

空间信息网络中的星座设计方法研究

Satellite Constellation Design in Space Information Network

张威/ZHANG Wei
张更新/ZHANG Gengxin
苟亮/GOU Liang

(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)
(PLA University of Science and
Technology, Nanjing 210007, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0019-005

摘要: 提出了一种“骨干网+增强网”的混合星座设计方法,即以 GEO 卫星节点构成骨干网,以 IGSO、HEO、MEO 或 LEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网,实现全球覆盖。并设计了一种“4GEO+5IGSO”混合星座,对其覆盖性能进行了详细分析。仿真结果表明,所提出的方法采用较少数量的卫星即可满足全球无缝覆盖并可仅依靠中国信关站落地。

关键词: 空间信息网络; 星座设计; 混合星座; GEO 卫星; IGSO 卫星

Abstract: In this paper, “backbone network + enhanced network” hybrid constellation design approach is proposed. In this approach, backbone network is composed of geostationary orbit (GEO) satellites, while the enhanced network can be composed of inclined geosynchronous satellite orbit (IGSO), highly elliptical orbit (HEO), medium earth orbit (MEO) or low earth orbit (LEO) satellites. The hybrid constellation can cover the earth seamlessly. Then, the hybrid “4GEO+5IGSO” constellation is designed, and the coverage performance of this constellation is analyzed in detail. Simulation results show that the proposed approach can realize global seamless coverage using a small number of satellite nodes, which can only rely on China gateways.

Key words: space information network; constellation design; hybrid constellation; GEO satellite; IGSO satellite

纵观世界范围,各类卫星通信系统的建设仍然表现出各自为政、独立建设的局面。各系统针对不同的任务需求和服务对象构建,系统缺乏一般性、通用性和相互协作的能力,形成重复建设、“烟囱式”发展的不利局面。例如,仅 40°E ~ 180°E 的亚太地区就有 120 多个静止轨道 (GEO) 位置用于卫星移动通信^[1-2],而各类宽带通信、数据中继、气象、导航卫星更占用了大量轨道资源。并且单个系统针对既定任务设计,系统完成任务后会出现较多空闲状态,无法对空间资源进行整体配置。此外,由于频谱和轨道等资源的限制,各系统的全域覆盖能力有限,不同的技术体制更导致网络扩展能力差。空间信息网络的提出为解决上述问题提供了有效途径,已成为全球范围的研究热点^[3-6]。

空间信息网络是以多种空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星,平流层气球和有人或无人驾驶飞机等)为载体,实时获取、传输和处理各类

信息的网络系统。作为国家重要基础设施,空间信息网络在服务远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用的同时,向下可支持对地观测的高动态、宽带实时传输,向上可支持深空探测的超远程、大时延可靠传输,从而将人类科学、文化、生产活动拓展至空间、远洋、乃至深空^[7]。

相比传统卫星网络,空间信息网络结构复杂,包含了多种类型节点。但由卫星节点组成的网络仍是整个空间信息网络承载业务的核心,其工作方式、覆盖特点直接影响整个空间信息网络的效能,是空间信息网络建设过程中需要重点考虑的内容。然

而,卫星节点一般处于高速轨道运行状态,卫星节点间需要相互协同,构成星座,才能实现良好的空时覆盖性能。此外,中国静止卫星轨道位置、频率资源稀缺,也没有条件建设类似美国全球电信港的海外基地,仅能在国土内建设信关站,这对空间信息网络的星座设计增加了额外约束条件。

根据调研,现有大部分空间系统均采用单轨道类型星座,譬如采用 GEO 卫星组成星座的 Thuraya^[8]、Inmarsat^[9]等系统,采用中轨道 (MEO) 卫星组成星座的 O3b^[10]、全球定位系统 (GPS)^[11]、GLONASS^[12],采用低轨道 (LEO) 卫星组成星座的 Iridium^[13]、Globalstar^[14]、Orbcomm^[15]等。单一轨

收稿时间: 2016-05-23

网络出版时间: 2016-07-05

基金项目: 国家自然科学基金
(91338201、91438109、61571464、61401507)

道类型星座具有较为成熟的设计方法,一般采用 Walker 星座^[16]的形式来进行星座设计。但单一轨道类型星座具有明显的不足:GEO 星座对中、高纬度地区平均覆盖仰角较低,衰落余量大,存在“南山效应”,两极附近有通信盲区;MEO、LEO 需要大量卫星组成星座才能实现区域或全球无缝覆盖,运行费用高。针对该问题,有大量文献对新的星座形式进行了探讨,其中以多层卫星网络^[17](MLSN)最具代表性。多层卫星网络在不同的轨道高度上同时布星,利用星间链路(ISL)建立立体交叉卫星网络,从而将各种轨道高度卫星的优势进行互补。但现有文献对多层卫星网络的研究主要集中在其组网和路由方面^[18-21],并没有回答好多层卫星星座如何设计这个问题。

针对上述问题,我们从混合星座设计的角度考虑空间信息网络中提供信息服务的卫星节点布设方法。混合星座采用不同轨道类型(GEO、倾斜地球同步轨道(IGSO)、高椭圆轨道(HEO)等)的卫星组成星座,相互之间优势互补,具有比单轨道类型星座更好的性能。在文章中,我们首先提出了一种“骨干网+增强网”的混合星座设计方法,以 GEO 卫星节点构成骨干网,以 IGSO、HEO、MEO 或 LEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网,实现全球覆盖。与多层卫星网不同的是:该方法分清了星座组成中的“主”和“次”,并且星座中卫星轨道高度可以相同。然后利用该方法针对中国仅限国内建设信关站的国情,设计了一种“GEO+IGSO”混合星座,对其覆盖性能进行了详细分析。仿真结果表明:所提方法采用较少的卫星即能满足全球无缝覆盖并可仅依靠中国信关站落地。

1 “骨干网+增强网”混合星座设计方法

文章中,我们从业界普遍认同的“空间骨干节点”出发,提出一种骨干

网+增强网的混合星座设计方法:采用 GEO 卫星作为骨干网,采用其他类型卫星作为增强手段。该星座设计方法将整个星座的构建过程分为两个阶段,具体描述如下。

(1)阶段 1。GEO 卫星工作于距离地面高度为 35 786 km 的赤道轨道上,相对地面保持静止,覆盖范围大,且技术相对成熟,运行维护方便。因此,在节点布设的第 1 个阶段,采用 3~5 个分布在不同轨道位置上 GEO 星群组成空间骨干网。这里,考虑到轨道位置受限,每个轨道位置上布设多颗 GEO 卫星节点,物理上可能包括通信、中继、遥感、导航等多种卫星,逻辑上可以看作一个信息服务节点,星群内卫星协作完成包括信息获取、处理、传输、交换、存储、分发等功能。GEO 星群之间和星群内各卫星之间可通过高速的微波或激光星间链路实现信息交换。境外 GEO 卫星通过星间链路迂回,仅依靠中国信关站落地。当骨干网节点布设完毕后,空间信息网络的基本功能就已初步具备。

(2)阶段 2。由于 GEO 卫星节点的轨道特性,骨干网对中、高纬度地区平均覆盖仰角较低,衰落余量大,存在南山效应,无法覆盖南北两极。需要借助其他轨道类型的卫星来增强其覆盖能力,弥补其不足。为了便于设计和建设,一般应采用同一轨道类型的卫星(譬如采用 IGSO 卫星、HEO 卫星、MEO 卫星或 LEO 卫星等)对骨干网的覆盖进行增强。在该阶段需要对中高纬度地区、两极地区进行覆盖增强,提高热点区域的系统可用度,解决中、高纬度地区、城市、峡谷、山区、丛林等 GEO 卫星节点视线受限区域的信息服务需求。

2 混合星座设计方案

2.1 GEO 卫星骨干网节点位置选取

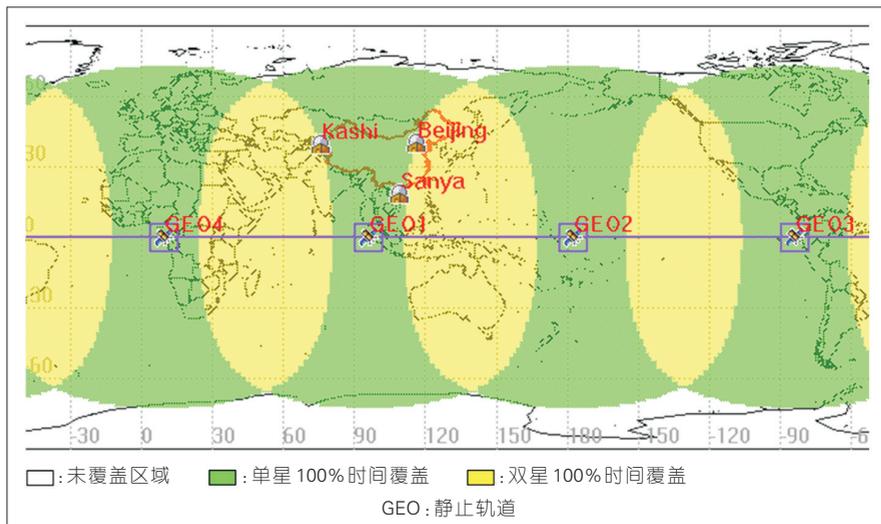
考虑到中国没有条件建设类似美国全球电信港的海外信关站,因

此,GEO 卫星骨干网节点布设过程中需重点考虑中国信关站地点这一约束条件。我们经过调研选取北京(39.9°N, 116.4°E)、喀什(39.5°N, 76.0°E)以及三亚(18.2°N, 109.5°E)3 个典型地点的信关站作为空间节点布设的约束条件。在实际应用中,卫星的波束边缘仰角需要留有余量,在文中的覆盖分析中,波束边缘仰角取 10°。考虑到中国信关站地址的限制,骨干网中的 GEO 卫星节点应尽可能多地对中国信关可见。这里考虑采用 4 颗 GEO 卫星的策略。

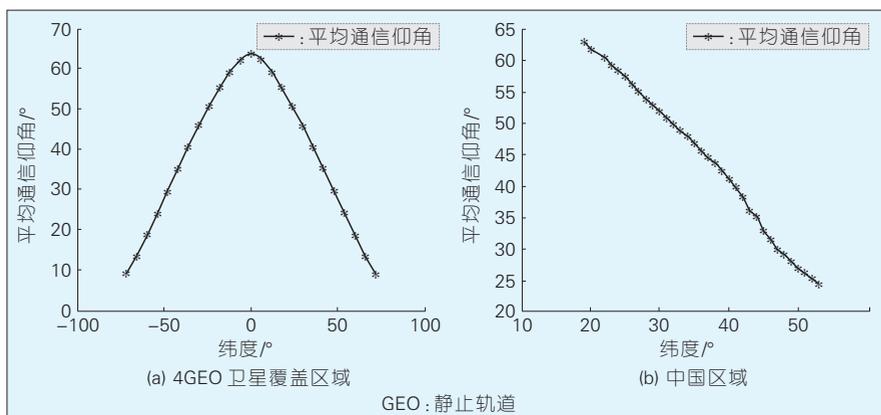
为使更多卫星节点对中国信关站直接可见,且兼顾中低纬度地区的覆盖。首先,根据位于最东的北京信关站(39.9°N, 116.4°E)以及波束边缘仰角 10°来确定中国领土东部 GEO2 节点的定点位置,为 177.5°W;然后,根据位于最西的喀什信关站(39.5°N, 76.0°E)确定中国领土西部 GEO4 节点的定点位置,为 9.8°E。GEO1 和 GEO3 节点分别位于 GEO2 和 GEO4 节点间空隙的中点位置,定点位置分别为 96.1°E 和 83.9°W。4 颗 GEO 卫星通过固定星间链路组成环路。如图 1 所示,GEO1、GEO2 和 GEO4 节点均能被中国信关站可见,唯一不可见的 GEO3 节点信息可以通过 GEO2 或 GEO4 一跳中继落地中国信关站。该方案能够覆盖南北纬 63.7°以内的区域。该方案在其覆盖区和中国区域的平均通信仰角如图 2 所示。可以看出:该方案在中国区域的平均通信仰角明显高于 3GEO 方案。

2.2 GEO+IGSO 混合星座

IGSO 卫星与 GEO 卫星具有相同的轨道高度,因此具有与地球自转周期相同的轨道周期,能够充分继承 GEO 卫星的优点,便于与 GEO 卫星组网融合。IGSO 卫星可以采用两种方式构成星座:地面同轨迹 IGSO 星座,星座中所有 IGSO 卫星具有相同的地面轨迹(地面轨迹成 8 字形,卫星倾角越大,8 字越大),但卫星位于不同



▲图1 4GEO卫星对地覆盖情况(波束边缘仰角为 10°)



▲图2 4GEO卫星的平均通信仰角

的轨道面,卫星之间的相对位置时刻变化;同轨道面IGSO卫星,星座中IGSO卫星位于同一轨道面内,相互之间相对静止,便于建立星间链路。

地面同轨道面的IGSO卫星能够对固定区域(譬如中国区域)进行接力覆盖,增强中国及周边区域的覆盖性能。但是,由于中国信关站局限在领土范围内,当IGSO卫星轨道倾角较高时,IGSO卫星星下点位于南极附近时对信关站不可见。表1给出了不同轨道倾角的IGSO卫星在一天中对信关站的不可见时间长度,其中IGSO卫星升交点经度为 109.5°E (与三亚信关站经度相同),信关站为三亚($18.2^\circ\text{N}, 109.5^\circ\text{E}$)。

信息服务节点之间的链路一般

是高速宽带链路,星间链路波束宽度非常小。由于同地面轨迹的IGSO卫星位于不同的轨道,相互之间的俯仰和方位角实时变化,如果相互之间建立高速星间链路将对天线跟踪和对准提出极高的要求,并且天线时刻调整对准方位也严重影响了使用寿命。因此,星座设计中,相对运动的卫星节点间尽可能不建立星间链路,以保证信息服务节点的高效、可靠的运行。

然而,若地面同轨道面IGSO卫星间

不建立星间链路,从表1可知,卫星的轨道倾角不能超过 53.4° 。此时,4GEO骨干网+3地面同轨道面IGSO增强网的多星对地覆盖情况如图3所示。其中,4颗GEO卫星分别定点于 96.1°E 、 177.5°W 、 83.9°W 、 9.8°E ,相互之间通过星间链路组成环路;3颗IGSO卫星地面同轨道面,轨道倾角为 53.4° ,升交点经度为 109.5°E ,相互之间真近点角相差为 120° ,不建立星间链路。

从图3中可以看出:此时仍有部分区域无法达到100%时间覆盖,但中国安全利益重要区域得到了很好的多星覆盖。为了弥补4GEO+3IGSO的覆盖空隙,我们进一步提出将地面同轨道面IGSO卫星和同轨道面IGSO卫星相结合,结合的方法如下:

(1)至少包含3颗地面同轨道面IGSO卫星,以保证IGSO卫星对地面的连续接力覆盖。

(2)至少包含3颗同轨道面的IGSO卫星,以建立IGSO卫星间链路,使对中国信关站不可见IGSO卫星的信息通过中继落回中国信关站。

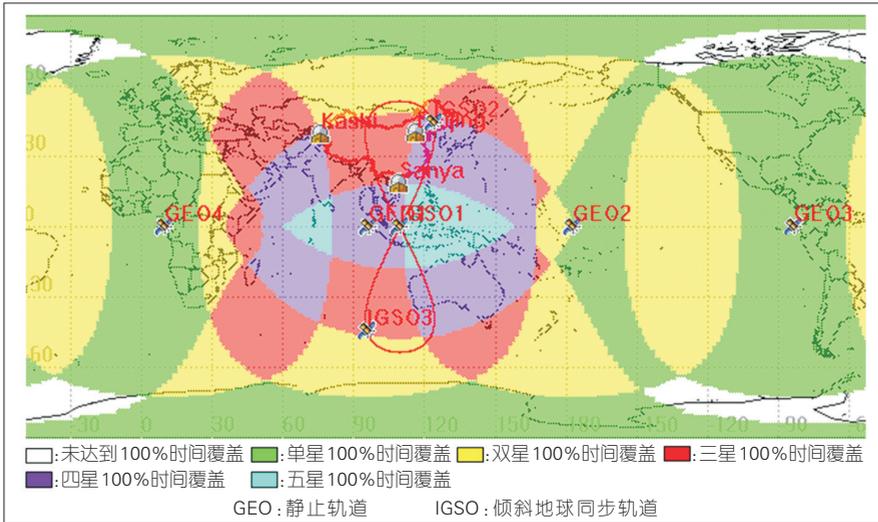
(3)存在1颗IGSO卫星既属于地面同轨道面IGSO星座又属于同轨道面IGSO星座,将两种不同类型的IGSO星座密切结合。

也就是说,最少也需要5颗IGSO卫星即可将两类IGSO星座密切地结合,如图4所示。其中,IGSO1既属于地面同轨道面同时又属于同轨道面IGSO星座。

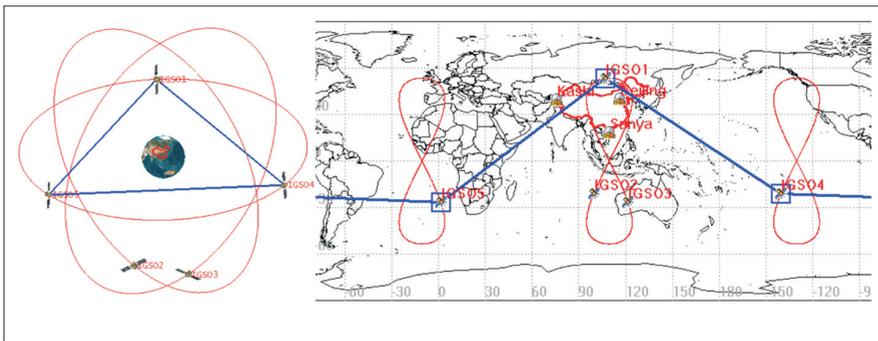
采用图4中的5颗IGSO卫星作为增强网与GEO卫星骨干网组成混合星座,得到的多星覆盖情况如图5所示。其中4颗GEO卫星分别定点于 96.1°E 、 177.5°W 、 83.9°W 、 9.8°E ,相互之间通过星间链路组成环路;地面同轨道面3颗IGSO卫星轨道倾角为

▼表1 IGSO卫星对三亚信关站的不可见时间(波束边缘仰角为 10°)

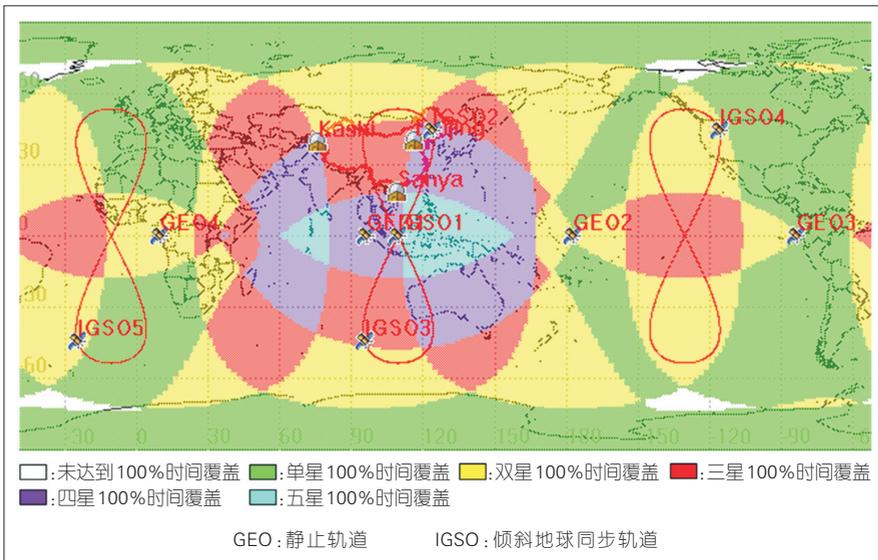
轨道倾角 i°	53.4	53.5	60.0	70.0	80.0	90.0
不可见时间/h	0	0.35	3.33	4.90	5.79	6.38
占一天百分比/%	0	1.46	13.88	20.43	24.14	26.58



▲图3 4GEO+3IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 10°)



▲图4 将地面同轨迹和同轨道面IGSO星座相结合(5IGSO)



▲图5 4GEO+5IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 10°)

53.4° , 升交点经度为 109.5°E , 相互之间真近点角相差 120° , 不建立星间链

路; 同轨道面的3颗IGSO卫星轨道倾角为 53.4° , 其中1颗IGSO卫星与地

面同轨迹IGSO星座共用, 相互之间真近点角相差 120° , 通过星间链路组成环路。

从图5可以看出, 覆盖中仍存在缝隙, 但此时同轨道面的IGSO卫星IGSO4、IGSO5仅考虑通过IGSO1中继落入中国信关站。事实上, IGSO4有部分时间对北京信关站可见; 而IGSO5卫星有部分时间对喀什信关站可见。因此, 可以对5IGSO星座进行进一步调整:

(1) 保留IGSO2和IGSO3卫星的轨道参数不变, 因此IGSO2和IGSO3仍始终对中国信关站可见。

(2) 扩大IGSO1、IGSO4和IGSO5卫星的轨道倾角, 如果其中任何一颗卫星对中国信关站可见, 其他两颗卫星均能利用该卫星一跳中继将信息传回中国信关站。

表2通过仿真统计给出了当3颗同轨道面IGSO卫星轨道倾角调整过程中, 3颗IGSO卫星同时对中国信关站不可见的时间。

显然, 3颗同轨道面的IGSO卫星IGSO1、IGSO4和IGSO5无论取何种轨道倾角, 总有一颗IGSO卫星对中国信关站可见。因此, 调整图5混合星座中3颗同轨道面IGSO卫星的轨道倾角为 60° , 可得到改进后的4GEO+5IGSO混合星座的多星覆盖, 如图6所示。

此时, 4GEO+5IGSO混合星座在全球和中国区域的平均通信仰角(重叠覆盖时取较大的仰角)如图7所示。显然, 无论是在全球还是在中国区域, 平均通信仰角均有较大程度的提升。

从图6和图7中可以看出, 改进后的4GEO+5IGSO混合星座具有以下特点:

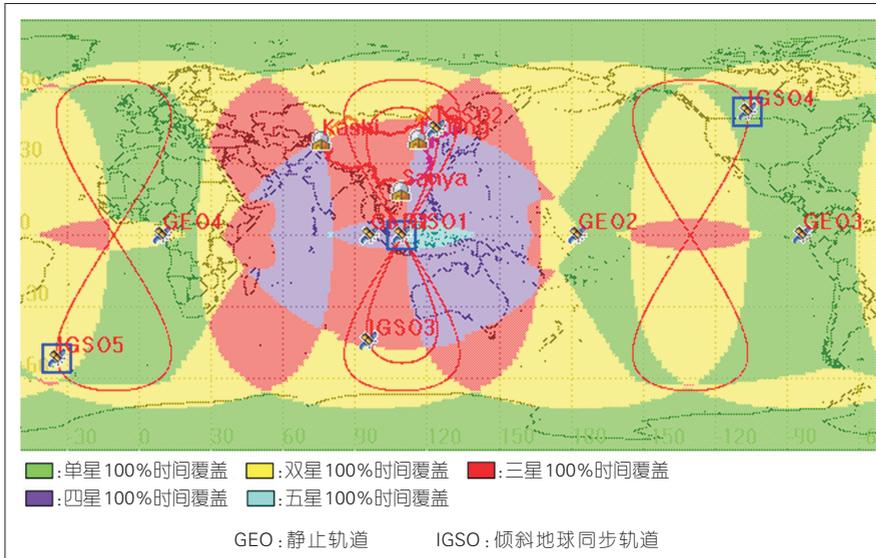
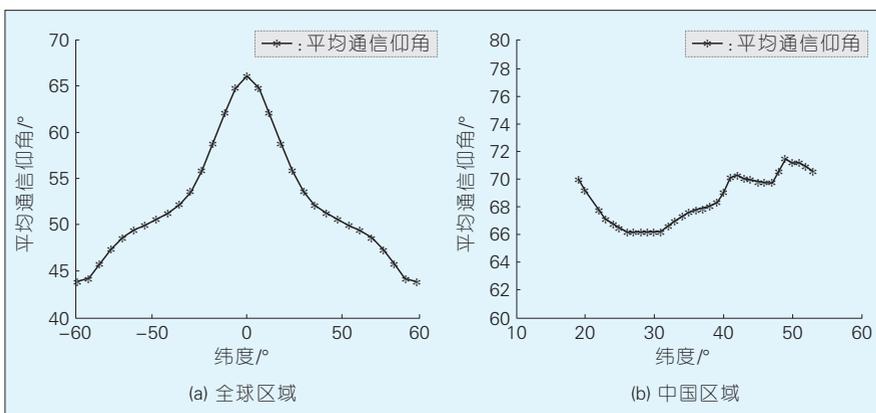
(1) 仅采用9颗卫星即能够对全球实现无缝覆盖, 这对中国安全和利益重点区域能够达到非常好的多星覆盖(3~4星100%时间覆盖), 将系统资源集中在重点区域。

(2) 仅在同轨道面GEO、IGSO之

▼表2 同轨道面3IGSO卫星对中国信关站同时不可见时间(波束边缘仰角为 10°)

3IGSO 轨道倾角 $^\circ$	50	60	70	70	80	90
不可见时间/h	0	0	0	0	0	0
占一天百分比/%	0	0	0	0	0	0

IGSO: 倾斜地球同步轨道

▲图6 改进后4GEO+5IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 10°)

▲图7 改进后4GEO+5IGSO星座的平均通信仰角

间建立星间链路,由于同轨道面卫星之间相对静止,星间链路可采用成熟的固定指向、窄波束宽带天线。

(3)在中高纬度地区也具有高通信仰角,解决了解决中高纬度地区、城市、峡谷、山区、丛林等 GEO 卫星节点视线受限区域的信息服务需求。

(4)GEO、IGSO 卫星轨道高度高,相对导航、遥感卫星俯仰方位角变化较慢,适合为导航卫星、低轨遥感卫

星等用户节点提供接入服务。

(5)整个星座中至少同时有 6 颗卫星(3 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星)对于中国信关站可见,其他不直接可见的卫星仅需一跳中继即可与中国信关站互连,很好地解决了我国仅能在国内布设信关站的关键问题。

3 结束语

我们首先提出了一种骨干网+增

强网混合星座设计方法,以 GEO 卫星节点构成骨干网,以 IGSO、HEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网,实现全球覆盖。然后,重点针对中国仅在国内布设信关站这个强约束条件,设计了一种“4GEO+5IGSO”混合星座,对其覆盖性能进行了仿真分析。结果表明:所设计星座达到全球无缝覆盖所需卫星数量不超过 9 颗,并且能够很好满足“仅依靠中国信关站落地”这个强约束条件。

参考文献

- [1] 数字通信世界. 亚太地区卫星资源指南 2014 [EB/OL]. [2016-05-05]. <http://www.dcw.org.cn/images/cover/1-1.jpg>
- [2] Union of Concerned Scientists. UCS Satellite Database [EB/OL]. [2016-05-05]. http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html
- [3] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication Technologies and Architectures for Space Network and Interplanetary Internet [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2012, 15 (2): 881-897. DOI: 10.1109/SURV.2012.062612.00134
- [4] BHASIN K B, HAYDEN J K. Architecting Communication Network of Networks for Space System of Systems [C]//IEEE System of Systems Engineering Conference. USA: IEEE, 2008: 1-7. DOI: 10.1109/SYSOSE.2008.4724153
- [5] HU H F, LIU Y A. A Feasible Mesh-Based Architecture and Protocol Model of Space Information Network [C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Conference. USA: IEEE, 2010: 529-531
- [6] REN F, Fan J L. An Adaptive Distributed Certificate Management Scheme for Space Information Network [J]. IET Information Security, 2013, 7(4): 318-326. DOI: 10.1049/iet-ifs.2012.0253
- [7] ZHANG G X, ZHANG W, ZHANG H, et al. A Novel Proposal of Architecture and Network Model for Space Communication Networks [C]//IAF 65th International Astronautical Congress. France: IAF, 2014: 1-7
- [8] LIPATOV A, SKORIK E, FYODOROVA T. New Generation of Geostationary Mobile Communication Satellite—Thuraya Complex Usage [C]//Microwave and Telecommunication Technology. USA: IEEE, 2001: 247-249. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961542. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961542
- [9] WANG J, LIU C. Development and Application of INMARSAT Satellite

►下转第 45 页