

基于多层分簇的北斗卫星导航系统拓扑结构与路由策略

李飞龙, 李广侠, 李志强, 彭锋彬

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对网络拓扑动态变化和路由多重选择等问题, 空间节点按其属性划分为 3 个不同的物理簇, 各簇可按需要进行下一级子簇的划分, 建立了基于多层分簇架构的动态网络拓扑演化模型, 从 MEO 独立运行、GEO 和 MEO 协同运行 2 个方面研究了导航系统的路由策略。设计了基于簇管理者、簇首和簇成员的三级信息传输与分发机制。通过分簇和子簇间边界节点的设置, 实现了簇间的拓扑变化相互屏蔽、独立的组网路由策略和子簇间的信息交互, 减小了网络管理和路由计算的复杂度。

关键词: 北斗卫星导航系统; 多层分簇; 拓扑结构; 路由策略

中图分类号: TN96

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)10-0031-11

Topology structure and routing policy based on multilayered clusters in Beidou satellite navigation system

LI Fei-long, LI Guang-xia, LI Zhi-qiang, PENG Feng-bin

(College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: A dynamic network topology evolution model was established based on multilayered clusters. Moreover, the routing policy was studied from the two aspects of MEO working independently and GEO/MEO working collaboratively. The three-level information transmission and distribution mechanism was proposed via employing cluster manager, cluster head and cluster member. Finally, through the cluster division and boundary nodes selection among the sub-clusters, the scheme achieves the inter-cluster topology change shielded from each other, independent networking routing and sub-cluster information exchange, as well as a low network management complexity and routing calculations.

Key words: Beidou satellite navigation system; multilayered clusters; topology structure; routing policy

1 引言

全球卫星导航系统^[1] (GNSS, global navigation satellite system) 具备全天候不间断提供全球高精度导航定位的能力, 不仅满足运动载体高精度导航的需求, 还能服务于高精度大地测量、精密授时、交通运输管理、气象观测、载体姿态测量、国土安全防卫等多个领域。全球卫星导航系统具有政治、经济、军事等多方面的重要意义, 许多国家都在竞相发展全球或区域卫星导航系统。目前世界上主要有 GPS、Galileo、GLONASS 和 Beidou 4 大卫星导航

系统^[2]。

我国北斗卫星导航系统^[3~5]于 2012 年底正式向亚太大部分地区提供连续无源定位、导航、授时服务, 但在覆盖范围、精度、完好性、可用度、可靠性^[6]等方面与 GPS 相比还存在差距, 许多关键领域仍严重依赖 GPS, 建设全球卫星导航系统的任务已迫在眉睫。与其他全球卫星导航系统相比, 未来北斗全球系统的特点主要表现在 2 个方面: 一是空间卫星节点类型多, 包括 GEO、IGSO 和 MEO 3 种轨道类型卫星, 其中, MEO 卫星是具备全球导航应用能力的主要贡献者, GEO 和 IGSO 卫星为区域卫

收稿日期: 2014-07-03; 修回日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61032004, 91338201); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目(2012AA121605, 2012AA01A510)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61032004, 91338201); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA121605, 2012AA01A510)

星导航系统的重要组成要素和导航性能的增强要素。二是基于星间链路的测距与通信体制几乎是实现自主可控、技术先进、稳定可靠的北斗全球卫星导航系统的唯一选择,这是因为本土建设注入站是北斗全球系统上行注入体制设计的基本约束,通过星间链路的距离测量和信息传输,弥补地面不能全程跟踪测量的不足,大大提升我国卫星导航系统性能。这两方面的特点决定了北斗全球卫星系统必须解决 2 方面问题:第一是动态网络拓扑问题,北斗全球卫星导航系统本质上是一个集合 GEO、IGSO 和 MEO 3 类卫星的多层卫星网络,由于节点种类多,属性、能力不同,网络具有异构性,同时空间节点动态运动,具有动态网络拓扑;第二是路由多重选择问题,利用星间链路实现上行注入数据的中继传输是解决上行注入数据到达目标卫星的可行途径,同时也是对下行业务信息接收的优选方案。星间链路的存在使导航综合信息传输的复杂性大大增加。两卫星节点在满足可视等建链条件时,理论上均可建立星间链路,未来北斗全球系统各卫星节点间均可建立一种近似网格的传输网,任何两节点之间存在多条可达路径,这为导航综合信息传输过程中的路径决策带来了必需的路由多重选择问题。

目前,基于星间链路的卫星导航系统网络拓扑与路由策略的研究在国内尚无公开发表的成果可以借鉴。在国外,美国的 Aerospace 公司负责对 GPSIII 系统星间链路的研究与顶层设计^[7,8],但其研究进展也处于未公开状态,而且 GPSIII 还只是单层卫星网络,复杂性远不及由多层卫星节点通过星间链路建立的立体交叉的未来北斗全球卫星导航网络。当前关于导航卫星系统的星间组网和路由策略研究才逐步展开^[9,10],所以有必要借鉴多层卫星通信网络的研究成果。Kimura 等最早提出了基于 MEO/LEO 的双层卫星网络(DLSN, double layered satellite networks)^[11,12],在 DLSN 中,MEO 卫星间用星间链路(ISL, inter satellite links)相连,并且 MEO 卫星可以通过星际链路(IOL, inter orbit links)和在自己“视距”内的 LEO 卫星相连,LEO 卫星间没有 ISL 相连。DLSN 采用 MEO 和 LEO 星座联合为地面移动终端提供卫星移动通信系统服务,这是多层星座卫星网络雏形。然而, Kimura 并没有分析数据在双层卫星网络中如何传输,也没有分析双层卫星网络结构对路由算法设计的影响。Ian 等^[13]提出

了比 DLSN 更复杂的多层卫星星座结构(MLSN, multilayered satellite networks),由 GEO 卫星、MEO 卫星和 LEO 卫星构成,其中, GEO 卫星成为路由算法决策中枢, MEO 星座完成对地球表面全覆盖,而 LEO 卫星主要实现对地面移动终端的接入。在 MLSN 结构中, MEO 卫星与 MEO 卫星、LEO 卫星与 LEO 卫星都存在 ISL, GEO 卫星与 MEO 卫星、MEO 卫星与 LEO 卫星都有 IOL。系统实现的高复杂性成为 MLSN 结构的缺点。在 MLSN 结构上,为克服其“冗余连接”复杂性高的缺点,王振永等^[14]提出了基于“骨干/接入”模型的多层卫星网络,其中, MEO 卫星和 GEO 卫星通过 IOL 连接,作为分层卫星网络的交换节点,负责空间数据的传输与转发以及与关口站和大型终端之间的通信;而 LEO 卫星间不存在 ISL 以简化系统复杂度,LEO 以及其他的功能性低轨卫星等作为具有交换功能的用户接入点,组成卫星接入网络,并通过 IOL 与卫星骨干网相连。“骨干/接入”模型的多层卫星网络的卫星骨干网和接入网的拓扑结构稳定性问题并没有过多的涉及。根据文献[3]中北斗全球导航卫星系统的组网结构的初步设计,易先清等人^[15]研究了基于 GEO/MEO 星层组网的卫星网络抗毁路由算法(DRRA, destruction-resistant routing algorithm),利用分群管理、链路冗余与修补方法,提出并设计分析了一种基于 GEO/ MEO 双层星座以及地面节点联合的抗毁导航卫星网络组网结构,提高整个导航星座系统的抗毁性能。但 MEO 星座的任一 MEO 卫星均与其相邻的 6 颗 MEO 卫星建立通信链路的冗余设计,一方面大大增加了星上处理复杂性,另一方面由于多条冗余通信链路的存在,并没有讨论从源节点到目的节点的最佳路径选择方案。除此之外,并无针对未来北斗系统路由策略方面的公开文献。

针对以上问题,本文研究发现,把多层卫星网络的研究成果应用到未来北斗全球卫星导航系统网络拓扑和路由策略方面时必须结合导航网络自身的特点,如果把所有的节点集合到一个单一系统中考虑将使网络管理和路由计算等变得异常复杂。根据北斗卫星导航网络的静态组成以及其组成特征,按照导航网络节点的属性划分为不同的簇(cluster)^[16-19],各簇可根据需要再进行下一级子簇的划分,提出了多层分簇的动态演化网络模型,设计了基于簇管理者、簇首和簇成员的 3 级导航综合信息传输与分发机制,从 MEO 独立运行和 GEO 和 MEO 协同运行 2 个方

面研究了导航系统的路由策略。由于设计的北斗系统的分簇和路由策略是基于未来北斗全球系统的静态组成和动态演化特点，因此北斗系统完全具备按照此策略运行的兼容环境。这样，每个簇内部的拓扑变化相互屏蔽，且采用独立的组网路由策略，减小了网络管理和路由计算的复杂度。

2 基于多层分簇的拓扑结构研究

未来北斗全球导航卫星系统由主控站(MCS, master control station)、注入站(ULS, up load station)和监测站(MS, monitor station)一类的地面站节点和 MEO 卫星、IGSO 卫星和 GEO 卫星一类的卫星节点构成，这些通信节点通过星—星、星—地、地—地通信链路组成一个星地一体化导航综合信息传输网，该网按照空域划分为星间骨干网、星地接入网和地面运控网，图 1 为北斗全球系统星地一体化网络组成结构。

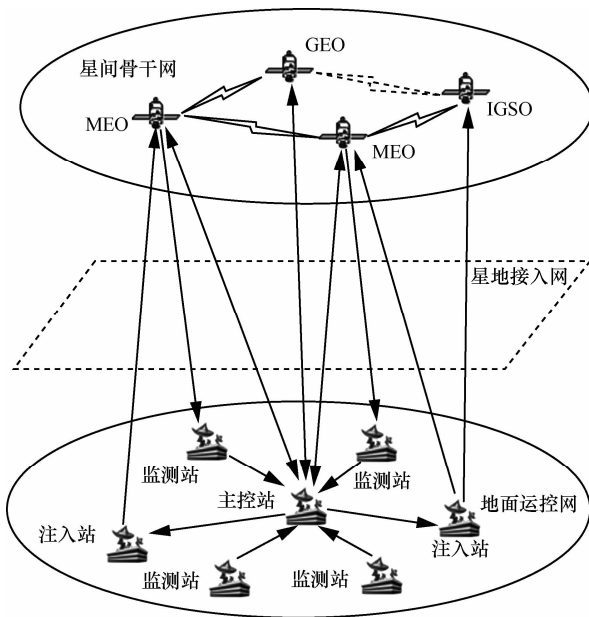


图 1 未来北斗全球系统星地一体化网络结构

未来北斗全球导航系统的拓扑结构包括各类地面站节点、各类卫星节点在内的通信节点以及各类星地、星间链路的静态组成结构和动态运行结构，通过对其静态组成特征和动态运行规律的研究，旨在寻找适合导航综合信息传输的最佳拓扑结构，为该传输网中信息传输所需的路由决策提供依据。

2.1 静态组成及其组成特征

1) 同步静止轨道卫星（简称 GEO 星层）

GEO 星层由分布于地球同步静止轨道上相应

经度区域的 N_G 颗 GEO 卫星 $G_i(i=1,2,\dots,N_G)$ 构成，提供低纬度区域($\pm 70^\circ$)导航卫星覆盖，记 $N_1=\{1,2,\dots,N_G\}$ 。这里取 $N_G=5$ 。

2) 倾斜地球同步轨道卫星（简称 IGSO 星层）

IGSO 星层由分布于倾斜地球同步轨道上相应经度区域的 N_I 颗 IGSO 卫星 $I_i(i=1,2,\dots,N_I)$ 构成，提供高纬度区域导航卫星覆盖，记 $N_1=\{1,2,\dots,N_I\}$ 。这里取 $N_I=3$ 。

3) 中轨星层（简称 MEO 星层）

MEO 星层由星座中所有 MEO 卫星组成，并按 Walker 星座形式组织，提供包括极地区域的全球性通信覆盖。MEO 星层由 $N_M \times M_M$ 颗 MEO 卫星组成，这些卫星平均分布于 N_M 个轨道面上，每个轨道面有 M_M 颗卫星，记 $N_3=\{1,2,\dots,N_M\}$, $M=\{1,2,\dots,M_M\}$ 。这里取 $N_M=3$, $M_M=8$ 。MEO 卫星记为 M_{ij} , i 代表轨道面， j 代表轨道面内的第 j 颗卫星。

4) 地面节点（TS, terrestrial station）

地面节点由主控站、注入站、监测站等分布在地球表面某固定位置的地面站组成，被 GEO 星层、IGSO 星层及 MEO 星层覆盖。设地面站节点由 TS_W 个地面节点 $TS_i(i=1,2,\dots,TS_W)$ 组成。

5) 星间链路

在 MEO 星层中，同一轨道面上的所有 MEO 卫星通过相邻星间链路 ISL_{tra_up} 、 ISL_{tra_down} 相互链接，异轨道面上的 MEO 卫星通过星间链路 ISL_{ter_left} 、 ISL_{ter_right} 链接，在 GEO 星层和 IGSO 星层中不存在星间链路。

6) 星际链路

星际链路是指不同星层之间的信息传输链路，IOL 可细分为 GEO 星层与 MEO 星层间的星际链路 IOL_{g_m} 和 IGSO 星层与 MEO 星层间的星际链路 IOL_{ig_m} 。

7) 星地链路(SGL, satellite ground links)

星地链路为卫星与地面站节点之间的导航综合信息传输链路，SGL 可以细分为 GEO 卫星与地面主控站之间的星地链路 SGL_{g_XX} ，与注入站之间的星地链路 SGL_{g_up} ，与监测站之间的星地链路 SGL_{g_down} ；IGSO 卫星与地面主控站之间的星地链路 SGL_{ig_XX} ，与注入站之间的星地链路 SGL_{ig_up} ，与监测站之间的星地链路 SGL_{ig_down} ；MEO 卫星与地面主控站之间的星地链路 SGL_{m_XX} ，与注入站之间的星地链路 SGL_{m_up} ，与监测站之间的星地链路 SGL_{m_down} ；XX 代表双向链路。

8) 站间链路(IGL, inter ground_station Links)

地面站节点之间的数据交互有 2 种可选方案：一是基于 C 波段数传链路时的卫通链路 $SGL_{GEO_up}/SGL_{GEO_down}$ ；二是基于地面有线网络时基于 TCP/IP 的光纤链路。

表 1 总结分析了以上 8 类北斗卫星导航系统星地一体化传输网络组成节点与链路。

2.2 基于多层分簇的动态拓扑演化

在未来北斗全球卫星导航系统中, GEO 卫星和地面节点的拓扑较稳定, IGSO 和 MEO 星座网络的拓扑结构相对变化, 具有动态性和可预测性。在北斗全球系统传输网拓扑结构动态演化过程中, 为了分析方便, 根据通信节点间相对移动规律将导航网络分为 3 个物理簇: GEO 星层组成的 Cluster1 (记为 C1)、地面运控网组成的 Cluster2 (记为 C2)、IGSO 和 MEO 星层组成的 Cluster3 (记为 C3)。利用 C1 中的 GEO 卫星覆盖域对 C3 中被覆盖的卫星进行分簇管控, 将卫星节点分成簇管理者、簇首、簇成员 3 类角色。簇管理者位于 C1, 与被通信覆盖的 C3 建立一个在一定时间段内相对固定的独立分簇。簇首为与簇管理者直接通信覆盖之下的 C3, 能够与簇管理者保持最佳的星际通信链路。簇成员指能够与簇首一直保持通信路径(多跳卫星链路)的各卫星。如选定 C1 中某 GEO 卫星为簇管理者, 其最佳通信覆盖下的 C3 中某 MEO 卫星为簇首, 与该簇首通过单跳卫星链路直接相连的 2 颗邻轨 MEO 卫星、与该簇首有最佳连接关系的 IGSO 卫星以及与该簇首处于同轨道面所有其他 MEO 卫星为簇成员。簇成员、簇首与簇管理者共同构成一个逻辑簇, MEO 星座的相对运动使簇首角色发生周期性变化, 簇管理者与地面主控站通过星地链路保持一直连通。

考虑到 MEO 星座的独立运行, 即 C1 与 C3 不在建立星际链路, 簇管理者角色由地面主控站充

当, 把 C3 划分为逻辑子簇 a、逻辑子簇 b 和逻辑子簇 c, a 的域首为第一 MEO 轨道面中与地面主控站单跳相连的 MEO 卫星, 簇成员包括与该簇首通过单跳卫星链路直接相连的 2 颗邻轨 MEO 卫星、与该簇首有最佳连接关系的 IGSO 卫星以及与该簇首处于同轨道面所有其他卫星。b 和 c 的簇首和簇成员也同样定义。这样一方面可以保障 C3 中 MEO 星层和 IGSO 星层均能连通地面主控站。另一方面, 通过在子簇之间设由 MEO 卫星担当的边界节点, 负责不同子簇之间网络状态和路由等信息的交换, 既把每个簇内部的拓扑变化相互屏蔽, 又减小了网络管理和路由计算的复杂度。基于多层分簇的北斗全球系统网络拓扑结构如图 2 所示。

在 C3 子簇 a、b 和 c 中按照按某种规则(如与 C2 的综合链接距离最短、链接时间最长、链接倾角最佳等因素等)选择出簇首, 在簇首管理下完成子簇 a、b 和 c 的状态收集与信息分发, 再由簇首向簇管理者 C2 汇集信息或接收控制, 当子簇 a 或 b 或 c 中的所有 MEO 卫星均不能直接链接 C2 时, 选择距离其他两 MEO 轨道上最近的 MEO 卫星为簇首, 并通过异轨星间链路 ISL_{ter_left} 、 ISL_{ter_right} 链接簇首, 间接接触簇管理者。汇集 MEO 星座状态信息至 C2, 或接收来自 C2 的导航电文和控制命令等。这样 MEO 星座即可独立自主运行。C3 中 IGSO 星层的 3 颗 IGSO 卫星分别与子簇 a 或 b 或 c 中距离最近的 MEO 卫星通过星际链路 IOL_{ig_m} 各自建立链接, 通过子簇接触 C2, 即 IGSO 卫星根据其于某子簇的簇首位置关系决定此刻归属的子簇, 汇集 IGSO 星座状态信息至 C2, 或接收来自 C2 的导航电文和控制命令等。由于 MEO 星层的每颗 MEO 卫星的地位都是同等重要的, 即不设特殊地位的 MEO 卫星, 因此 MEO 卫星既可能是簇首, 也可能是簇成员。IGSO 卫星只扮演簇成员的角色。

表 1 未来北斗全球卫星导航系统组成节点与链接链路

	地面站节点			卫星节点			
	主控站 MCS	注入站 ULS	监测站 MS	MEO	IGSO	GEO	
地面站节点	主控站 MCS			SGL_{m_XX}	SGL_{ig_XX}	SGL_{g_XX}	
	注入站 ULS	C 波段数传链路: $SGL_{GEO_up}/SGL_{GEO_down}$; TCP/IP 地面有线网络: 光纤链路 *: XX 代表双向链路			SGL_{m_up}	SGL_{ig_up}	SGL_{g_up}
	监测站 MS			—	—	SGL_{g_up}	
卫星节点	MEO	SGL_{m_XX}	SGL_{m_up}	SGL_{m_down}	ISL_{tra_X}, ISL_{ter_X}	IOL_{m_ig}	IOL_{m_g}
	IGSO	SGL_{ig_XX}	SGL_{ig_up}	SGL_{ig_down}	IOL_{ig_m}	—	—
	GEO	SGL_{g_XX}	SGL_{g_up}	SGL_{g_down}	IOL_{g_m}	—	—

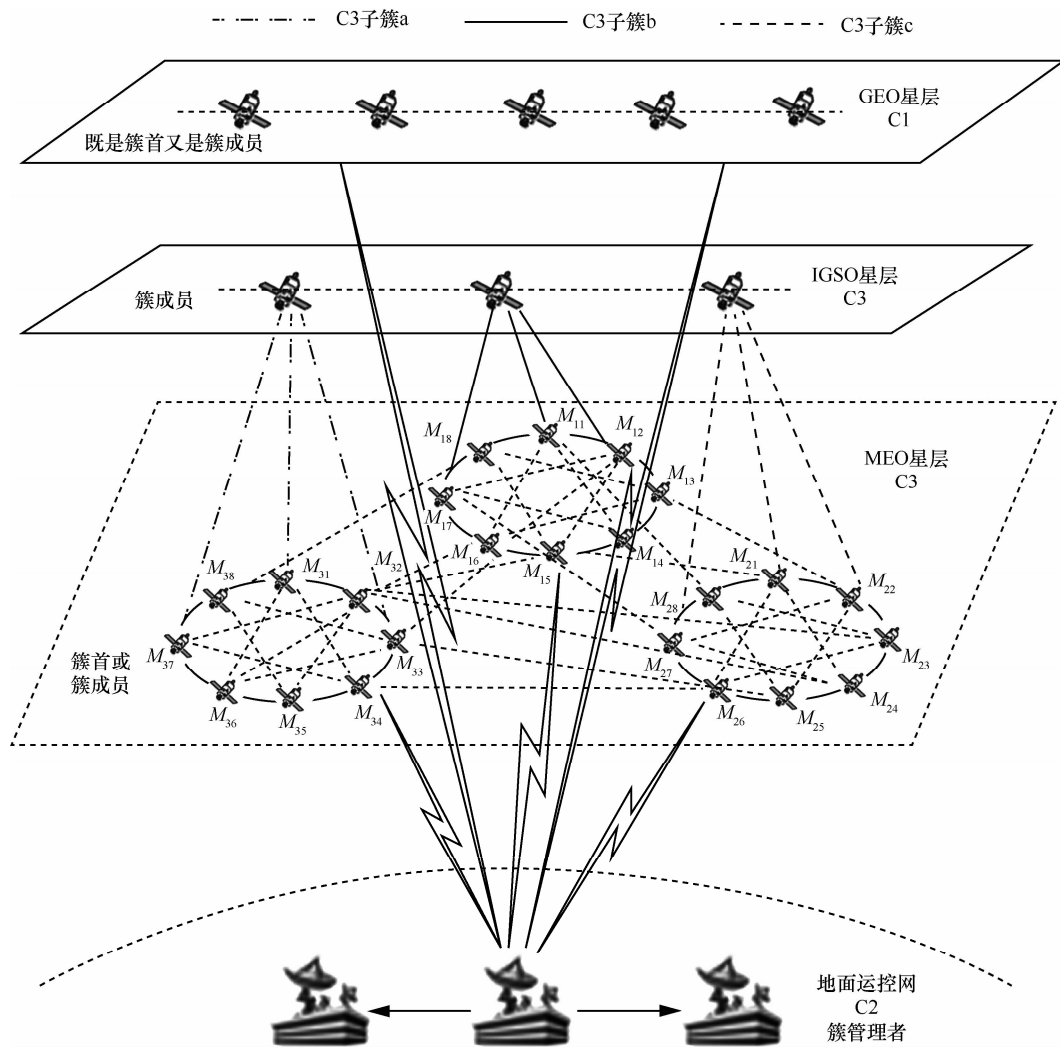


图 2 基于多层分簇的北斗卫星导航网络拓扑结构

C1 中的 GEO 卫星分别通过星地链路 SGL_{g_XX} 、 SGL_{g_up} 和 SGL_{g_down} 接触 C2，汇集 GEO 星座状态信息至 C2，或接收来自 C2 的导航电文和控制命令等。每颗 GEO 卫星既是簇首又是簇成员。

3 基于 MEO 的卫星网络路由策略研究

当考虑到 MEO 星座独立运行时，即 MEO 和 GEO 不发生直接的信息交互。为了降低星上处理复杂度，簇管理者由 C2 的地面主控站担当。图 3 给出了簇管理者对 C1 和 C3 的链路连通性分析，子簇 a、b 和 c 中任意 2 个子簇的 MEO 卫星全时段内与簇管理者保持连接，当某子簇的 MEO 卫星均不能与簇管理者保持连通时，通过相邻子簇的 MEO 卫星链接簇管理者，即通过子簇间的边界节点连通簇管理者。

基于 MEO 的路由策略研究主要解决 2 方面

的问题：一是 C3 的逻辑子簇 a、b、c 的内部路由策略，而 C3 的 IGSO 卫星与 C3 的 MEO 卫星是通过链路选择决定其归属关系，这里主要指子簇内的路由策略，等价于同轨 MEO 卫星的路由策略问题；二是子簇间需要交互网络状态、路由信息及导航综合信息等，子簇间的有边界节点选择问题是基于 MEO 的卫星网络路由策略需要解决的又一问题，等价于异轨 MEO 卫星路由策略问题。

3.1 同轨 MEO 卫星路由策略

同轨卫星相对位置固定，相位差为 180° 的 2 颗卫星由于地球阻挡始终处于不可见状态，其余卫星则始终处于可见状态，满足建立永久星间链路的条件。以每颗 MEO 卫星可建立两条轨内星间链路为例，考虑到网络对称性等因素，主要设计了图 3 所示的环形、八角星和闭合环 3 种链路模式。

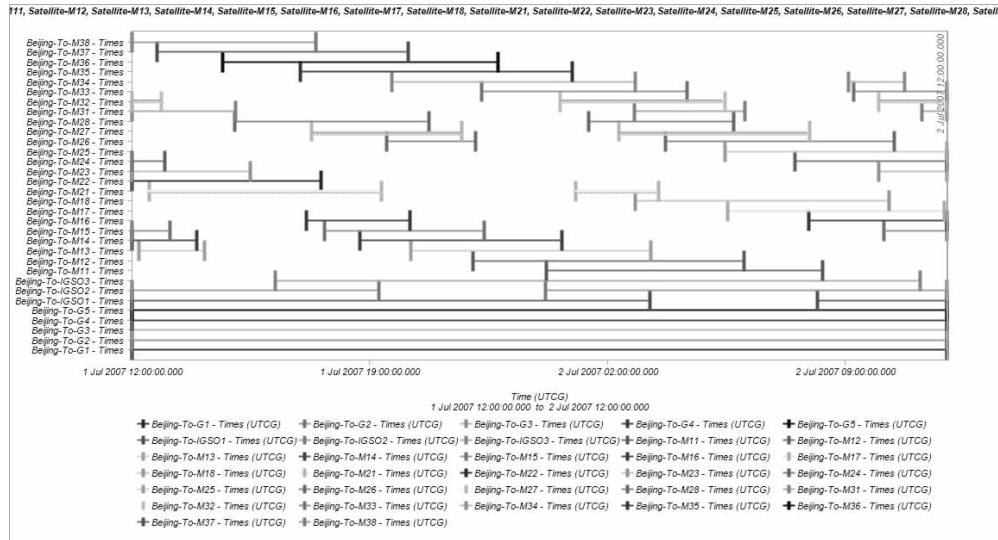


图 3 簇管理者对 C1 和 C3 的链路连通性

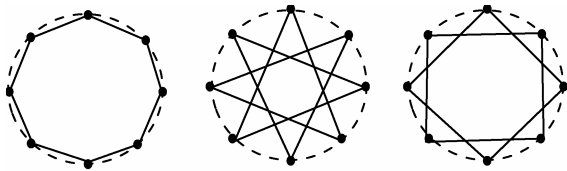


图 4 同轨 MEO 星间链路链接模式

第 3 种链接模式存在着 2 个闭合的星间链路环，两环彼此之间无法传输数据，显然并不适合实际应用。主要分析同轨 MEO 环形结构和八角星结构的链接形式。根据 Walker 星座的空间对称性可知，轨道面中任一卫星的几何特性都可以代表该星座中所有星的几何特性，因此只需讨论 $M11$ 的各项参数，就可以推导出其他 7 颗星的相关参数。设环形拓扑同轨建链卫星集合 S_i ，八角星拓扑同轨建链卫星集合 $S'i$ ，设地面站集合 $E=\{\text{北京站, 喀什站, 三亚站}\}$ 。以卫星 $M11$ 为例，则 $S11=\{M11, M12, M18\}$ ， $S'11=\{M11, M14, M16\}$ 。仿真时间设为 24 h，图 5 和图 6 展示了在一个仿真周期内，集合 $S11$ 、 $S'11$ 以及其他轨道面卫星对于集合 E 的可见关系。

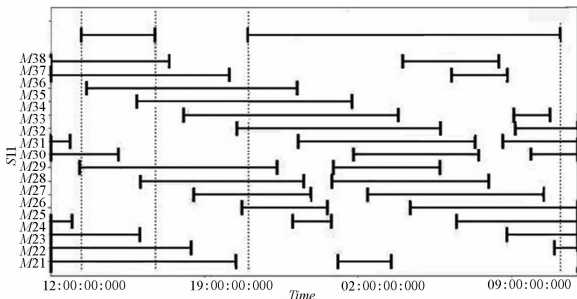


图 5 S11 及其他卫星对于集合 E 的可见关系

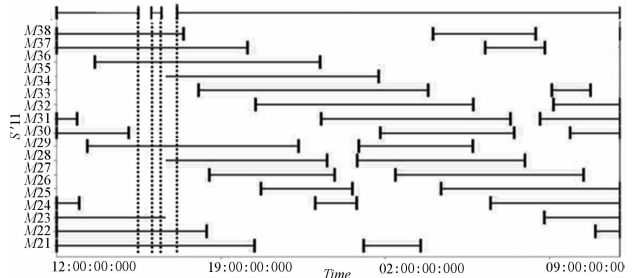


图 6 S'11 及其他卫星对于集合 E 的可见关系

对于环形拓扑集合 $S11$ ，由于其 3 颗卫星本身距离较近，可见区间重叠较多，导致集合 $S11$ 对集合 E 存在较大的可见盲区，在此盲区内对地面站始终可见的异轨卫星并不存在，也就是说，对于环形拓扑，无法实现两跳内对地面站的全覆盖。而对于八角星拓扑集合 $S'11$ ，在 $S11$ 对 E 的可见盲区里， E 可见的异轨卫星有 $M21$ 、 $M22$ 、 $M28$ 、 $M36$ 、 $M37$ 、 $M38$ 这 6 颗卫星，可选范围明显较大。通过分析计算可以得出，当 $M11$ 对地面站不可见时，其他各卫星对地面站的可见概率如表 2 所示。

表 2 M11 对地不可见时其他各星的对地可见概率

卫星	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
对地面站可见概率	20%	40%	57%	59%	55%	38%	19%

在可建立星间链路的 6 颗卫星中，环形拓扑选取的 2 颗卫星 $M12$ 和 $M18$ 对地可见概率最小，八角星拓扑选取的 2 颗卫星 $M14$ 和 $M16$ 对地可见概率较大。同轨星间链路链接选择八角星模式，

即 C3 子簇内 MEO 的链接模式选择八角星结构，图 7 为同轨（子簇）MEO 卫星的信息传输路径选择。

白色圈代表路由表数据分组第一次到达卫星，转发给与其相连接的其他 2 颗卫星，与其相连的另外一颗数据分组源的卫星不转发；阴影圈代表卫星已经接收到路由表数据分组。从 M11 出发进行广播，所有卫星均接收到路由表信息最多需要 4 跳，平均需要 2 跳。

3.2 异轨 MEO 卫星路由策略

仅通过同轨（簇内）MEO 卫星仍然无法保证 C3 对簇管理者的全程覆盖，必须借助异轨 MEO 卫星的中继转发，通过子簇间的边界节点完成 MEO 卫星节点与簇管理者的全程导航综合信息传输。在选择异轨 MEO 卫星时，重点考虑当本星节点以及指向的同轨 MEO 卫星都无法覆盖簇管理者时，异轨可视卫星的最大覆盖情况。

可见关系通过 2 个 0-1 矩阵 V_1 和 V_2 来描述。 $V_1=[v_{gi}]$ 用来描述卫星与 C2 地面站之间的可见关系， g 为系统中的地面站节点， i 为 C3 中的 MEO 卫星节点。 $V_2=[v_{ij}]$ 用来描述卫星之间的可见关系， i 与 j 均为 C3 的 MEO 卫星节点。矩阵中的元素 $v=1$ 表示两节点可见， $v=0$ 则表示两节点不可见。导航系统星间链路分配方案通过 0-1 矩阵 $L=[l_{ij}]$

来描述，元素 $l_{ij}=1$ 表示在卫星 i 与卫星 j 之间建立星间链路， $l_{ij}=0$ 表示在卫星 i 与卫星 j 之间不建立星间链路。

在研究异轨 MEO 星间链路的分配矩阵时，以卫星到地面站的导航综合信息传输的跳数为优化目标，通过迭代处理的方式寻求异轨 MEO 链路分配的最优解。最小条数的优化过程中，遵循以下 3 个原则：1) 当卫星可见地面站时，卫星直接与地面站通信，信息传输只需要一跳；2) 当卫星不可见地面站时，首先考虑星间链路状态稳定的同轨卫星，在与其建链的 2 颗同轨卫星中选择可以与地面站直接通信的卫星进行中继，信息传输需要两跳；3) 当卫星和其建链的 2 颗同轨卫星都不能与地面站直接通信时，选择与地面站可见的异轨卫星建立星间链路，进行中继，信息传输过程依然只需要两跳；若以上情况皆不满足，则进一步进行中继。异轨 MEO 卫星路由策略通过星间链路分配矩阵 L 来得到，具体流程如下。

步骤 1 贪婪建链。

输入：卫星间可见关系矩阵 V_2 。

输出：贪婪链路分配矩阵 L_1 。

操作：读取卫星间可见关系矩阵 V_2 ，对于所有的 $v_{ij}=1$ ，置 $l_{ij}=1$ ，即在所有能够满足可见性建链前提卫星间，贪婪式地建立星间链路。

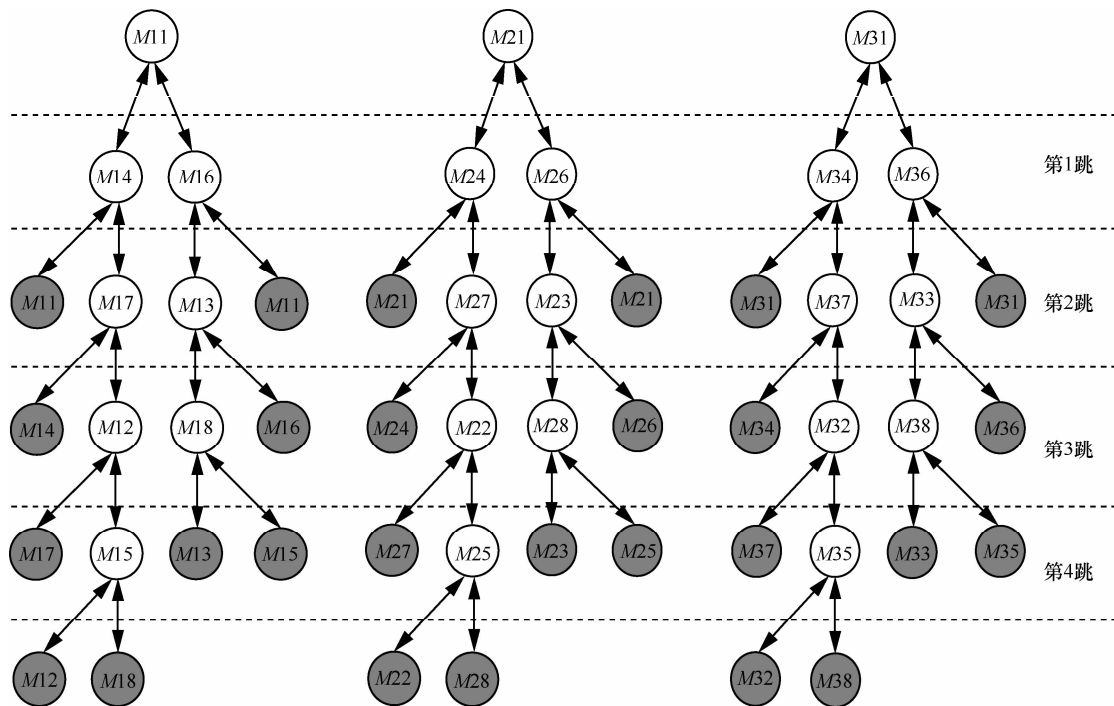


图 7 同轨（子簇）MEO 的信息传输路径选择

步骤 2 星地可见性筛选。

输入：卫星与地面站的可见关系矩阵 V_1 ，贪婪链路分配矩阵 L_1 。

输出：筛选链路分配矩阵 L_2 。

操作：读取卫星与地面站的可见关系矩阵 V_1 ，当 $v_{gi}=0$ 时，若 $v_{gj}=0$ ，置 $l_{ij}=0$ 。筛选出当卫星与地面站不可见时，可以与地面站直接通信的卫星进行建链，对同样与地面站不可见的卫星间的星间链路进行拆除。

步骤 3 链路双向选择优化。

输入：筛选链路分配矩阵 L_2 。

输出：双选优化链路分配矩阵 L_3 。

操作：读取筛选链路分配矩阵 L_2 ，当且仅当 l_{ij} 与 l_{ji} 同时为 1 时，保留该值，否则置 0。按照星间链路的双向选择条件进行筛选，保证所建链路同时满足 2 颗卫星的要求，对不能满足双选的星间链路进行拆除。

步骤 4 数量限制。

输入： k ，双选优化链路分配矩阵 L_3 。

输出：链路分配矩阵 L 。

操作：依次检查双选优化链路分配矩阵 L_3 每一列是否存在 1 的数量超过 $k-1$ ，在保证整网连通的前提下，对超过的部分进行置 0，拆除大于可用天线数量的星间链路。

整个建链过程经过了贪婪建链、星地可见性筛选、链路双向选择优化和数量限制 4 个步骤，以贪

婪的方式进行建链后，根据约束条件限制依次进行链路拆除，最终得到所需的链路分配矩阵。表 3 为一天运行时间内，各卫星的最佳异轨星间链路选择，也就是子簇 a、b、c 间的边界节点选择表。需要注意的是，不同时间段内，异轨卫星的选择可能不同。

表 3 异轨星间链路（簇间边界节点）选择

轨道 1—轨道 2	轨道 1—轨道 3	轨道 2—轨道 3
M11-M28	M12-M35	M23-M32
M13-M22	M14-M37	M24-M31
M15-M21	M16-M36	M25-M33
M17-M27	M18-M38	M26-M34

首先以 M11 卫星起始，与 M11 相连的卫星包括 M14、M16 和 M28，M11 发送的数据可以通过 M14 到达与 M14 相连的 M17 和 M28，通过 M16 到达与 M16 相连的 M13 和 M36，通过 M28 到达与 M28 相连的 M23 和 M25……以此类推，从 M11 出发，可以到达同轨和异轨的所有其他 23 颗卫星。也就是说，可保证 C3 内任意 2 颗 MEO 卫星间存在一条或多条可行路径。这里，采用最少跳数作为最短路径的度量标准。图 8 为同轨星间链路和最佳异轨星间链路支持下 C3 中 MEO 星层的信息传输路径选择。

当路由表数据分组从 M11 出发进行广播，所有卫星均接收到路由表信息最多需要 4 跳，平均需要 2.58 跳。北斗全球导航卫星系统传输网络路由信息、

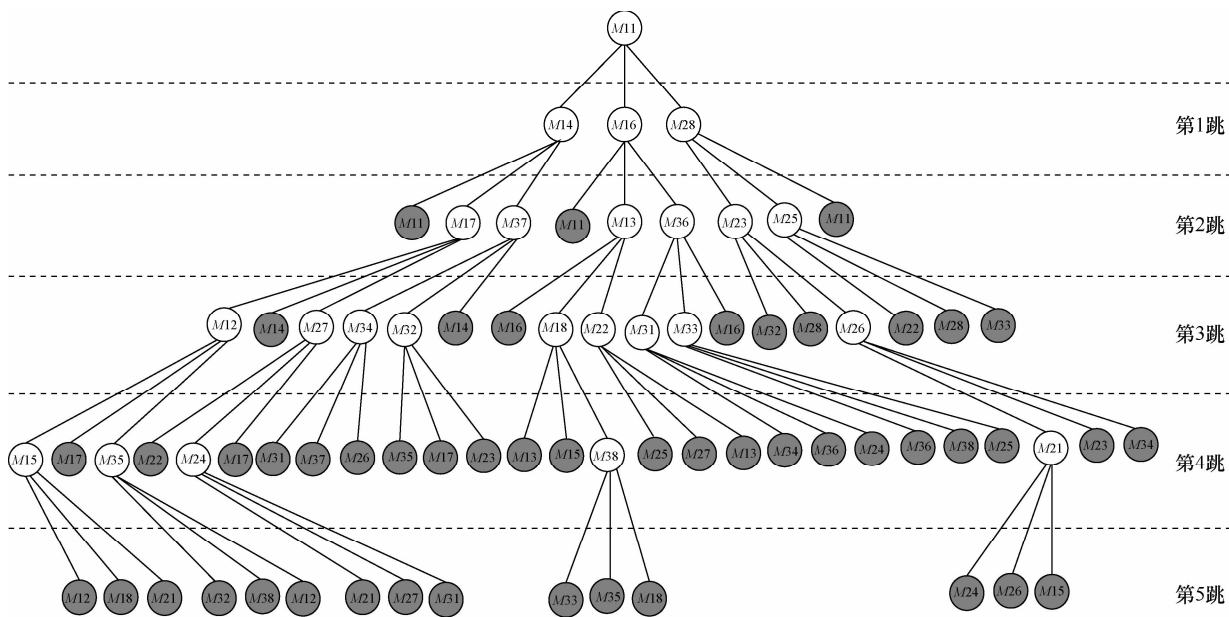


图 8 C3 内 MEO 的信息传输路径选择

网络状态信息和导航综合信息的分发采用簇管理者(地面主控站) ↔ 簇首(MEO 或 GEO) ↔ 簇成员(MEO、IGSO 或 GEO)的 3 级信息汇总与分发机制。簇内的所有卫星节点的状态信息可根据需要随时分别向簇首方向传递并汇聚,再由簇首将汇聚信息传递到簇管理者,最后在簇管理者内综合汇聚全网范围内的状态信息,形成当前时间片内的网络状态实时信息,再通过整理加工形成面向特定路由策略与算法的约束信息。若状态信息表明网络拓扑结构发生变化,则启动路由算法重新计算路由路径,得到实时反映星间网络拓扑结构改变的路由更新信息,重新按分簇机制从簇首至簇成员分发路由更新信息,此时路由更新信息才能作为导航综合信息传输的依据。

4 基于 GEO 的卫星网络路由策略研究

基于 MEO 卫星的网络路由策略实现两节点的信息传输可能需要多跳链路,而系统对精密定轨和时间同步信息的要求是不超过一条,显然,对于这类信息仅仅依靠 MEO 卫星的中继转发是不够的。MEO 星层、IGSO 星层和 GEO 星层协同工作完成全球范围内的导航、定位和授时服务,通过星际链路 $IOL_{g,m}$ 把 GEO 星层和 MEO 星层联系在一起,即 C1 和 C3 是有信息交互的。基于 GEO 的卫星网络路由策略实质上通过 GEO 星层内的某颗适宜 GEO 卫星来实现对 C2 不可视 MEO 卫星进行上行中继注入和下行中继传输。可满足系统的精密定轨与时间同步时中继跳数不超过一跳的要求,其路由策略也相对简单。

首先分析 GEO 对 MEO 的运行覆盖关系。由于 Walker 星座的特点,选取 M11 作为 MEO 卫星的代表,同样与 5 颗 GEO 卫星建立星际链路 IOL,图 9~图 11 仿真了 5 条 IOL 的 AER(方位角、仰角、距离)参数。

从图 9~图 11 的仿真结果可以得出如下结果。

1) 由于地球的遮挡, GEO 卫星对 M11 卫星并非全天可见,存在约 100 min 的不可见时段,占据仿真时间的 6.9%。

2) 距离在 14 000~70 000 km 之间动态变化,相对于这个剧烈的变化范围来说,方位角和俯仰角的变化不明显,从 AER 参数的静态特性来看,距离是区分 5 条 IOL 的主要因素。

3) 从 AER 的动态特性来看, 5 条星间链路之

间没有优劣之分。

如果仅以没有地球遮挡来定义卫星之间的“可见性”,只需要一颗 GEO 卫星就可以对 MEO 星层进行覆盖。但是, GEO 卫星和 MEO 卫星之间的距离变化范围是 14 000~70 000 km,过长的距离并不适合建立通信链路。如 GPS 星座 2 颗导航卫星之间的距离观测值最大为 50 000 km,这主要受限于卫星的发射功率。这里把距离上限 40 000 km 定义为卫星之间“可见”的距离上限, M11 与 G1~G5 可见的时间分别缩短为: 397、618、634、397 和 404 min。因此,可见时长成为 5 条链路的择优标准。G3 最适合作为 M11 的建链对象。

需要经过 GEO 中继实现信息传输的节点主要是 C2 地面站节点均不可视的 MEO 卫星(记为 Q),通过簇管理者地面主控站的合理规划,按照距离优先原则,集合 Q 中 MEO 卫星节点分配至各自的 GEO 卫星 G1、G2、G3、G4、G5,集合 Q 中 MEO 卫星节点分别与 GEO 卫星建立当前传输周期内的固定指派的星际链路 $IOL_{g,m}$ 。即在当前传输周期内,集合 Q 中距离 G1 较近的 MEO 卫星与 G1 建立星际链路 $IOL_{MEO-GEO1}$,集合 Q 中距离 G2 较近的 MEO 卫星与 G2 建立星际链路 $IOL_{MEO-GEO2}$,集合 Q 中距离 G3 较近的 MEO 卫星与 G3 建立星际链路 $IOL_{MEO-GEO3}$,集合 Q 中距离 G4 较近的 MEO 卫星与 G4 建立星际链路 $IOL_{MEO-GEO4}$,集合 Q 中距离 G5 较近的 MEO 卫星与 G5 建立星际链路 $IOL_{MEO-GEO5}$ 。这里的 GEO 卫星相当于簇首,集合 Q 中的 MEO 为簇成员。

在进行信息传输时,集合 Q 中簇成员 MEO ↔ 簇首 G1(或 G2 或 G3 或 G4 或 G5) ↔ 簇管理者,完成簇管理者与不可视 MEO 卫星之间的信息传输,精密定轨与时间同步等要求中继跳数不超过 1 跳的业务功能,因此不存在复杂的路径选择问题,路由策略也相对简单。

5 结束语

本文重点研究了立体交叉的未来北斗全球卫星导航信息传输网络的动态拓扑演化和路由策略两方面的问题,本文的主要贡献是提出了基于多层分簇架构的动态网络拓扑和路由策略的思想、设计了基于簇管理者、簇首和簇成员的 3 级信息传输与分发机制、研究了子簇间信息交互的边界节点设置问题,有利于网络管理和信息分发。在后续工作中,

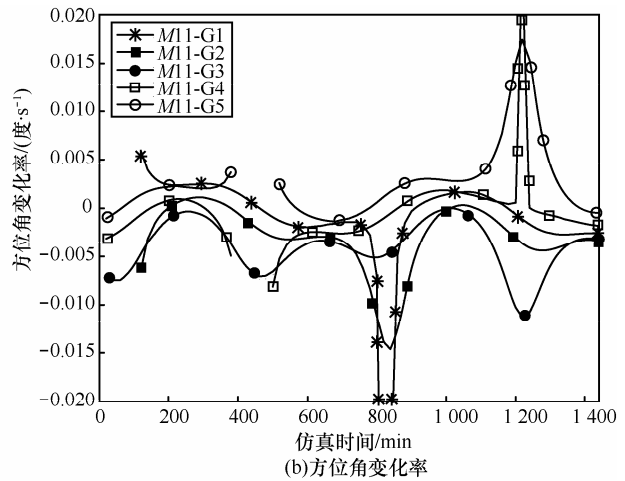
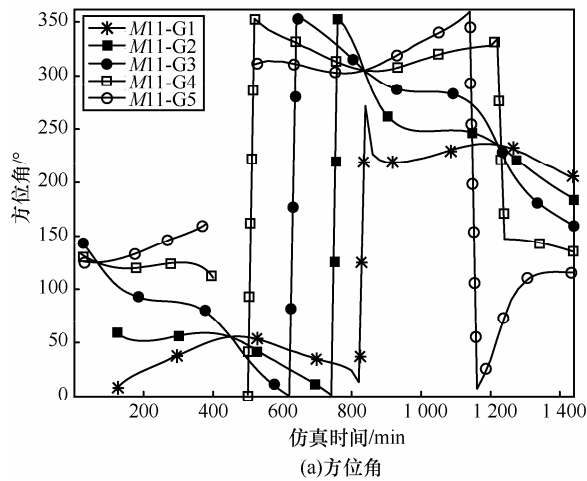


图 9 M11 到 GEO 卫星的方位角特性

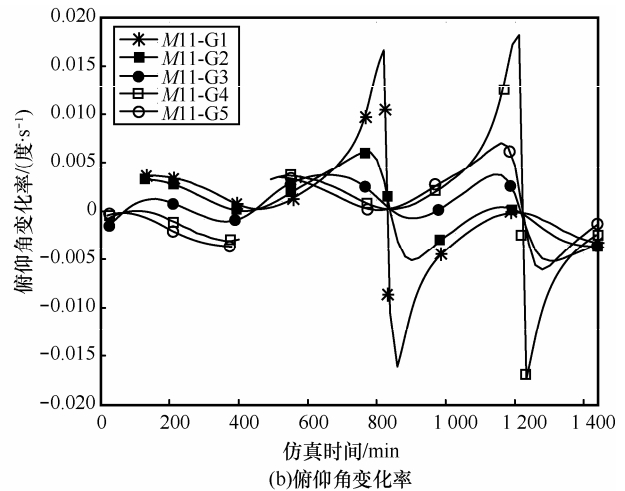
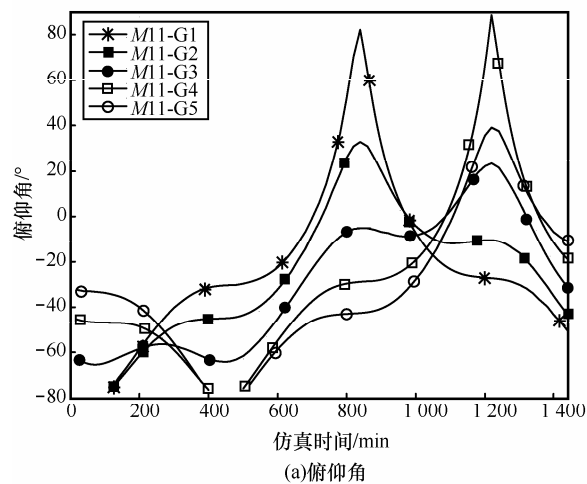


图 10 M11 到 GEO 卫星的俯仰角特性

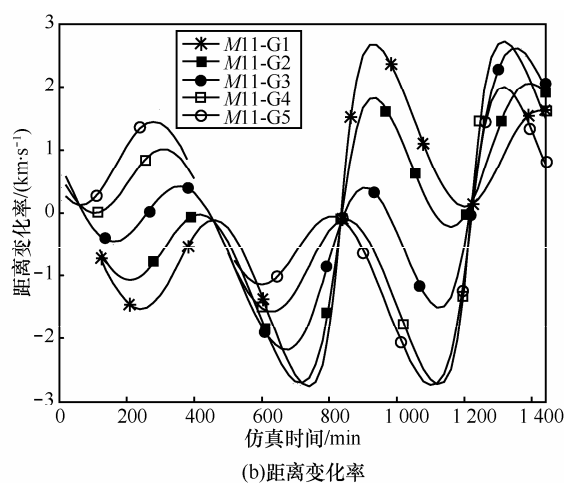
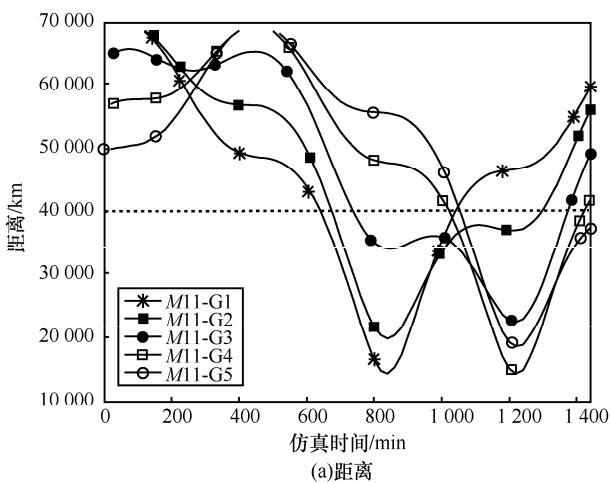


图 11 M11 到 GEO 卫星的距离特性

将考虑在某通信链路发生故障等致使网络拓扑变化的情况下，研究基于最新拓扑结构的路由更新机制和路由算法。同时，准确掌握未来北斗系统的天

线工作体制、运控、测控以及星间中继信息等业务传输需求，研究分析路由和分簇等算法的吞吐率、延时、分组丢失率具体性能。

参考文献:

- [1] AVILA R, JOES A. A vision on new frequencies, signals and concepts for future GNSS systems[A]. Pro of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Texas, 2007. 517-534.
- [2] 纪龙蛰, 单庆晓. GNSS 全球卫星导航系统发展概况及最新进展[J]. 导航定位学报, 2012,37(5):56-61.
- JI L Z, SHAN Q X. The development outline and latest evolution of global navigation satellite systems[J]. Journal of Navigation and Position, 2012,37(5):56-61.
- [3] China National Administration of GNSS and Applications. Development and applications of compass/beidou satellite navigation system[A]. Pro of the United Nations/Azerbaijan/United States of America/ European Space Agency Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems[C]. Baku, Azerbaijan, 2009.117-126.
- [4] 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 S S. Development and thought of Beidou navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2):391-396.
- [5] HUANG Y S, TSAI M L. The impact of compass/Beidou-2 on future GNSS: a perspective from asia[A]. ION GNSS 21st[C]. Savannah, GA, 2008.2227-2238.
- [6] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS Principles and Application[M] Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [7] HOLMES J K, RAGHAVAN S. A summary of the new GPS IIR-M and IIF modernization signals[A]. Pro of the 2004 IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Los Angeles, 2004. 4116-4126.
- [8] LUBA O, BOYD L, GOWER A. GPS III system operations concepts[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(1): 10-18.
- [9] SANCHEZ M, PULIDO J A. The ESA “GNSS+” project inter-satellite ranging and communication links in the frame of the GNSS infrastructure evolutions[A]. Pro of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Georgia, 2008. 2538-2546.
- [10] ERIC S, CHARLES F. Global/regional advanced autonomous localization system[A]. Pro of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Georgia, 2009. 1386-1395.
- [11] KIMURA K, INAGAKI K, KARASAWA Y. Double-layered inclined orbit constellation for advanced satellite communication network[J]. IEICE Transaction on Communication, 1997, 80(1):93-102.
- [12] DASH D, DURRESI A, JAIN R. Routing of VoIP traffic in multi-layered satellite networks[A]. Pro of Performance and Control of Next-Generation Communications Networks[C]. Orlando Florida, 2003.7-11.
- [13] IAN F A, EKICI E, MICHAEL D B. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 2002,10(3):411-424.
- [14] 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 Z Y. Design and Analysis of Multi-layer Satellite Network Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [15] 易先清, 冯明月, 赵阳. 一种基于 GEO/MEO 星层组网的抗毁路由研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(8):74-82.
- YI X Q, FENG M Y, ZHAO Y. A destruction-resistant routing algorithm of satellite network based on GEO/MEO constellation[J]. Computer Science, 2007, 34(8):74-82.
- [16] BANDYOPADHYAY S, COYLE E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[A]. IEEE INFOCOM'03[C]. San Francisco, USA, 2003. 1713-1723.
- [17] 姜勇. 基于拉格朗日平动点的行星际互联网组网技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2012.
- JIANG Y. Research on Networking Technology of InterPlanetary Internet Based on Libration Points[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2012.
- [18] 郭炎鑫, 郑刚. 多层卫星网络链路中断容忍路由策略设计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1892-1897.
- GUO Y X, ZHENG G. Design of a link disruption tolerant routing strategy in multilayered satellite network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8): 1892-1897.
- [19] 周林, 娇文成, 吴杨. 一种基于层簇式的卫星网络组网管理方案 [J]. 宇航学报, 2013,34(4):559-567.
- ZHOU L, JIAO W C, WU Y. A group key agreement protocol based on layer-cluster for satellite network[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(4):559-567.

作者简介:



李飞龙 (1988-), 男, 安徽阜阳人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为卫星导航、卫星测控等。

李广侠 (1964-), 男, 浙江永康人, 解放军理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星导航、卫星通信、卫星测控等。

李志强 (1974-), 男, 安徽黄山人, 解放军理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为卫星测控、卫星通信、卫星导航等。

彭锋彬 (1986-), 男, 福建泉州人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为 DTN 网络关键技术等。