



基于分布式星群的双层星座设计

蒋季, 彭木根, 王文博
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 当前, 陆地通信系统已无法满足日益复杂的信息需求, 利用空间信息网络实现全球范围内的无缝覆盖和高效容量传输成为研究热点。现有卫星通信系统以单层星座为主, 缺少高低轨卫星之间的协同。提出了一种基于分布式星群的双层星座设计, 以基于分布式星群的低轨卫星作为网络架构的基础, 采用星间链路实现低轨卫星之间的通信, 通过高轨卫星实现中低纬度地区覆盖性能加强。仿真结果表明, 所提方法在仅依靠在国内部署卫星地面站的前提下可实现全球多重覆盖。

关键词: 空间信息网络; 星座设计; 卫星协同; 分布式星群

中图分类号: V474

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2018172

Design of double layer satellite constellation based on distributed satellite clusters

JIANG Ji, PENG Mugen, WANG Wenbo
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Nowadays, the land communication system is unable to support the complex information needs, and realizing global seamless coverage and high capacity through space information network is anticipated. The existing satellite network is mainly composed of single satellite constellation, which absents the cooperation between the low earth orbit (LEO) satellites and geostationary orbit (GEO) satellites. A double-layer satellite constellation based on distributed satellite clusters was proposed, in which the infrastructure layer was composed of LEO satellites, the communication between LEO satellites was accomplished over inter-satellite links (ISL), and GEO satellites enhance the performance of coverage in low and middle latitudes. As simulation results show, the proposed approach can realize excellent global multiple coverage only relying on the deployment of satellite earth stations in China.

Key words: space information network, constellation design, satellite collaboration, distributed satellite cluster

1 引言

空间信息网络是以空间平台为载体, 实时获

取、传输和处理各类信息的网络系统^[1]。由于环境与成本因素的影响, 目前陆地通信系统在一些环境下无法提供通信服务^[2], 如海洋、沙漠、森

收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2018-03-28

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.HQGF01601877GGN00)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.HQGF01601877GGN00)

林等偏远地区部署基站成本高,使用率低;地震、泥石流等自然灾害的发生将导致地面基站毁坏,无法提供通信;某些热点区域由于短时间内用户数量大幅增加,带来严重的地面通信阻塞问题^[3]。而空间信息网络在广域覆盖、应急通信和大规模信息传输方面都具有明显的优势,能够充分弥补地面通信系统的不足^[4]。

卫星节点承载整个空间信息网络的主要业务,根据运行的轨道高度不同,这些卫星被分为高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星3种^[5],其中高轨卫星的轨道高度固定在35 786 km,中轨卫星的轨道高度为2 000~20 000 km,低轨卫星的轨道高度一般为500~1 500 km^[6]。卫星节点处于高速运行状态,需要相互协同、构成星座,才能实现良好的覆盖性能和通信性能,因此,卫星的部署问题是整个星座设计的核心。我国国情为空间信息网络的建设增加了额外约束条件:首先,我国无法在全球范围内部署卫星地面站,当前卫星通信系统普遍采用的天星地网不适用于我国的星座设计,天星地网的主要特点是卫星之间不组网,依靠全球分布的地面站实现通信服务,卫星只充当简单的转发通道^[7],而我国无法采用这种网络架构,在星座设计过程中必须将地面站限制在我国境内,卫星之间通过星间链路进行信息互通。其次,我国静止卫星轨道位置、频率资源稀缺,而中低轨卫星的传输带宽有限,所以必须采用有效手段解决业务带宽需求和卫星平台承载能力之间的矛盾。分布式星群通过采用“多颗卫星等效为一颗大卫星”的方式提升服务能力,为缓解我国匮乏的空间频率、轨位资源提供了新思路^[8]。

现有的大部分空间系统均采用单层轨道卫星星座,其中高轨单层系统有ViaSat1、SES12等,中轨单层系统有Odyssey、O3b等,低轨单层系统有Iridium、OneWeb等,玫瑰星座和极轨道星座都是较为成熟的星座构型,广泛应用

于单层卫星系统。但随着通信要求的提高,单层卫星系统的不足日益凸显。在高轨道卫星通信系统中,GEO运行轨道高,带来较大传播时延;轨道位置固定,覆盖范围限制在中低纬度地区,无法覆盖高纬度以及两极地区,MEO/LEO卫星通信系统的单颗卫星覆盖面积有限,需要大量的卫星实现全球的无缝覆盖^[9]。针对上述问题,大量参考文献提出了多层卫星通信系统,参考文献[10]提出了一种三层卫星通信架构;参考文献[11]提出了一种跨LEO/MEO的两层通信架构,但集中于路由算法的研究,不涉及多层卫星星座设计问题;参考文献[12]提出了一种骨干网和增强网的混合星座设计方法,但其卫星轨道还是集中在高轨部分,不能解决高轨卫星的不足问题。

为了满足全球覆盖性能,本文提出了一种基于分布式星群的双层星座架构。GEO和LEO双层协同,低轨部分采用分布式星群加强性能,并利用星间链路进行卫星间的互联互通,实现我国建站条件下的全球覆盖。仿真结果表明,相比于仅依靠低轨卫星的单层系统,基于分布式星群的双层卫星通信系统,其覆盖性能和平均通信仰角性能大大提高。

2 当前星座构型

卫星星座是由多颗卫星按照一定构型组成的集合,通过多个节点相互协作实现一定的覆盖性能。卫星节点是星座的核心部分,设计星座的过程中需要对卫星的相应参数进行确定,这些参数如图1所示,包括:轨道平面倾角 i ,升交点赤经 Ω ,近地点幅角 ω ,轨道半长轴 a ,轨道的偏心率 e ,真近点角 ν 。其中,轨道平面的位置由前两个要素确定,轨道在轨道平面内的指向由第3个要素确定,轨道的大小和形状由第4、第5要素确定,卫星某一时刻在轨道中的位置由最后一个要素确定^[13]。

在星座设计的过程中,不仅需要确定卫星的相关参数,还需要确定星座的几何构型。为了设

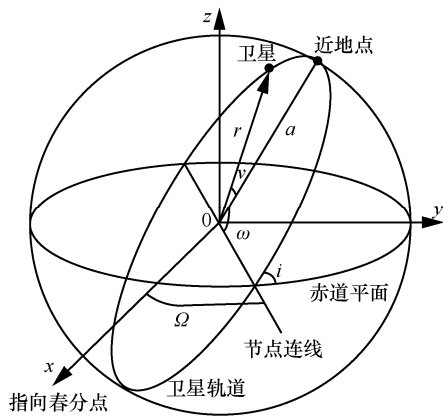
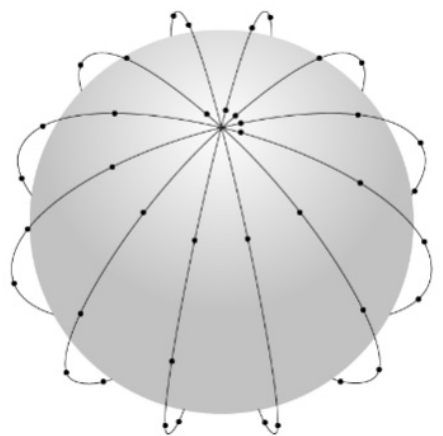
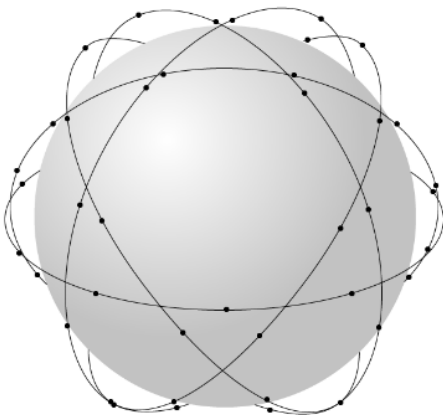


图1 卫星轨道参数

计满足全球覆盖性能的卫星星座，基础星座通常从极轨星座和玫瑰星座中产生。图 2(a)和图 2(b) 分别显示的是 6 个轨道面中，每个轨道面 11 颗卫星的情况下极轨星座和玫瑰星座的构型。



(a)极轨道星座



(b)玫瑰星座

图2 轨道星座构型

极轨道星座与玫瑰星座都属于对称星座，轨道面分布均匀，每个轨道面上卫星数目相同，极轨道星座的轨道面经过两极且与赤道面垂直，而玫瑰星座轨道面倾角一般小于 90° 。两个星座轨道特点的不同决定了两个星座性能的不同，玫瑰星座中卫星均匀分布，而极轨道星座中卫星集中在两极地区，人口集中的中低纬度地区卫星数目反而小。在轨道部署相同的条件下，玫瑰星座的覆盖性能优于极轨道星座。大多数不采用星间链路的导航卫星星座，如 GPS、北斗等都采用玫瑰星座。而极轨道星座中卫星之间相对位置稳定，便于星间链路的维护，多作为空中组网的卫星网络的基础构型^[14]。我国无法大规模部署海外卫星地面站，卫星之间的通信必须借助星间链路实现，所以本文将基于极轨道星座进行轨道设计。

在极轨道卫星星座中，单颗卫星可以维持多条星间链路。常用的卫星系统单星维持 4 条星间链路，如 Iridium 系统，除两个相邻的逆向轨道面上的卫星以外，每颗卫星均维持 4 条星间链路，分别与同轨道面上前后两颗相邻卫星和左右轨道面上的两颗卫星互连^[15]。随着星座中卫星数目的增加，空中组网方式更加复杂，单星所维持的星间链路数目也逐步增加。星间链路的部署也是本文星座设计的重点。

3 基于分布式星群的双层星座架构

本文提出了一种基于分布式星群的双层星座架构。首先，GEO 和 LEO 双层协同，GEO 能加强 LEO 对于中低纬度地区的覆盖，中低纬度地区正好是全球人口分布相对密集的区域，且 LEO 避免了 GEO 通信时延大、链路损耗高、无法覆盖高纬度地区的问题，具有比单轨道卫星更好的性能。其次低轨部分采用分布式星群的架构，其特点是将一颗大卫星的功能分散到多颗小卫星上，实现服务能力的增强。最后考虑到我国没有建立海外卫星地面站的条件，在轨道设计的过程中加

入星间链路，实现卫星之间的通信。

3.1 高轨卫星位置选取

地球同步轨道可以部署 4 颗 GEO，加强中低纬度地区的覆盖^[12]。考虑到全球覆盖和仅在我国境内建立卫星地面站的条件，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 个位置作为地面站，基于地面站的可见性将 4 颗 GEO 部署在 177.5°W、9.8°E、96.1°E 和 116.4°W。高轨卫星的部署，增强了中低纬度地区的覆盖性能，如图 3 所示。

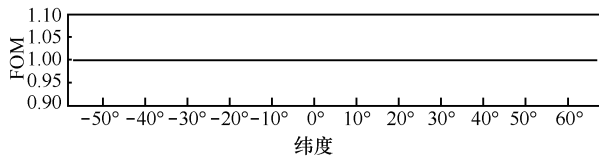


图3 4颗 GEO 卫星对地覆盖情况

3.2 基于分布式星群的低轨卫星架构

在低轨部分，以实现了全球覆盖的铱星为基础进行部署，铱星星座是一个拥有 6 个轨道面，每个轨道面上平均部署 11 颗卫星的极轨道星座^[9]。采用分布式小星群代替原来的铱星系统中的单颗卫星，小星群内部卫星的架构如图 4 所示。

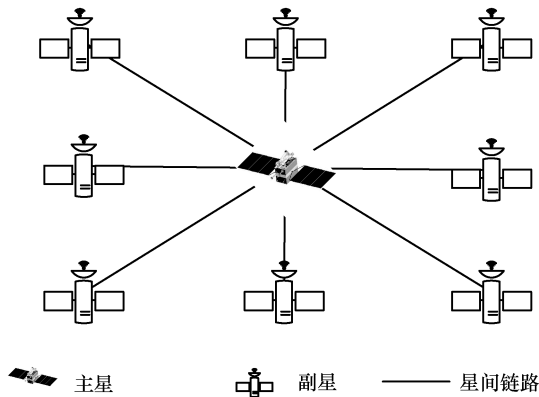


图4 分布式星群架构

每个小星群包含 9 颗卫星，其中心的卫星相当于一个管理者，以 8 条星间链路分别连接星群中的其他卫星，并以 4 条星间链路分别与前后两颗相邻星群和左右轨道面上的星群的主星进行连接，这样

星群间以及星群内部的通信都通过星间链路实现，解决了我国无法全球布站的问题，低轨部分的轨道以及卫星情况如图 5 所示。副星只有简单的存储转发功能，而主星完成复杂的控制和计算，并通过星间链路实现与副星的通信，主星需要较强的计算能力来保证副星的数据转发，并在运行过程中维持多条星间链路，但主副星的架构使得数据与控制分离，副星的功能单一化，便于实现，主星实现集中式管理，每条副星只维持一条星间链路，降低了副星的部署与维护成本^[4]，且随着小卫星成本的降低以及一箭多星技术的成熟，该星座设计的成本会显著降低。星间链路解决了无法全球布站的问题，且现阶段 teledesic840 星座已经提出了每颗卫星 8 条星间链路部署方案，在本设计方案中，主星实时维持 4 条与相邻主星的星间链路，主星与副星的星间链路通过数据传输量进行调整，而副星功能单一，数据量少，数据传输完成后保证休眠状态，大大减少了主星负担。

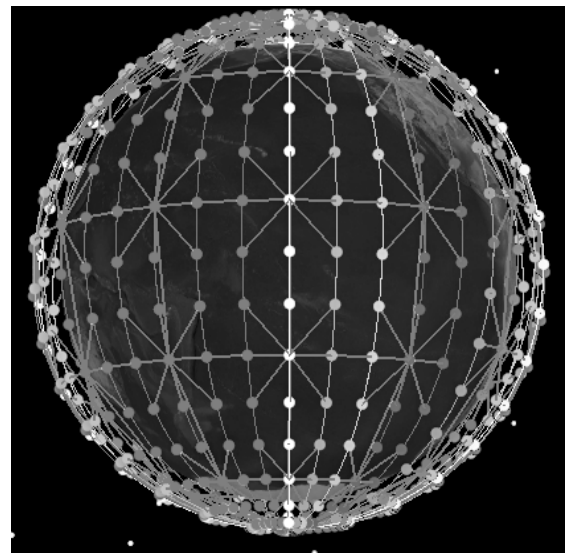


图5 基于分布式星群的低轨卫星架构

基于分布式星群的双层星座架构如图 6 所示，小圈代表了 GEO 的位置，方框代表了 LEO 的位置。以下将通过仿真来验证本星座设计在性能方面的提升。

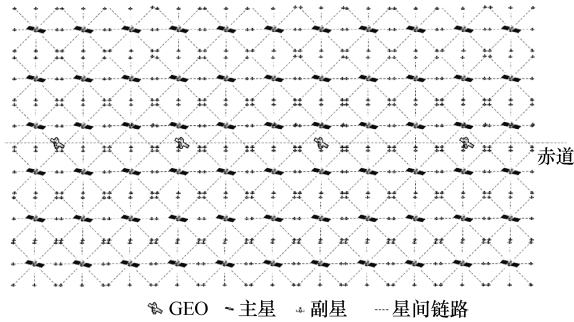


图6 基于分布式星群的双层星座架构

在本星座设计中，低轨卫星和高轨卫星协同合作，即体现在覆盖协同方面，也体现在业务协同方面^[6]。高轨卫星相对地面静止，通信时延大，不适用于时延敏感业务，所以时延敏感的实时通信业务会依赖于低轨卫星通信。但低轨卫星覆盖范围和容量小，当进行远距离大规模卫星通信时，数据会经过多个低轨卫星进行转发，导致时延和复杂度的上升，但这种情况下低轨卫星间的转发由高轨卫星完成，路由转发过程得到简化，时延降低。

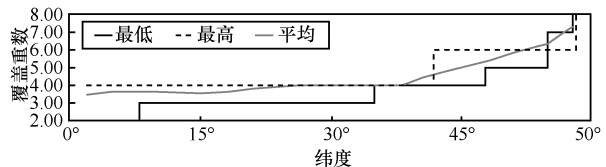
4 仿真与分析

GEO/LEO 双层架构在保证多重覆盖的情况下，通信仰角也大大提高，本部分将通过仿真结果与铱星系统进行对比，从全球覆盖情况、中低纬度覆盖重数和平均通信仰角 3 个方面来证明本架构性能的提升。仿真参数如下，低轨卫星高度为 780 km，星群个数为 66 个，每个星群中卫星数目为 9 颗，每个中心卫星维持的星间链路数目为 12 条，其中 8 条分配给星群内部的相邻卫星，星间链路最大长度为 1 936 km，4 条分配给相邻星群的主星，星间链路长度大约为 4 100 km。

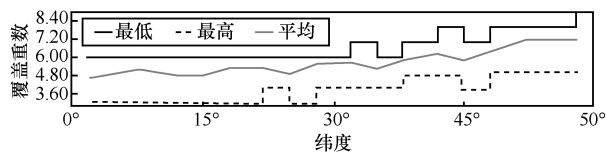
4.1 覆盖重数对比

两个星座都能实现全球范围内的覆盖，但在保证全球覆盖的情况下，本系统相比于铱星系统，中低纬度地区覆盖重数明显加强，中低纬度地区覆盖重数越大，可供选择的卫星越多，星座抗打击能力越强，系统的顽健性越好^[16]。

铱星中低纬度地区卫星覆盖重数的情况如图 7(a)所示，不足 4 重，而基于分布式星群的双层星座在中低纬度地区卫星覆盖重数的情况如图 7(b)所示，性能大大提高。由图 7 可知，双层系统的平均覆盖重数明显增加，整个区域的卫星覆盖重数都在 4 以上。



(a) 铱星中低纬度地区覆盖重数



(b) GEO+LEO中低纬度地区覆盖重数

图7 星座中低纬度地区覆盖重数

4.2 平均通信仰角对比

对于移动通信系统，由于阻塞和多径效应，电子流衰减、大气吸收以及闪烁对于卫星链路的影响较大，影响的程度主要由链路经过大气层的路径长度决定，而路径长度又直接由通信仰角决定^[17]。随着仰角的增大，路径长度减小，通信质量提高。图 8 显示了双层星座与铱星星座在中低纬度地区的平均通信仰角的情况对比，由图 8 可知，在保证全球覆盖的情况下，铱星星座的平均通信仰角为 25°~35°，而双层星座的平均通信仰角为 58°~65°，明显高于铱星系统。

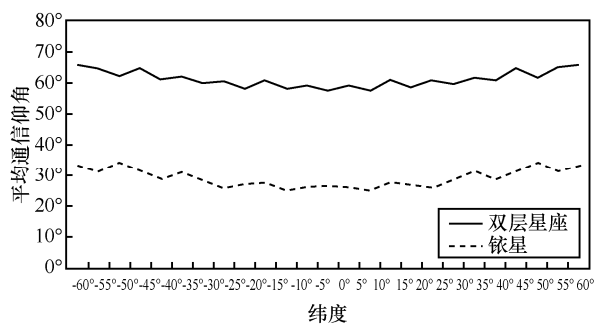


图8 全球平均通信仰角对比

5 结束语

本文提出了一种基于分布式星群的双层星座架构,低轨部分主要由分布式星群组成,每个星群内部由星间链路连接,解决了我国无法全球部署卫星地面站的问题,高轨部分由4颗同步轨道卫星组成,增强中低纬度地区的覆盖性能。最后由仿真结果可知,全球卫星覆盖重数明显增加,平均通信仰角也得到了极大提高。

参考文献:

- [1] JIANG C X, WANG X X, WANG J, et al. Security in space information networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 82-88.
- [2] 陈山枝. 发展5G的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10. CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.
- [3] 杨峰义, 谢伟良, 张建敏. 5G无线网络及关键技术[J]. 电信科学, 2017, 33(3): 173. YANG F Y, XIE W L, ZHANG J M. 5G wireless network and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(3): 173.
- [4] 韦乐平. SDN的战略性思考[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 7-12. WEI L P. Strategic thinking on SDN[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(1): 7-12.
- [5] 郝才勇. 卫星干扰处理技术综述[J]. 电信科学, 2017, 33(1): 106-113. HAO C Y. A survey of mitigating satellite interference technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(1): 106-113.
- [6] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998-2007.
- [7] WANG Y, XU Y, ZHANG Y, et al. Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks in emergency scenarios: a survey[J]. China Communications, 2017, 14(7): 1-13.
- [8] YU Q Y, MENG W X, YANG M C, et al. Virtual multi-beamforming for distributed satellite clusters in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 95-101.
- [9] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for internet of things[J]. IEEE Access, 2017(5): 18391-18401.
- [10] AKYILDIZ I F, EKICI E, BENDER M D. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424.
- [11] NISHIYAMA H, TADA Y, KATO N, et al. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1303-1313.
- [12] 张威, 张更新, 苟亮. 空间信息网络中的星座设计方法研究[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 19-23, 45. ZHANG W, ZHANG G X, GOU L. Satellite constellation design in space information network[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 19-23, 45.
- [13] WANG X Y, LI J, WANG T B, et al. Satellite constellation design with genetic algorithms based on system performance[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(2): 379-385.
- [14] EBRAHIMI H, CHEN R, JONES W L. Calibration of millimeter wave sounder radiometers on polar orbiting satellites[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2849-2854.
- [15] POPESCU O. Power budgets for Cube Satradios to support ground communications and inter-satellite links[J]. IEEE Access, 2017(5): 12618-12625.
- [16] COCCO G, ALAGHA N, IBARS C. Cooperative coverage extension in vehicular land mobile satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 5995-6009.
- [17] CID E L, ALEJOS A V, SANCHEZ M G. Signaling through scattered vegetation: empirical loss modeling for low elevation angle satellite paths obstructed by isolated thin trees[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 22-28.

[作者简介]



蒋季(1994-),女,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为卫星通信网络星座设计。



彭木根(1978-),男,北京邮电大学教师发展中心主任、教授,主要研究方向为未来无线网络、雾计算网络和协同通信理论。



王文博(1965-),男,北京邮电大学副校长,主要研究方向为无线传输技术、无线网络理论、无线信号处理。