

一种空间信息网络体系架构的设计

杨 柳¹ 王 闯² 王俊毅¹

(军事科学院系统工程研究院 河北 保定 072750)¹ (中国人民解放军陆军工程大学 南京 210007)²

摘 要 涵盖卫星、升空平台及地面网络的空天地一体的空间信息网络成为空间通信网络的发展趋势。文中对空间信息网络的特点进行了研究,提出了一种空间信息网络体系架构的总体设计。同时对各类空间通信平台的成本和覆盖性能进行了分析,对空间信息网络体系架构进行了优化,提出了一个以 GEO 卫星为骨干网络,以 LEO 或 IGSO 卫星为增强网络,升空平台在热点和应急区域提供应急保障网络的空间段设计方案。

关键词 空间信息网络,体系架构,卫星通信,升空平台

中图法分类号 TN927.2 文献标识码 A

System Design of Space Information Network Architecture

YANG Liu¹ WANG Chuang² WANG Jun-yi¹

(Academy of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Baoding, Hebei 072750, China)¹

(PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China)²

Abstract The space information network covering the satellite, the telecommunication platform and the ground network has become the development trend of the space communication network. The paper studied the characteristics of space information network, and presented the system design of a spatial information network architecture. This paper analyzed the cost and the coverage performance of various space communication platforms, and optimized the spatial information network architecture. On this basis, this paper proposed the design of space section where the space segment of the system takes GEO satellite as the backbone network, LEO or IGSO satellite as an enhanced network, and the telecommunication platform provides an emergency security network in the hot spot and emergency area.

Keywords Space information network, Architecture, Satellite communication, Telecommunication platform

1 引言

随着航天技术的发展,太空中卫星的种类和数量越来越多,使得通信范围得到了极大的拓展。然而,单纯采用传统的单一类型的空间平台作为中继的通信方式已经难以满足实际应用的需求^[1],而涵盖卫星、升空平台及地面网络的空天地一体的空间信息网络成为了空间通信网络的发展趋势。空间信息网络将空天地网络进行有效的结合,发挥了各层网络的优势,拓展了网络的覆盖范围,具有信息容量大、覆盖范围广、鲁棒性强等优点;同时,各网络之间协同工作,优势互补,能够很好地配置空天地网络资源,达到了最大的网络资源利用率。

本文研究的空间信息网络系统主要包含 GEO 卫星、IGSO 卫星、LEO 卫星等多种卫星以及平流层飞艇、系留艇、无人飞机等多种升空平台,这些空间平台节点在业务性质、工作环境、技术体制以及覆盖范围等方面均有差异。因此,需要对空间信息网络进行优化设计,以实现空间信息网络的全时空覆盖功能、热点地区的容量增强覆盖功能和突发事件的应急保障功能。

2 空间信息网络的特点

相比传统采用单一类型的空间平台作为中继的空间通信系统,空间信息网络系统具有以下特点。

2.1 立体多层

空间信息网络综合采用各种类型的卫星、升空平台及终端等组成立体多层的网络,包括轨道高度约为 36000 km 的 GEO 卫星和 IGSO 卫星,轨道高度为 500~5000 km 的 LEO 卫星,以及高度为 50 km 以下的飞艇、无人飞机和载人飞机等升空平台。所包含的空间平台类型具有多样性,各平台所处的环境为从地面到 36000 km 的大气外层空间,其通信组网范围横跨平流层、中间层、电离层和逃逸层,形成了一个跨越空、天、地的立体多层网络系统^[1]。因此,空间信息网络综合了各层网络的优势,具有信息容量大、覆盖范围广、鲁棒性强等特点;同时,也需要对网络架构进行优化设计,使各网络之间协同工作,以发挥最大效能。

2.2 异构性强

空间信息网络包括各种卫星、升空平台以及各类地面终端等网络节点,这些节点被赋予了不同的功能和属性,处于不同的高度,工作在不同的环境中,具有不同的通信、计算和存储能力,并且具有复杂的时空行为,因此空间信息网络必然是一个异构网络。这种异构性主要体现在所采用的通信手段、通信体制和数据格式等方面,因此所构建的空间信息网络能够有效兼容目前已有的各种通信手段、体制等,支持网络的异构组网、动态配置、聚合与重构,在实现对既定任务时空连续覆盖的基础上,逐步提高空间信息网络的全时空覆盖能力。

2.3 拓扑动态性大

空间信息网络中各类平台分布在不同高度的空间环境中,动态性大、节点间的关系复杂,网络拓扑总体呈现立体分层、动态演变的特性,对网络的韧性连通提出了很大的挑战^[2]。在网络拓扑中,GEO卫星和地面之间构成了一个常态化网络,拓扑比较稳定;IGSO和LEO卫星可根据需要应急发射,其拓扑是动态的,但运动具有规律性,其轨道位置可以预测,且同层卫星之间的相对位置关系是固定或周期性变化的;而升空平台没有轨道,可以根据需要在热点和应急区域临时布设,具有很大的灵活性,但由于滞空时间有限,其拓扑的随机性和动态性较大。如果把这3层通信平台作为一个整体,那么其拓扑的动态性非常大。

总结上述特点,空间信息网络系统包含的平台种类多样,且集信息承载、任务集成、故障管理、自主组网、结构重组、异构互联等需求于一身。一方面要求系统利用各平台间的优势互补能力,优化组合并调度不同平台资源,渐进重构整个系统,明确各部分的组成与功能;另一方面要求在面向服务需求的同时,兼顾系统架构的复杂度,便于系统高效组网。

3 空间信息网络体系架构的总体设计

根据空天的环境特点以及卫星、升空平台等的能力水平,空间信息网络系统被划分为空间段、运控段和用户段3部分,如图1所示。

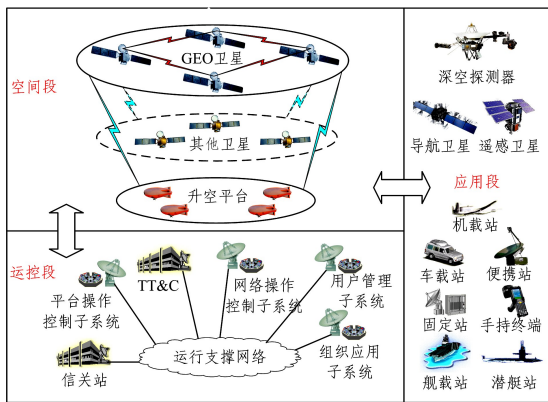


图1 空间信息网络系统的示意图

3.1 空间段

空间段是整个空间信息网络系统传输和交换的核心,不同的设计方案不仅决定了整个系统的复杂度,而且对系统的整体造价和运行管理费用有极大的影响。根据设计构想,系统的空间段由GEO卫星、IGSO卫星、LEO卫星等多种卫星以及平流层飞艇、系留艇、无人飞机等多种升空平台组成,所完成的主要功能如下:

1) GEO卫星相对地面静止,覆盖范围大,GEO卫星间通过星间链路组成环路,从而构成了一个骨干网络,以保障常态化空间通信,为地面终端、低轨航天器和深空探测器提供了通信服务;

2) 根据任务需要,可视情况增加并发射其他类型的卫星,将其作为增强网络,如IGSO卫星、LEO卫星等,可改善高纬度地区和极区时空覆盖情况,也可将其作为快速响应的通信节点;

3) 升空平台布设在应急救援或热点区域,不同的升空平台间可通过平台间的链路连接组网,从而解决应急通信和大容量通信服务的需求^[3]。

3.2 运控段

运控段的主要任务是维持各类空间平台的正常可靠运

行,为用户提供业务支持,满足各类用户的使用需求。设计中,空间信息网络中的运控段主要由网络控制分系统、应用管理分系统、遥测遥控站和信关站等组成。

运控段各组成部分之间的业务连接关系如图2所示。当空间平台经过测控站覆盖区域时,遥测遥控站在平台操作控制子系统的控制下对空间平台进行了测控,并获得了测控数据,从而由平台操作控制子系统产生平台位置预报和网络拓扑结构,并把此预报和网络拓扑结构通过网络操作控制子系统分发到各信关站。同时,网络操作控制子系统负责给各空间平台和信关站分配和调度资源,并把资源分配情况分发到各空间平台和信关站。当空间平台在信关站的覆盖区域时,信关站在网络操作控制子系统的控制下对空间平台进行业务接入,并对地面网络进行连接。各用户管理系统主要负责各自管辖范围内各类用户终端的管理,包括入网注册、功能设置、状态控制等。组织应用子系统主要完成通信网络的组织应用,给用户管理子系统提供了应用支持。

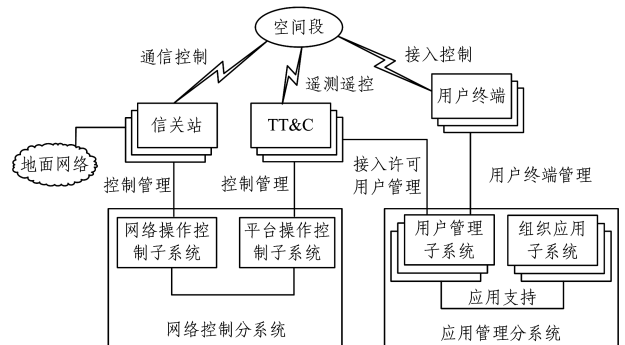


图2 运控段各部分业务关系连接示意图

3.3 用户段

系统的用户段包含满足各类用户使用需求的所用类型的用户终端:

1) 地面及低空用户终端。其包含各类手持终端、便携站、固定站、车载站、舰载站、潜艇站、无人机、载人飞机等。

2) 中低轨航天器。其包括各类对地观测卫星、导航卫星、导弹、火箭等。中低轨航天器的覆盖范围较小,对地移动速度快,难以直接与地面的信关站建立稳定的通信链路。而空间信息网络中的GEO卫星平台与各类航天器的可见关系良好,中低轨航天器能以GEO卫星平台为中继,实现宽带实时的数据传输。

3) 深空探测器。天基信息系统中的GEO卫星间的地心夹角足够大,可获取深空探测的全天候、全方位观测数据。利用天基信息系统作为深空探测器与地面测控通信站之间的中继点^[4],深空探测通信可以采用两跳的通信模式进行。第一跳是从深空探测器到GEO卫星平台,不受大气传播效应的影响,能采用较高的频段,从而降低对GEO卫星和深空探测器通信天线口径的要求;第二跳是从GEO卫星平台到地面通信站,可利用现有的成熟的通信技术。

4 空间信息网络体系架构优化

空间信息网络的空间段是整个系统的核心,不同的设计方案不仅决定了整个系统的复杂度,而且对系统的整体造价和运行管理费用都有极大的影响。根据设计,系统的空间段由GEO卫星、IGSO卫星、LEO卫星等多种卫星以及平流层中的飞艇、系留艇、无人飞机等多种升空平台组成,各类空间通信平台的成本及性能如表1所列^[5]。从表中可以看出,卫

星覆盖面积大、服务范围广、运行轨迹可预测,但存在传播时延与传播损耗大、建设成本高、部署时间长等缺点;而升空平台的覆盖面积和服务范围小、平台运动轨迹不易预测,但其具有良好的链路传播特性,建设成本较低,系统配置快速灵活。

GEO卫星工作于距离地面35786 km的赤道环上,相对地面保持静止,覆盖范围大,采用3~5颗GEO卫星即可实现准全球覆盖,且技术相对成熟,运行维护方便。图3给出了3颗定点经度相差120°的GEO卫星的覆盖情况,在波束边缘仰角为10°的情况下,3颗GEO卫星能够覆盖全球92.15%的区域,约4.7亿km²。但GEO卫星通信系统也存在一些问题,如:对中高纬度地区的平均覆盖仰角较低,衰落

余量大,存在“南山效应”;传播时延和传播损耗大,不利于终端小型化;无法覆盖全球,两极附近有通信盲区。

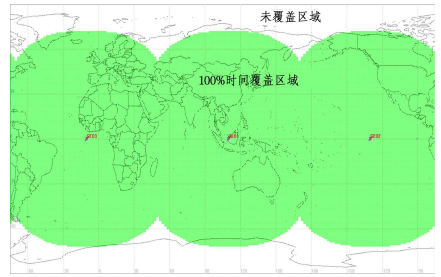


图3 3颗GEO卫星的覆盖情况(波束边缘仰角为10°)

表1 各类型空间平台的性能对比

平台类型	GEO卫星	LEO卫星	平流层飞艇	低空飞艇
单平台覆盖直径/km	几万	几千	几百	几到几十
服务区	区域或准全球	区域或全球	区域	区域
传播路径损耗	大	中	小	很小
传播时延	大	中	小	很小
平台动态性	相对地面静止	相对地面运动,轨道可预测	相对地面低速运动,轨迹难以预测	相对地面运动,轨迹难以预测
建设成本	单颗约2亿美元	单颗约5千万~1亿美元	单艘飞艇约上千万美元	单艘几十万到上千万美元
系统维护	易维护	较难维护	较易维护	较易维护
部署时间	长	较长	较短	短

鉴于GEO卫星的不足,空间段可以增发诸如IGSO,LEO等类型的卫星,以进一步解决网络的时空不间断覆盖问题。LEO卫星的轨道高度一般在500~5000km之间,工作轨道高度低,便于终端的小型化,但卫星相对地面高速运动,需要进行切换管理。由于单颗卫星的覆盖范围较小,通常通过多颗卫星组成星座来实现对区域或全球的覆盖。也可采用较少数量的LEO卫星组合来对目标区域实现不间断覆盖,图4给出了采用9颗轨道高度为1450km、均匀分布在同一轨道面的极轨卫星,且波束边缘仰角为10°的覆盖时间情况,可以看出,9颗同轨LEO卫星能够有效增强系统在南北两极的覆盖能力。

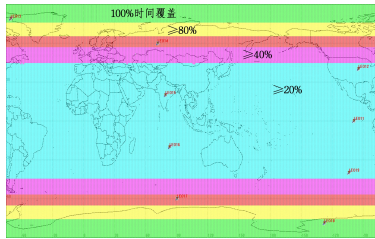


图4 9颗LEO卫星的覆盖情况(波束边缘仰角为10°)

因此,根据服务需求及任务需要,空间段可以综合采用多种轨道类型的卫星,能够在更高的性价比下提供更好的服务。但考虑发射成本、轨道位置、频率协调等因素,仅依靠卫星平台难以满足城市热点等服务需求,而费用低廉、传播时延小、部署速度快、容量大的升空平台可以有效弥补卫星平台的不足^[3,6]。

当波束边缘仰角为10°时,高度分别为30 km,20 km与10 km的升空平台分别能覆盖地球表面7.97万km²,3.64万km²,0.96万km²的范围,而轨道高度为1450 km时的单颗LEO卫星能够覆盖2798.83万km²的地球表面。虽然升空平台的覆盖范围小于卫星,但其相对地面运动较慢,通信链路的性能好,适用于保障通信热点区域的服务需求,而且升空平台部署迅速,作为系统的快速响应节点,能够有效应对突发任务需求,进一步增强了系统的时空覆盖能力。

根据上述分析,为满足空间信息网络的时空不间断覆盖,适应不同业务属性与需求随任务的变化,合理利用空天资源,系统应包含多种异构平台。而各类平台分布在不同高度的空

间环境中,动态性大,节点间的关系复杂,通信链路复杂多变。因此,考虑以建立的通信链路为研究对象,综合应用轨道动力学和空气动力学,深入探索通信链路受节点轨道动力特性、空气动力特性以及对地覆盖时间和范围等因素影响下的变化机制,明晰在时空多约束条件下通信链路特性的演变机理,联合考虑平台节点的轨道及位置稳定,同时联合考虑平台节点的设计及控制策略,建立时空约束下的覆盖及通信链路的动态模型。参照该模型,根据可能的业务数据需求,以网络编码和网络图论为理论指导,以最大网络容量为设计目标,分阶段给出网络拓扑结构。根据该网络拓扑结构,对空间网中的混合星座以及升空平台的部署方案进行设计,并对设计结果进行覆盖分析。通过覆盖分析情况,对星座及升空平台部署方案进行调整,并由调整结果对空间网拓扑进行进一步的优化和完善。

结束语 空间信息网络的节点类型和数量众多,各类型平台节点高动态运动,通信链路复杂多变,不同类型平台处于不同的高度,具有不同的覆盖性能。本文对空间信息网络的特点进行了分析,提出了空间信息网络体系架构的总体设计。同时,对各种类型平台的覆盖性能进行了仿真,提出了一个以GEO卫星作为骨干网络,以LEO或IGSO卫星为增强网络,升空平台在热点和应急区域提供应急保障的空间段设计方案。

参考文献

- [1] 葛晓虎,刘应状,董燕,等.一种基于MESH结构的空天信息网络模型[J].微电子学与计算机,2008,25(5):39-42.
- [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.
- [3] 霍辰杰,陈树新,吴昊,等.基于协作分集的HAPS应急系统性能研究[J].电视技术,2013,37(7):91-93.
- [4] 张乃通,李晖,张钦宇.深空探测通信技术发展趋势及思考[J].宇航学报,2007,28(4):284-293.
- [5] PELTON J N. Handbook of Satellite Applications[M]. New York:Springer,2013.
- [6] MOHAMMED A, MEHMOOD A, PAVLIDOU F, et al. The role of high-altitude platforms (HAPs) in the global wireless connectivity[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11):1939-1953.