路由算法在 LEO 通信星座构型优化中的应用

孙远辉 韩 潮

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 低轨(LEO,Low Earth Orbit)通信星座的特殊功能决定了其构型优化需要综合考虑成本、覆盖和路由性能等因素. 以往的研究往往忽略了路由性能,导致优化得到的构型不能很好的满足要求. 首先给出了两个意义明确的星座路由性能的评价指标,然后通过将它们作为目标函数进行仿真,验证了其优化必要性和评价有效性. 最后利用多目标遗传算法实现了星座的构型优化. 仿真结果显示,将路由算法加入到星座的构型优化中,在仅对星座构型参数进行微调的前提下,不仅满足了成本、覆盖等基本要求,而且星座的路由性能大大提高.

关 键 词: 低轨; 通信星座; 路由; 评价; 优化

中图分类号: V 412.41

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1435-05

Application of routing algorithm in configuration optimization of LEO communication satellite constellation

Sun Yuanhui Han Chao

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The special features of low earth orbit (LEO) communication constellation determine that costs, coverage and routing performance should be wholly taken into account in configuration optimization. In previous cases, the optimized configuration cannot meet the requirements well as routing performance was often ignored. Two evaluation indicators with clear meaning were proposed to signify routing performance and their necessities and effectiveness were proved in their simulation as objective functions. After that, the application of routing algorithm in configuration design was realized. According to the results comparison, in the premise that the configuration has little change, not only the basic requirements of costs and coverage are fulfilled, and also the routing performance of constellation is greatly improved when routing algorithm is added into configuration optimization. The best configuration design is obtained and some useful conclusions are showed finally.

Key words: low earth orbit(LEO); communication constellation; routing; evaluation; optimization

近几年来,随着航天大国综合国力的提升和军民两方面需求的加大,通信星座的组网构建已经提上日程,其理论研究也已经成为了热点,其中,星座的构型优化设计是其他工作的基础,也是重点之一. 国内近年来进行了大量研究[1-5],但这些研究大都集中于覆盖性能上,对于成本因素考虑不够,路由性能则是从未涉及.

通信星座的基本功能在于可靠地为服务区域内各地面用户提供连续、快速的通信服务. 如何找到用户之间通信的最佳路径是路由算法的研究内容,对此,国内外给出了很多优秀的路由算法. 但是它们都有一个相同点:路由算法的应用均是在星座构型已经确定的前提下实现的.

目前,星座的构型优化研究不涉及路由性能,路由算法的研究没有考虑星座构型的影响. 因此,两方面的研究是分离的,二者之间没有相互的促进. 国内到现在还没有看到将路由算法和星座构型优化相结合的研究.

收稿日期: 2011-06-16; **网络出版时间**: 2012-11-16 11:07

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121116.1107.005.html

作者简介: 孙远辉(1987-),男,山东肥城人,硕士生,syh223@sa.buaa.edu.cn.

本文在前人基础上给出了对星座路由性能影响很大的平均时延和通畅时间百分比的统计评价方法,分别用于表征星座的路由快速性和可靠性,并将这两个评价指标作为构型优化的目标函数.通过仿真验证了该评价方法的有效性.最后采用多目标遗传算法进行优化得到了最佳星座方案,通过方案对比得出了结论.

1 星座的各目标函数及约束条件

1.1 覆盖性能指标

通信星座的功能在于为覆盖区域内的各地面用户提供快速、连续、高质量的通信服务,这就要求星座至少保证一重对地覆盖.考虑到卫星有限的通信容量和可能出现失效的情况,本文要求星座保证对地二重覆盖.

1) 星座对地覆盖计算模型[6]

取地球模型为旋转椭球体,轨道预报模型选择 J2 摄动.卫星天线为定向天线.覆盖计算采用网格点法,在全球均匀设置地面站,使得各纬度上的数量与所处纬度的余弦成正比.地面点的可视仰角限值设为 10°.

2) 星座对地覆盖性能指标

采用星座覆盖时间百分比作为覆盖性能的目标函数,采用星座最大重访时间、星座平均重访时间、星座平均响应时间作为覆盖性能的约束条件.

1.2 成本模型

星座的总成本是很难精确计算的,它与国家的工业化程度、国民经济水平密切相关,本文采用目前应用较多的 USCM 模型[7]进行成本的估算,卫星质量基于文献[8]进行估算.

每颗卫星通过四部天线进行星间通信,一部天线用于星地通信,均为相控阵天线.

1.3 路由性能指标

以往路由算法的研究大多基于一个前提:星座的构型已经确定.将路由性能作为目标函数,加入到星座的构型优化中,意味着路由性能指标应该给出星座的统计评价.星座构型优化要求这种评价方法能够有效且敏感的反映出星座的路由特性.

1) 星座平均传输时延.将仿真时间内各时刻星座各卫星对之间的路由传输时延取统计平均值即为星座平均传输时延 D.

某时刻 t 星座的平均传输时延为

$$D(t)=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}D_{ij}}{N\times(N-1)} \tag{1}$$

式中,N 是星座的总卫星数量;D_{ij}为卫星 i 和卫星 j 之间的路由时延.

仿真时间内星座的平均传输时延为

$$D=\frac{\sum_{t=t_{\text{begin}}+T_{\text{step}}}^{t_{\text{end}}}D(t)}{n} \tag{2}$$

式中,T_{step}为仿真步长;n 为仿真时间内的步长个数.

这项指标表征的是通信星座为服务区域内各地面用户提供服务的平均速度.该值越小,通信服务越迅速.这是星座路由性能的第一个优化目标函数.

2) 星座通畅时间百分比.某时刻 t,星座中两颗卫星 i 和 j 之间最佳路由的呼叫通畅函数为

$$f_{ij}(t)=\begin{cases}1 & P_{ij}\leqslant\alpha\\ 0 & P_{ij}>\alpha\end{cases} \tag{3}$$

式中,P_{ij}是路由的呼叫阻塞概率;α 是阀值,表征路由呼叫通畅时,呼叫阻塞概率的最大值,即呼叫阻塞概率小于该值时,认为该条路由有大通畅概率,信息经过该路由传输的可靠性是完全可以保证的,否则就认为信息丢失,没有可靠送达.

仿真时间内两颗卫星 i 和 j 之间路由的呼叫通畅时间百分比为

$$R_{ij}=\frac{\sum_{t}[f_{ij}(t)\times T_{\text{step}}]}{t_{\text{end}}-t_{\text{begin}}} \tag{4}$$

式中,T_{step}为仿真步长.

仿真时间内星座的平均呼叫通畅时间百分比为

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}R_{ij}}{N\times(N-1)} \tag{5}$$

式中,N 是星座的总卫星数量.

星座通畅时间百分比表征的是星座可以可靠地为服务区域内各地面用户提供服务的统计时间.该值越大,提供可靠服务的时间也越长.这是星座路由性能的第 2 个优化目标函数.

3) 路由时延和呼叫阻塞概率的计算.路由传输时延等于所有链路的时延之和.仿真中,LEO 移动通信星座采用电路交换模式进行星间信息传递.呼叫阻塞概率采用 Markov 模型计算[9].

1.4 路由算法

仿真中分别应用了 3 种路由算法:最短路由算法,即卫星对之间的最佳路由为时延最小的路径;最可靠路由算法,即卫星对之间的最佳路由为呼叫阻塞概率最小的路径;最短可靠路由算法,得

到的是时延和呼叫阻塞概率均得到优化的路由.

以上 3 种路由优化方式均采用遗传算法[9]进行.

2　计算机仿真

仿真优化起始时间为 2011-1-1 T0:0:0,仿真时间为各星座的回归周期,步长为 60 秒. 星座覆盖区域为北纬 0°~60°,东经 55°~135°. 多目标遗传算法的种群规模为 30,迭代次数为 200,该算法最终会给出各方面性能达到平衡的若干解.

星座路由性能计算中,呼叫阻塞概率的阀值设置为 0.4.

2.1　以星座成本和覆盖指标为目标函数

以星座成本和二重覆盖时间百分比为目标函数,设定二重覆盖时间百分比最小为 90%,星座最大重访时间为 600 s、星座平均重访时间最大为 600 s、星座平均响应时间最大为 60 s. 表 1 列出了优化后得到的星座主要参数,覆盖性能及总成本见表 2. 其中,T 为星座卫星数量,P 为轨道面数,F 为相位参数,h 为轨道高度,i 为轨道倾角,Ω 为升交点赤经.

表 1　优化出的星座主要轨道参数

编号	T/颗	P	F	h/km	i/(°)	Ω/(°)
1	48	6	3	1 337.34	48.28	51.97
2	56	7	5	1 337.49	48.55	144.02
3	64	8	6	1 318.17	49.19	65.32
4	72	9	8	1 269.12	48.55	354.79

表 2　优化出的星座覆盖性能及成本

编号	覆盖/%	成本/百万美元
1	96.9	876.94
2	99.8	1 011.89
3	99.9	1 143.42
4	100	1 271.30

由表 2 可知,方案 2 的覆盖指标接近 100%;随着成本的增加,覆盖性能提高不大. 因此,综合考虑成本和覆盖因素,选择成本较低且覆盖指标很高的方案 2 作为最终构型是合适的.

2.2　最短路由算法在星座构型优化中的应用

3.1 节的优化没有将路由时延考虑进去,表 3 给出了表 1 星座的路由时延性能.

表 3　原星座路由时延性能

编号	卫星数量/颗	星座平均时延/ms
1	48	64.1889
2	56	73.1816
3	64	79.0649
4	72	88.9000

将最短路由算法加入到星座构型优化中,以成本、覆盖、星座平均时延 3 个指标为目标函数,表 4 给出了各星座轨道参数,表 5 为对应各星座的总成本及性能.

表 4　优化得到的新星座主要轨道参数

编号	T/颗	P	F	h/km	i/(°)	Ω/(°)
1	48	6	1	1 245.28	46.13	194.47
2	56	7	1	1 322.50	46.36	200.53
3	63	9	1	1 344.35	59.10	325.29
4	72	9	1	1 276.18	59.07	325.29

表 5　优化得到的新星座成本及性能

编号	卫星数量/颗	覆盖时间百分比/%	成本/百万美元	平均时延/ms
1	48	91.62	867.14	55.64
2	56	97.31	1 009.74	60.72
3	63	99.49	1 138.05	56.91
4	72	100	1 271.41	56.05

对比表 3 和表 5 可知,在保证覆盖性能的前提下,时延指标最少减小了 13.32%,最大减小了 36.95%. 对比 4 个新星座方案可知,相比新方案 2,新方案 1 的覆盖指标较低,新方案 3 和 4 的成本高昂,都不适合作为最佳星座. 选择新方案 2 为最佳星座. 对比表 5 的方案 2 和表 2 的方案 2 可知,前者的覆盖指标在 97% 以上,相比后者仅下降了 2.5%,但是平均时延指标却降低了 17%. 再对比二者的轨道参数可以看出,新设计方案仅对构型进行了微调,而且成本还有所降低.

可以看出,将星座平均时延作为一项路由性能指标加入到构型优化中可以大大改善星座时延特性.

2.3　最可靠路由算法在星座构型优化中的应用

2.1 节的优化没有将路由可靠性考虑进去,表 6 给出了表 1 星座的路由可靠性能.

表 6　原星座路由可靠性能

编号	星座卫星数量/颗	通畅时间百分比/%
1	48	77.21
2	56	82.19
3	64	86.78
4	72	90.25

将最可靠路由算法加入到星座构型优化中,以成本、覆盖、星座通畅时间百分比 3 个指标为目标函数. 表 7 给出了各星座轨道参数,表 8 为对应各星座的总成本及性能.

表 7　优化得到的新星座主要轨道参数

编号	T/颗	P	F	h/km	i/(°)	Ω/(°)
1	49	7	1	1 336.00	45.79	323.33
2	54	9	1	1 336.00	45.79	324.11
3	63	9	8	1 325.14	44.84	169.60
4	72	9	1	1 098.00	58.77	331.20

对比表 6 和表 8 可以看出,在保证覆盖性能的前提下,星座通畅时间百分比最少提高了

10.2%,最大提高了21.5%.对比4个新方案,相比新方案2,新方案1的覆盖指标较低,新方案3和新方案4的成本太高,都不适合作为最佳星座.选择新方案2为最佳星座.对比表8的方案2和表2、表6的方案2可知,前者的覆盖指标在96%以上,相比后者仅下降了3.8%,但是通畅时间百分比指标却提高了21.5%.而且新方案在成本上节省不少.

表8 优化得到的新星座成本及性能

编号	卫星数量/颗	覆盖时间百分比/%	成本/百万美元	通畅时间百分比/%
1	49	90.66	895.71	91.91
2	54	96.03	994.66	99.83
3	63	99.90	1133.52	96.99
4	72	98.91	1269.11	99.46

通过上面的对比可知,将通畅时间百分比作为星座路由性能的一个评价指标是合理的.

2.4 最短可靠路由算法在星座构型优化中应用

将星座平均时延和通畅时间百分比均作为目标函数加入构型优化中,目的是同时提高星座的时延和可靠特性.

表9为优化得到的各星座轨道参数,表10为对应各星座的总成本及性能.

表9 优化得到的新星座主要轨道参数

编号	T/颗	P	F	h/km	i/(°)	Ω/(°)
1	49	7	1	1323.59	48.37	331.20
2	54	9	1	1242.03	48.30	171.12
3	63	9	1	1096.60	57.02	305.48
4	63	9	1	1341.51	55.08	305.48
5	72	9	1	1043.85	58.77	331.20
6	72	9	1	1249.08	58.77	331.20

表10 优化得到的新星座成本及性能

编号	成本/百万美元	覆盖时间百分比/%	通畅时间百分比/%	星座平均时延/ms
1	894.48	90.71	83.93	67.70
2	997.03	95.10	88.43	70.34
3	1125.24	92.35	90.10	67.98
4	1138.01	99.80	89.36	69.71
5	1268.39	96.70	91.33	65.02
6	1271.05	100	90.37	66.39

为了对比,对表1中的原星座方案应用最短可靠路由算法,得到的总成本及性能见表11.

对比表10和表11可知,在同样应用最短可靠路由算法的情况下,仅考虑成本和覆盖进行优化得到的星座,其时延和可靠性均难以保证,加入星座时延和通畅时间百分比的目标函数后,星座通畅时间百分比最少提高了7.6%,最大提高了18.6%,时延指标最少减小了10.4%,最大减小了32.1%.对比4个新方案,相比新方案2,新方案1,3的覆盖指标较低,新方案4,5,6的成本高昂,都不适合作为最佳星座.选择新方案2为最佳星座.对比表10的方案2和表11的方案2可知,前者的覆盖指标为95.1%,相比后者仅下降了4.7%,但是通畅时间百分比指标却提高了15.0%,时延降低了12.9%.再对比二者的轨道参数可以看出,新设计方案节省了1.5%的成本.

表11 原星座成本及性能

编号	成本/百万美元	覆盖时间百分比/%	通畅时间百分比/%	平均时延/ms
1	876.94	96.92	70.78	75.54
2	1011.89	99.81	76.87	80.62
3	1143.42	99.99	81.56	85.44
4	1271.30	100	84.02	95.71

综合来看,将星座时延和通畅时间百分比均加入构型优化中,相比只考虑成本和覆盖优化的情形,在仅对构型进行微调的前提下,不仅保证了低廉的成本、高的覆盖性能,而且获得了低时延、高可靠性的星座路由指标.

3 结 论

星座的构型优化需要综合考虑成本、覆盖、路由性能等多项因素.

仿真对比显示,星座平均时延和星座通畅时间百分比是衡量星座路由性能的两个有效指标,二者分别表征星座通信的快速性和可靠性,意义明确.

将二者均加入星座构型优化中可以实现成本、覆盖、路由时延和路由可靠性的综合平衡.

考虑路由性能进行星座的构型优化,相比仅考虑成本和覆盖情况时,得到的设计方案仅对构型进行了微调,因此成本基本不变,甚至有所降低.仿真结果验证了设计方案的有效性.

计算LEO通信星座的覆盖性能指标时,应用较多的是用户平均介入距离;本文仿真采用的路由算法也较简单.因此采用更加精确的覆盖性能评价指标和更完善的路由算法是作者下一步的工作方向.

参考文献(References)

[1] 郦苏丹,朱江,李广侠.采用遗传算法的低轨区域通信星座优化设计[J].通信学报,2005,26(8):122-128
Li Sudan, Zhu Jiang, Li Guangxia. Optimization of LEO r-egional communication satellite constellation with GA algor-ithm [J]. Journal of Communications, 2005, 26(8): 122-128(in Chinese)

[2] 刘文,张育林,刘昆.基于多目标进化算法的卫星通信星座优化设计[J].宇航学报,2008,29(1):95-99
Liu Wen, Zhang Yulin, Liu Kun. Optimization of multi obj-ective evolutionary algorithm-based communication satellite constella-

tion [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 95-99(in Chinese)

[3] 郦苏丹,朱江,李广侠. 基于多目标进化算法的低轨区域通信星座优化设计[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(1): 1-6
Li Sudan, Zhu Jiang, Li Guangxia. Multi-object optimization of LEO regional communication satellite constellation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 6(1): 1-6(in Chinese)

[4] 郦苏丹,朱江,李广侠. 采用遗传算法的中轨区域通信星座优化设计[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1366-1369
Li Sudan, Zhu Jiang, Li Guangxia. Optimization of MEO regional communication satellite constellation with GA algo-rithm [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1366-1369(in Chinese)

[5] 王桂华. 军用通信卫星星座设计与仿真研究[D]. 长沙:国防科技大学电子科学与工程学院, 2006
Wang Guihua. The design and simulation research in milit-ary communication satellite constellation [D]. Changsha: School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, 2006(in Chinese)

[6] 贺泉,韩潮. 基于蚁群算法的多任务导航星座载荷配置[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(10): 1154-1157
He Quan, Han Chao. Payload configuration for multi-mission navigation constellation based on ant colony algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(10): 1154-1157(in Chinese)

[7] Kelly C W. Minimizing the cost of availability of services from a constellation of satellites [D]. Los Angeles: School of Engineering, University of Southern California, 2003

[8] 蒙波,伊成俊,韩潮. 基于多目标粒子群算法的导航星座优化设计[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1284-1291
Meng Bo, Yi Chengjun, Han Chao. Optimization of navigation satellite constellation by multi-objective particle swarm algorithm [J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2009, 30(7): 1284-1291(in Chinese)

[9] 孙远辉,韩潮. 星间链路及区域不均匀对路由性能的影响[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(S1): 219-223
Sun Yuanhui, Han Chao. Effects of inter-satellite link and regional heterogeneity on routing performance [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(S1): 219-233(in Chinese)

(编　辑:张　嵘)

(上接第 1434 页)

2) 在求取多胞顶点模型时充分考虑模型参数的不确定性,使得设计的 LPV 控制器在顶点边界附近具有更好的鲁棒性,在飞行器模型存在大的参数不确定性情况下仍能保证系统稳定性和性能.

参考文献 (References)

[1] Shamma J M, Michael A. Gain scheduling: potential hazards and possible remedies[J]. IEEE Control Systems, 1992: 101-107

[2] Lu Bei, Wu Fen. Switching LPV control designs using multiple parameter-dependent Lyapunov functions[J]. Automatica, 2004, 40(11): 1973-1980

[3] Nicolas F. Robust LPV control design for a RLV during reentry [R]. AIAA-2010-8194, 2010

[4] Apkarian P, Gahinet P, Becker G. Self-scheduled H_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example[J]. Automatica, 1995, 31(9): 1251-1262

[5] Li Wenqiang, Zheng Zhiqiang. Robust gain-scheduling controller to LPV system using gap metric[C] //Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, NT: IEEE Inc, 2008: 514-518

[6] Ahmed K E. The gap metric: robustness of stabilization of feedback systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, AC-30(3): 240-247

[7] Arthur M J K. Performance and the gap metric[C] //Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control. Piscataway, NT: IEEE Inc, 1994: 2656-2658

[8] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J, et al. LMI control tool box [M]. Massachusetts: The MathWorks Inc, 1995: 7.2-7.15

[9] John D S, Zane P, John D M. Hypersonic vehicle simulation model: winged-cone configuration [R]. NASA TM-102610, 1990

[10] Zhang Zenghui, Yang Lingyu, Shen Gongzhang, et al. Modeling and analysis for generic hypersonic vehicle[C] //IEEE 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, NT: IEEE Inc, 2010: 152-158

[11] Mehendale C S, Grigoriadis K M. Performance of LPV gain-scheduled systems [C] //Proceedings of the 2006 American Control Conference. Piscataway, NT: IEEE Inc, 2006: 14-16

(编　辑:赵海容)