

基于路由需求的空信息系星地链路及 星间链路特征分析

钟涛 易先清 侯振伟 赵岳

(国防科学技术大学信息系工程重点实验室 长沙 410073)

摘要 有效的路由算法是空信息系需要解决的核心技术之一。由于卫星网络的拓扑结构的变化,空信息系的路由算法应充分考虑到星间、星地链路连通性特征及卫星网络的拓扑结构演化规律。分析了空信息系卫星网络体系结构,研究了星间、星地链路的几何特性,并利用 STK 仿真软件对星间、星地链路的性能进行仿真,通过分析仿真结果得到了某些星间链路、星地链路的链路连通性特性,进一步分析得到了空信息系信息传输网络拓扑结构的演化规律,其可为卫星链路的设计以及后续空信息系路由算法的研究提供一定的参考。

关键词 路由需求,空信息系,信息系,链路特征

中图法分类号 TN96 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.015

Characteristic of Satellite Ground Links and Inter-satellite Links of Space Information System Based on Route requirement

ZHONG Tao YI Xian-qing HOU Zhen-wei ZHAO Yue

(Key Laboratory of Information Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract An effective routing algorithm is one of the core technologies of space information system that should be developed. Due to the changes of topology structure in satellite network, the connectivity features of the inter-satellite links (ISLs) and satellite-ground links (SGLs), and the topology structure evolution laws of satellite network should be taken into full consideration when studying the routing algorithm. This paper analyzed the architecture of satellite network of space information system and studied the geometric characteristics of ISLs and SGLs. With the simulation software STK, the characteristics of the ISLs and SGLs were simulated. By analyzing the simulation results, the connectivity features of the ISLs and SGLs were acquired and the topology structure evolution laws of satellite network were also obtained by further analyzing. The features and the laws will provide a reference for the design of satellite links and the research on the routing algorithm of space information system later.

Keywords Route requirement, Space, Information system, Link characteristics

1 引言

随着空信息应用需求的持续增长及相关技术(特别是基于星间链路的星间组网技术)的日趋成熟,通过星地链路(Satellite Ground Link, SGL)以及星间链路(Inter-satellite Link, ISL)传输信息的需求愈发迫切。

卫星网络的拓扑结构的变化是卫星网络研究的难点,成为卫星网络研究中面临的最严峻的挑战。网络拓扑结构的这种特性同时影响到各个方面的卫星网络研究,如路由协议的设计、应用服务质量保证研究、可靠传输协议的开发和拓扑结构的设计与优化等^[1,5-10]。尽管拓扑结构的变化是卫星网络中最主要的特点之一,但到目前为止少有对这种网络拓扑结构的剧烈变化特性规律性的系统性研究,没有基于路由需求的空信息系星地、星间链路及其演化规律的针对性研究^[12,13]。

卫星网络中作为主体的卫星的移动性决定了拓扑结构的频繁快速的变化和链路的动态变化,这种变化对网络的影响体现在单跳链路的延时变化性和链路的连通性上^[2]。卫星网络拓扑中节点的地理位置随时间变化;星间链路的物理信道随着其地理位置变化受地球阻挡、天线载荷指向参数和发生功率等因素影响而可能发生断通;链路物理长度的随时变化也影响链路的连通、切换。但是以上这些变化都有规律性,呈周期变化,并且是可以预测的,这是研究星地、星间链路以及网络拓扑有利的一面,也是研究的意义所在。

目前星间链路技术仅在铱星系统中有成熟的应用。在GPS系统中展开试验,但技术细节保密。其他系统,如GLO-NASS、Galileo导航系统在初期都曾考虑过使用星间链路,但最终由于各种原因并没有采用。而国内各类卫星系统没有采用星间链路,也并没有形成卫星通信网络。国内的北斗全

到稿日期:2014-10-27 返修日期:2015-02-14 本文受基于星间链路的空信息网络可靠、灵活路由算法研究资助。

钟涛(1991-),男,硕士生,主要研究方向为空信息系路由算法,E-mail:zhongtao09@163.com;易先清(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为空信息系体系结构及其关键技术,E-mail:xqyi@nudt.edu.cn;侯振伟(1990-),男,硕士生,主要研究方向为卫星网络路由策略;赵岳(1990-),男,硕士生,主要研究方向为卫星网络路由策略。

球卫星导航系统拟采用星间链路,这将成为我国第一个使用星间链路技术的卫星系统。

对于星间链路的技术而言,成熟的铱星系统采用网状模式的星间链路拓扑模式,使用的都是低轨卫星中的永久链路,并没有针对星间链路的特征充分利用其他星间链路,以进一步提升整个空间信息系统的路由性能以及其他性能。在现有文献中,对星间链路特征的分析并不少,但鲜有在已知空间信息系统星座构型的情况下基于路由需求的空间信息系统星地链路及星间链路特征分析。因此,此研究是有一定价值的。

本文首先介绍了空间信息系统的卫星网络体系,然后对 SGL、ISL 的几何特性进行了分析,最后利用 STK 软件对链路性能进行了仿真,得到了某些有价值的相关结论,以期为进一步路由算法研究提供一定的参考。

2 空间信息系统卫星网络体系结构分析

本文研究的空间信息系统是 MEO/GEO/IGSO 三层卫星网络体系结构,如图 1 所示。从图中可知,该体系结构由 MEO 星座、GEO 星座、IGSO 星座和地面站构成,地面站之间可以通过有线网络进行通信。其中 MEO 星座包含 3 个轨道面,每个轨道面上布局 9 颗卫星,共计 27 颗 MEO 卫星;IGSO 星座由 3 颗 IGSO 卫星组成;GEO 星座包括 5 颗 GEO 卫星;地面站为 3 个,即北京站、三亚站、喀什站,其中北京站为主站,优先将信息传递给北京站。

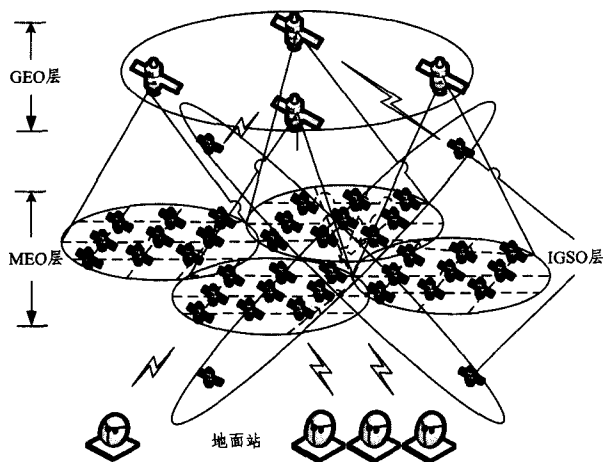


图 1 卫星网络体系结构

根据卫星星座,整个空间信息系统可分为 3 个卫星层。

(1)GEO 层。地球同步轨道位于赤道正上方,卫星和地球是相对静止的。GEO 卫星网络具有卫星数量少、全球覆盖、切换少和卫星跟踪控制简单等优点。假设 GEO 层中 GEO 卫星总数为 N_G ,单颗 GEO 卫星表示为 $G_i, i=1,2,\dots,N_G$ 。

(2)IGSO 层。IGSO 的设计主要是为了满足极地附近的信息传输的需求。其具有与 GEO 相同的轨道高度,因此具有与地球自转周期相同的轨道周期,是一种利用效率较高的区域星座,介于 GEO 和 MEO 之间。假设 IGSO 层中 IGSO 卫星总数为 N_I ,处在 GEO 卫星 G_i 覆盖区域中的单颗 IGSO 卫星表示为 $I_{i,j}$ 。

(3)MEO 层。单颗 MEO 卫星可视时间达 1~2h。作为 GEO 和 LEO 卫星的折衷,MEO 卫星双跳传输时延大于 LEO

卫星,但作为系统,考虑星间链路整个长度、星上处理和上下行链路等因素,MEO 星座时延性能可能优于 LEO 星座,而且满足 400ms 传输时延要求;相对于 LEO 卫星,MEO 星座切换概率降低,多普勒效应减小,空间控制系统和天线跟踪系统简化,一般能达到 $20.0^\circ\sim 30.0^\circ$ 通信仰角。MEO 层由若干 MEO 星座组成,假设 MEO 层中 MEO 卫星总数为 N_M ,处在 GEO 卫星 G_i 覆盖区域中的单颗 MEO 卫星表示为 $M_{i,k}$ 。

三层卫星网络中维持 3 种类型的全双工链路。相同卫星层中的卫星通过层内 ISL 建立连接,不同卫星层间的卫星通过层内 ISL 建立连接,各卫星层中的卫星与处在其覆盖下的地面站通过用户链路数据建立连接。

3 SGL 与 ISL 几何特性分析

在卫星网络中,建立 SGL 和 ISL 是实现空间信息系统信息有效传输的重要保证。

SGL 和 ISL 的构建必须基于一定的网络拓扑结构,网络拓扑结构的变化直接影响着链路的通断,并严重影响着路由算法。

无论对于哪一种路由算法而言,在决定下一转发节点时都应该明确有哪些可接收信息的节点,寻找节点可视集。对于卫星网络而言,由于拓扑结构的剧烈变化,在选择卫星节点时应该建立有效模型寻找可视集,这样有助于路由算法的建立。因此,应建立有效的模型来寻找通信节点可视集,这样有助于拓扑结构演化规律的研究,对路由算法的研究也有一定参考作用。

由于影响星间链路构建的最主要因素是星间可见性,因此本文主要从可见性方面进行研究。

3.1 SGL 模型

图 2 是星地链路的示意图。其中 O 为地心, S 为卫星, G 为地面站。 R_E 为地球半径, R_S 为卫星轨道半径, l 为瞬时卫星与地面站之间的距离。 α 为 GO 连线与 GS 连线的夹角。

根据图 2,夹角 α 可表示为:

$$\alpha = \arccos \frac{R_E^2 + l^2 - R_S^2}{2R_E l} \quad (1)$$

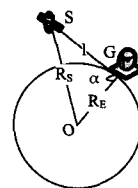


图 2 地面站 G 与卫星 S 瞬时 SGL 示意图

对于地面站 G 来说,当图 2 中夹角 $\alpha > 90^\circ$ 时,卫星与地面站可见。但由于地球大气和地表等实际条件引起的偏差,临界条件有一定偏差,一般为 5° 左右。对于地面站 G 而言,其可见卫星集为 $\psi_G = \{S | \alpha > 90^\circ + \delta, \alpha = \angle SGO\}$,其中 δ 为偏差。同理,对于卫星 S 而言,其可见地面站集为 $\psi_S = \{G | \alpha > 90^\circ + \delta, \alpha = \angle SGO\}$,其中 δ 为偏差。

3.2 ISL 模型

图 3 是卫星间瞬时 ISL 示意图。其中 S_1, S_2 分别为两颗卫星, O 为地心, R_1, R_2 分别为两颗卫星的轨道半径, d 为两颗卫星间的瞬时距离。 E_{12} 为卫星一至卫星二间瞬时 ISL 仰角, E_{21} 为卫星二至卫星一间瞬时 ISL 仰角。 R_E 为地球半径,

θ 为地心角, h_{ISL} 为瞬时 ISL 与地心间的高度。

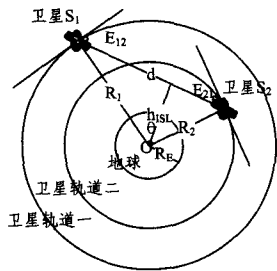


图3 卫星之间瞬时 ISL 示意图

依据图 3, 瞬时 ISL 距离 d 可表示为:

$$d = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\theta} \quad (2)$$

由文献[14]可知, 单颗卫星在地球上轨迹的地理坐标表示为以下方程形式:

$$\begin{cases} \phi_{SAT} = \arcsin(\sin(\beta)\sin(\xi)) \\ \lambda_{SAT} = \lambda_0 + \arctan(\cos(\beta)\tan(\xi)) + \begin{cases} -180^\circ, & \xi \in [-180^\circ, -90^\circ) \\ 0^\circ, & \xi \in [-90^\circ, 90^\circ) \\ 180^\circ, & \xi \in [90^\circ, 180^\circ) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中, ϕ_{SAT} 、 λ_{SAT} 分别为卫星 SAT 在地球上的纬度、经度, λ_0 为升节点的经度, β 为轨道倾角, ξ 为飞行时刻 SAT 与升节点间的角距。据球面几何可知, θ 可由两卫星的经纬度表示, 即

$$\theta = \arccos[\sin(\phi_1)\sin(\phi_2) + \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\cos(\phi_1 - \phi_2)] \quad (4)$$

依据图 3, 瞬时 ISL 仰角 E_{12} 及 E_{21} 可表示为:

$$E_{12} = \arccos\left[\frac{R_2 \sin(\theta)}{d}\right] \quad (5)$$

$$E_{21} = \arccos\left[\frac{R_1 \sin(\theta)}{d}\right] \quad (6)$$

则结合式(2)、式(4)可求得瞬时 ISL 仰角 E_{12} 及 E_{21} 。

由于地球上空大气层对信号的衰减及干扰, 判断瞬时 ISL 的可通性不能仅依据在地球对 ISL 是否阻挡, 应在地球对 ISL 阻挡的临界条件下, 同时考虑 ISL 可通性保护余隙。假设瞬时 ISL 距地球表面的高度即保护余隙为 H , 依据图 3 可知:

$$h_{ISL} = R_1 \cos(E_{12}) \quad (7)$$

故当 $h_{ISL} \geq R_E + H$ 时, ISL 可以建立; 否则, ISL 不可建立。对于卫星 S_1 而言, 其可见卫星集为 $\phi_{S_1} = \{S | h_{ISL} \geq R_E + H\}$, 其中 h_{ISL} 为瞬时 ISL 与地心间的高度, R_E 为地球半径, H 为保护余隙。

4 SGL 和 ISL 仿真结果及性能分析

本节主要基于星间、星地链路的可见性来分析 SGL 及 ISL 的性能, 进一步分析卫星网络的拓扑演化规律。

需要说明的是, 本文在用 STK 建模分析连通性时进行了适当的简化, 没有考虑大气层高度、天线俯仰角限制以及天气和射频信号的距离限制等现实因素。下面就仅从卫星通信节点是否可见来仿真分析各类链路的连通性。

4.1 SGL 仿真结果及性能分析

空间信息系统星地链路主要考虑 MEO 卫星与地面、IGSO 卫星与地面、GEO 卫星与地面 3 种星地链路。GEO 卫星

相对地面静止不动, 可以与地面站建立永久链路, 其链路特性较为简单, 在此不作详细分析。此处主要详细介绍 MEO 卫星和 IGSO 卫星与不同地面站间星地链路的链路特性。

4.1.1 MEO-地面站

由于对称性, 考虑一颗 MEO 卫星与 3 个地面站间星地链路特性。

从图 4 可以看出, 与地面站建立的上下行星地链路的特点是: 不能保障每天全时段持续连通。在一个链路循环周期内, 与地面站的可连通时段相对比较短, 且连通时段长短从表面上并没有太多的规律可循, 这意味着在不能与地面连通的时间段, MEO 卫星必须等待或者将信息转发给地面可见的卫星。MEO 卫星与地面站的距离不断发生变化, 距离在 21600~27200km 变化, 链路延时也跟随变化, 都处于比较合理的范围内。

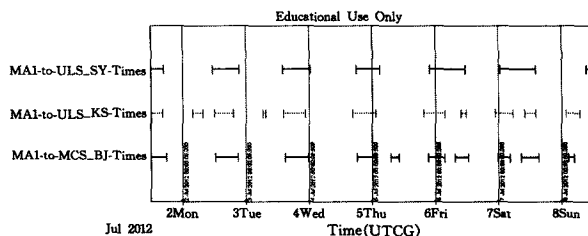


图4 MEO 节点与地面站的连通性

同时, 从整体上看, 同轨道的 MEO 卫星连接地面站的时间存在断开间隙, 但每颗 MEO 卫星对主控站的不可见时间并不重叠, 而是分别错开, 在某天全时段内任意时刻基本能保证有 MEO 卫星可以连接地面站, 如图 5 所示。这些可见时间事先是可以预知并计算出来的, 这对空间信息系统空间段信息传输路径的选择有一定作用, 但是这些时间段却并不是那么规律, 给空间信息的传输与管理带来了一定的困难, 使路由算法变得更加复杂, 需要进一步研究, 并有效利用。

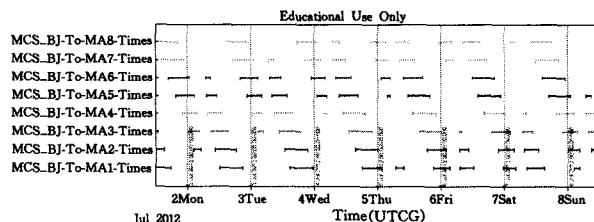


图5 同轨道 MEO 与地面站的连通性

4.1.2 IGSO-地面站

星地链路, 考虑优先建立在卫星与北京站之间。图 6 所示为 IGSO-北京站之间建立链路的距离, 其中曲线缺失部分表示此时不能建立链路。从图中可以看出, 由于地球的遮挡和 IGSO 卫星相对地面移动, 在某天全时段内不能保证该型链路持续连通, 断开时间较长。相对 MEO 卫星而言, IGSO 卫星轨道变高, 链路距离变长, 链路时延也变长。

IGSO 卫星对于 3 个地面站的连通性分析如图 7 所示。值得注意的是, 地面站中三亚站对于 3 颗 IGSO 卫星是持续可见的, 这对于星地链路的设计是很有意义的, 在选取转发节点时可优先选取, 便于信息快速传回地面。同时, 相对于 MEO 卫星, IGSO 卫星与地面站之间的可见时间相对较长, 有利于保持链路的稳定, 减少切换次数, 方便路由管理。

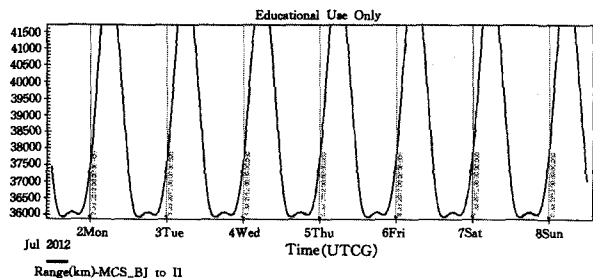


图6 IGSO-北京站链路距离

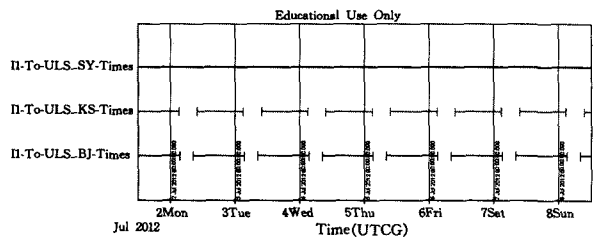


图7 IGSO-地面站连通性

4.2 ISL 仿真结果及性能分析

星间链路主要有6种,分别是MEO-MEO星间链路、MEO-IGSO星间链路、MEO-GEO星间链路、IGSO-IGSO星间链路、IGSO-GEO星间链路、GEO-GEO星间链路。以下将对这些链路进行详细分析,以期对路由算法的设计提供一定的参考。

4.2.1 GEO-GEO星间链路、IGSO-IGSO星间链路、IGSO-GEO星间链路

这三类链路都是在GEO卫星和IGSO卫星节点之间传输信息。其特殊之处在于这两类卫星拥有比较特殊的星地链路和星间链路。GEO卫星相对地面静止,其与地面的信息传输并不存在需要同类卫星中继的情况,而IGSO卫星也可以与地面站永久或者长时间建立链路。

同时,从图8中可以看出,IGSO卫星与GEO之间的星间链路也是永久链路,在任何时刻都是可见的。这些特征使得IGSO卫星、GEO卫星与地面站之间交换、传输信息相对简单。

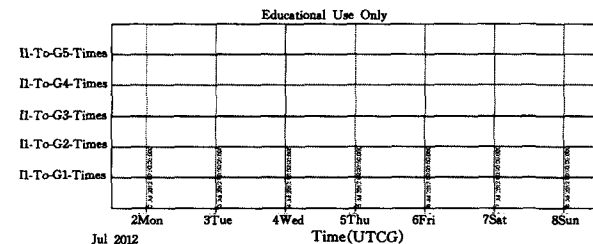


图8 IGSO卫星与GEO之间的连通性

4.2.2 MEO-MEO星间链路

对于北斗卫星导航系统空间段MEO星座中MEO卫星:

(1)与同轨相邻MEO卫星建立的上下两条星间链路的连通性如图9所示。链路特点:可以与同轨道中的6颗卫星建立对称的持续连通的星间链路,而且其数据传输延时固定,仰角、方位角固定。另一颗卫星因为地球遮挡,一直不能与之建立链路。

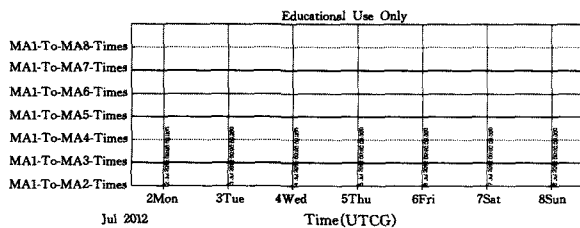


图9 M₁₁卫星与同轨卫星的连通性

(2)与邻轨MEO卫星建立的左右两条星间链路的连通性如图10所示。当两颗卫星移动到交汇处链路会中断,链路特点:共可建立6条全时段持续连通的异轨星间链路,2条时断时通的链路,中断时间分别大约为46min和74min。其链路距离变化剧烈,数据传输延时、仰角、方位角随之变化。另外,由图10可以发现,在某一时刻8条链路距离曲线交于一点,此时M₁₁卫星与2个轨道面内各颗卫星距离相等,此距离大约为39800km。如果测距、通信的最大距离低于39800km,会出现一段时间内M₁₁卫星与2个轨道面各星都不能建立链路的情况。

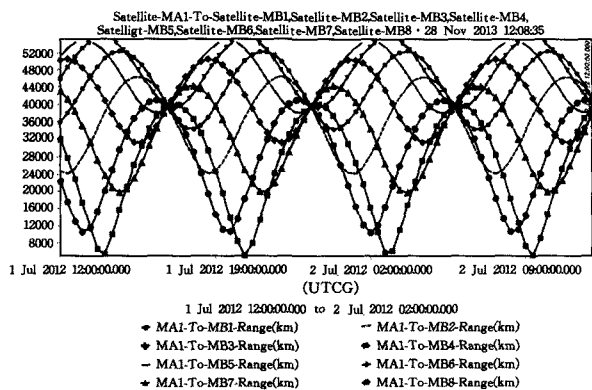


图10 M₁₁与邻轨卫星的连通性

4.2.3 MEO-IGSO星间链路

对于MEO与IGSO卫星建立的星际链路,由MEO卫星和IGSO卫星的轨道参数特点可以看出,MEO卫星和IGSO卫星轨道倾角都为55°,即每个MEO轨道面上都有一顆IGSO与之对应。由于在同一轨道面上的9颗卫星(8颗MEO和1颗IGSO)具有良好的位置关系,其俯仰角不发生改变,有利于星间链路的建立,因此该类型的星间链路主要考虑建立在同轨道面的MEO卫星与IGSO卫星之间,如图11所示。

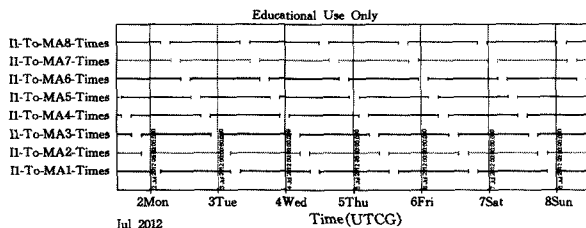


图11 MEO与IGSO的连通性

链路特点:由于地球的遮挡,不能保证MEO卫星与IGSO卫星建立的星际链路某天全时段内持续连通,每天均有大约3小时24分钟的断开时隙,但某时刻某MEO轨道面中至少有6颗MEO与IGSO卫星持续连通。

4.2.4 MEO-GEO 星间链路

MEO 卫星与 GEO 卫星基本一直可见,可以一直建立链路,只有在短时间内互相之间不可见,其连通性如图 12 所示。但同时,从图 13 中可知,MEO 卫星与 GEO 卫星之间的距离在某些时刻太长,其传输时延太长,因此时效性要求比较高的业务不能选择这样的链路。

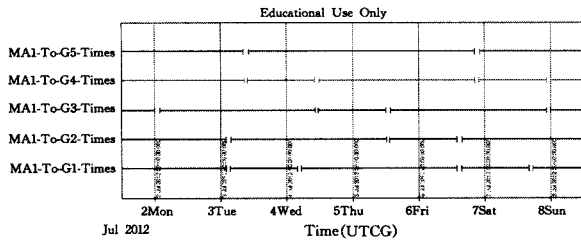


图 12 MEO 与 5 颗 GEO 的连通性

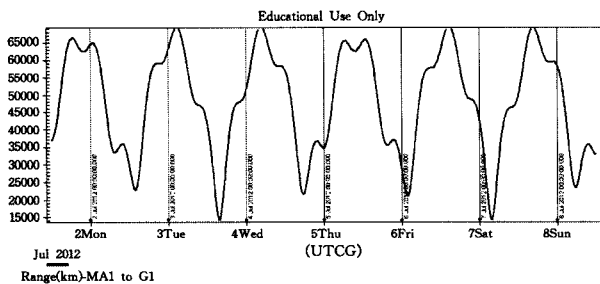


图 13 MEO-GEO 星间链路距离

4.3 空间信息系统拓扑结构演化规律分析与对比

本文对链路连通性的分析,主要是为了对空间信息系统信息传输中各种类型链路的连接关系及拓扑结构的演变规律进行一定的了解。研究网络中的节点之间能否建立链路,能否建立稳定的链路,以及建立的链路的延时变化是否能满足通信的要求等问题,都是为后面研究信息传输机制、网络路由策略做准备,是研究网络拓扑结构必不可少的一部分工作。综合上文的分析,除了上述结论,还可以分析得出以下结论:

从星地链路来看,GEO 和 IGSO 卫星几乎能够全天时与地面站可见,同时 GEO 和 IGSO 卫星与 MEO 卫星也有良好的连通性。MEO 与同轨道面的 IGSO 具有良好的位置关系,在任一时刻总有 6 颗 MEO 卫星与同轨道面上的 IGSO 卫星保持连通;同时 MEO 卫星与 GEO 卫星基本一直可见。因此在无法将信息直接传输回地面且信息对时延要求不太高时,应该优先考虑将信息传输给这两类卫星,并可以考虑将其建立成为空间信息系统的主干网。

但 GEO 和 IGSO 由于轨道半径太大,在接收信息并转发给地面站时会产生较大的时延,具有较大的滞后,因此对于实时性要求比较高的信息应尽量考虑使用 MEO 进行转发。3 个 MEO 轨道面中某单一 MEO 轨道面上的 8 颗 MEO 卫星与北京站只能建立时断时续的星地链路,但 3 个 MEO 轨道面与北京站的断开间隙并不重叠,而是分别错开,在某全天时段内任意时刻总能保证有两个 MEO 轨道面连通主控站,而在每个轨道面上至少有两颗卫星可以接触北京站。这些特征为通过 MEO 进行信息转发提供了良好的条件。

从星间链路来看,GEO 和 IGSO 之间是一直可见并建立永久链路的。而 GEO、IGSO 分别与 MEO 具有较好的可见

性,永久可见或者仅有短时不可见。这就为信息转发给 GEO 和 IGSO 提供了非常好的条件。

对于某颗 MEO 卫星,在同轨道内可建立 6 条全时段连通的同轨星间链路,同时可与相邻 MEO 轨道内的 8 颗卫星建立 6 条持续连通的异轨星间链路、2 条时断时续的星间链路,间断时间大约在 1 小时。这些同轨间卫星的永久星间链路以及异轨间卫星的星间链路,也应该得到有效利用。利用 MEO 进行信息转发,可以减少信息的时延,同时增强空间信息系统的抗毁性,对卫星的可靠性提高具有极大的帮助。但 MEO 由于与地面连通性时间上的复杂性,若与地面进行信息传输,则会给卫星的管理带来一定的难度,应对其规律进行进一步研究。

以上只是得到的部分较为重要的结论,在后续的星间链路设计和路由策略研究中,应根据需求对某一方面的演化规律进行仔细而详尽的研究。

结束语 本文以空间信息系统为技术背景,依托 STK 仿真工具,从星间链路和星地链路两个方面详细研究了空间信息系统的链路性能以及网络拓扑结构的演化规律,并得到了相关结论,为后续空间信息系统路由算法的研究提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 余春东,王俊峰,刘立祥,等. Walker 星座卫星网络拓扑结构动态性分析[J]. 通信学报,2006,27(8):45-51
She Chun-dong, Wang Jun-feng, Liu Li-xiang, et al. Dynamic analysis of topology structure of Walker constellation satellite network[J]. Journal on Communication, 2006, 27(8): 45-51
- [2] 王振永. 多层卫星网络结构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
Wang Zhen-yong. Architecture design and analysis of multi-layer satellite networks[D]. Harbin: Institute of Technology, Harbin, 2007
- [3] Ananda M P, Bernstein H, et al. Global positioning system (GPS) autonomous navigation [C] // Inst. of Electrical and Electronics Engineers Position Location and Navigation Symposium. New York: Inst. of Electrical and Electronics Engineers, 1990:497-508
- [4] Eissfeller B, Zink T, Wolf R. Autonomous Satellite State Determination by Use of Two-Directional Links [J]. International Journal of Satellite Communications, 2000, 18(1): 325-346
- [5] 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. Research on the ISL Building Rules and the Optimization Design of Walker Constellation [J]. Flight dynamics, 2007, 25(2): 93-96
- [6] 杨宁虎, 陈力. 卫星导航系统星间链路分析 [J]. 全球定位系统, 2007, 32(2): 17-20
Yang Ning-hu, Chen Li. Analysis of Inter-satellite Link in the Satellite Navigation Systems [J]. Global positioning system, 2007, 32(2): 17-20
- [7] 杨宁虎, 陈力. 卫星导航系统星间链路空间参数与覆盖分析 [J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(1): 34-37

- Yang Ning-hu, Chen Li. Spatial Parameters and Coverage Analysis of Satellite Navigation System[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(1): 34-37
- [8] 李振东,何善宝,刘崇华. 导航星座星间网络路由算法研究[C]//第一届中国卫星导航学术年会. 北京, 2010:14-20
Li Zhen-dong, He Shan-bao, Liu Chong-hua. Research on Routing Algorithm of Satellite Navigation Constellation Network [C]//The first session of the China Satellite Navigation Annual Conference. Beijing, 2010:14-20
- [9] 李振东,何善宝,刘崇华. 采用 Ka 频段的导航星座网络静态拓扑结构[C]//中国宇航学会学术年会. 北京, 2009:17-22
Li Zhen-dong, He Shan-bao, Liu Chong-hua. Ka-band using A Static Navigation Constellation Network Topology with Ka-band Channel [C] // Chinese Society of Astronautics Annual Conference. Beijing, 2009:17-22
- [10] 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, 2009, 10(5):409-413
He Jia-fu, Jiang Yong, Zhang Geng-xin, et al. An Network Topology and Routing Calculation Solution of Walker Constellation with Inter-orbit Link[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2009, 10(5):409-413
- [11] 郑晋军,林益明,陈忠贵,等. GPS 星间链路技术及自主导航算法分析[J]. 航天器工程, 2009, 18(2):28-35
Zhen Jin-jun, Lin Yi-ming, Chen Zhong-gui, et al. The Technology of GPS Satellite Link and Autonomous Navigation Algorithm Analysis [J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(2):28-35
- [12] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636-1648
- [13] 刘刚,吴诗其. 非静止轨道卫星通信系统中星际链路性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 24(1):105-109
Liu Gang, Wu Shi-qi. Research on Satellite Link Quality in Communication System of Non-geostationary Orbit Satellite [J]. Systems Engineering and Electronic, 2001, 24(1): 105-109
- [14] 尹志忠,张龙,周贤伟. LEO/HEO/GEO 三层卫星网络层间 ISL 性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12):9-13
Yin Zhi-zhong, Zhang Long, Zhou Xian-wei. Quality analysis of inter-layer ISL of LEO/HEO/GEO three layers satellite networks [J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(12):9-13
- [15] 陈垣毅,郑增威. 星际网络通信协议研究进展综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2):406-412
Chen Yuan-yi, Zhen Zeng-wei. Overview of Research Progress of Inter-satellite Network Communication Protocol[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2):406-412

(上接第 59 页)

- [6] Neeraj K, Jongsung K. Probabilistic trust aware data replica placement strategy for online video streaming applications delay tolerant networks [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013, 58(1/2):3-14
- [7] Fu Xiong, Zhu Xin-xin, Han Jing-yu, et al. QoS-aware Replica placement for data intensive applications[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(3): 43-47
- [8] Neves T A, Drummond L M A, Ochi L S, et al. Solving Replica Placement and Request Distribution in Content Distribution Networks[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2010(36):89-96
- [9] 刘志明,沙基昌,阳小华,等. 基于随机 Petri 网的 P2P 存储系统可靠性模型和分析[J]. 计算机科学, 2011, 38(4):80-83
Liu Zhi-ming, Sha Ji-chang, Yang Xiao-hua, et al. Model and analysis of Peer-to-Peer Storage System Reliability Based on Stochastic Petri Net[J]. Computer Science, 2011, 38(4):80-83
- [10] 石宣化,金海. 有服务质量保证的数据密集型网格应用管理研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(6):131-135
Shi Xuan-hua, Jin Hai. Data-intensive Applications Management Framework with QoS Guarantee in Grid Environments [J]. Computer Science, 2007, 34(6):131-135
- [11] 侯孟书,王晓斌,卢显良,等. 一种新的动态副本管理机制[J]. 计算机科学, 2006, 33(9):50-52
Hou Meng-shu, Wang Xiao-bin, Lu Xian-liang, et al. A novel dynamic replication management mechanism [J]. Computer Science, 2006, 33(9):50-52
- [12] Sun Da-wei, Chang Gui-ran, Gao Shang, et al. Modeling a dynamic data replication strategy to increase system availability in cloud computing[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2012, 27(2):256-272
- [13] 林伟伟. 一种改进的 Hadoop 数据放置策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(1):152-158
Lin Wei-wei. An improved data placement strategy for Hadoop [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(1):152-158
- [14] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Li Ke-qin, et al. A cross-layer optimization based integrated routing and grooming algorithm for green multi-granularity transport networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2013, 73(6):807-822
- [15] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Huang Min. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1):262-272
- [16] 曲大鹏,王兴伟,黄敏. 移动对等网络中的感知蚁群路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(7):1456-1464
Qu Da-peng, Wang Xing-wei, Huang Min. An aware ant routing algorithm in mobile peer-to-peer networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7):1456-1464
- [17] Arif M. MOX: A novel global optimization algorithm inspired from Oviposition site selection and egg hatching inhibition in mosquitoes[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8):4614-4625
- [18] 汪定伟,王俊伟,王洪峰,等. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2007:136-166
Wang Ding-wei, Wang Jun-wei, Wang Hong-feng, et al. Intelligent Optimization Methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007:136-166
- [19] Calheiros R N, Ranjan R, Beloglazov A, et al. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1):23-50