for satellite communication networks[C]. Computers and Communications, Twelfth Annual International Phoenix Conference, Tempe, USA, March 23-26, 1993.

[17] Cain J B, Adams S L, Noakes M D, et al. A distributed link assignment (reconstitution) algorithm for space-based SDI networks [C]. Military Communications Conference-Crisis Communication: The Promise and Reality, IEEE, Washington DC, USA, Oct 19-22, 1987.

[18] Noakes M D, Cain J B, Nieto J W, et al. An adaptive link assignment algorithm for dynamically changing topologies[J]. IEEE Transactions on Communication, 1993, 41(5): 694-706.

[19] Hong S C, Byoung W K, Chang G L, et al. FSA-Based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037-1048.

[20] 石磊玉,向为,唐小妹. 一种兼顾卫星导航系统星间观测及通信的链路分配算法[J]. 宇航学报,2011,32(9):1971-1977. [Shi Lei-yu, Xiang Wei, Tang Xiao-mei. A link assignment algorithm applicable to crosslink ranging and data

- exchange for satellite navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32 (9): 1971 - 1977. ]
- [21] 杨宇. GNSS 中星间链路分配方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. [Yang yu. Research on ISLs allocation method in GNSS[D]. Changsha: Hunan University, 2013. ]
- [22] 王东会, 徐博, 刘文祥, 等. 一种新的卫星导航星间链路测距体制及其定轨性能分析[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36 (1): 62 - 66. [Wang Dong-hui, Xu Bo, Liu Wen-xiang, et al. A novel navigation inter-satellite links ranging hierarchy and its orbit determination performance [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36 (1): 62 - 66. ]
- [23] 石磊玉. 卫星导航系统星间组网关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013. [Shi Lei-yu. Research on the key technology on inter-satellite network contribution of GNSS [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. ]
- [24] 王彦. 导航星座星间路由算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011. [Wang Yan. Research on inter-satellite routing algorithm for navigation constellation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. ]
- [25] 徐勇, 常青, 于志坚. GNSS 星间链路测量与通信新方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42 (2): 230 - 240. [Xu Yong, Chang Qing, Yu Zhi-jian. On new measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links [J]. Sci China: Tech Sci, 2012, 42 (2): 230 - 240. ]
- [26] Li B H, Rizos C, Lee H K, et al. A GPS-slaved time synchronization system for hybrid navigation[J]. GPS Solut, 2006, 10: 207 - 217.
- [27] Imae M. Review of two-way time and frequency transfer[J]. Journal of Metrology Society of India, 2002, 12 (4): 243 - 248.
- [28] Bard J. Pratical bilevel optimization: algorithms and applications [M]. Berlin: Springer, 1998.
- [29] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29 (2): 391 - 396. [Tan Shu-sen. Development and thought of Compass navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (2): 391 - 396. ]
- [30] Paul A, Kris M, Frank B. Communication architecture for GPS III [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, Aerospace Corp, Los Angeles, CA, USA, 2004.
- [31] Li D N. Dynamic routing algorithm for increasing robustness in satellite networks [J]. Journal of Beijing Institdte of Technology, 2008, 17 (3): 305 - 310.
- [32] Mahmoud H E. An evolving graph-based reliable routing scheme for VANETs [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (4): 1493 - 1504.
- [33] 王宇鹏. 基于分时隙通信的卫星网络路由算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014. [Wang Yu-peng. Routeing algorithm research of satellite network based on timeslot communication [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. ]
- [34] Wang Y P, Zhang G. A novel routing algorithm design of time evolving graph based on pairing heap for MEO satellite network [C]. Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Vancouver, 2014.
- [35] 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, 10 (5): 76 - 83. [Wang Yan, Liu Bo, Yu Wan-rong, et al. Routing algorithm for navigation constellation based on evolving graph model [J]. China Space Science and Technology, 2012, 10 (5): 76 - 83. ]
- [36] 王雪阳. TCP/IP 协议族在相控阵时分卫星网络上的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014. [Wang Xue-yang. Application of TCP/IP protocol in phased array time division satellite networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. ]

#### 作者简介:

张忠山(1987 -), 男, 博士生, 主要从事航天器任务规划与资源调度, 导航系统运行管理及业务规划, 星间链路设计等研究。

通信地址: 湖南省长沙市开福区国防科技大学信息系统与管理学院管理系四室(410073)

电话: 13974925943

E-mail: zszhang@nudt.edu.cn

(编辑: 曹亚君)