

星间通信中带宽和功率联合分配算法*

张羽 叶芝慧

(南京大学电子科学与工程学院 江苏南京 210023)

摘要: 针对星间通信链路的资源分配与现实中业务需求和信道条件不能匹配,导致有限的星上资源不能得到充分利用的情况,本文通过构建星间通信系统容量模型,提出了一种星间通信中带宽和功率协调分配算法。算法根据不同链路具有不同信道条件和业务需求,采用拉格朗日对偶理论和次梯度法,通过对功率和带宽的二次迭代,最终的到功率和带宽的最优解。仿真结果表明本算法能够有效地为不同链路分配合理的带宽和功率资源,使系统总容量得到明显的增加,并对系统资源利用率进行显著的提高。

关键词: 星间通信;信道容量;资源分配;联合优化

中图分类号: TN927.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Joint bandwidth and power allocation algorithm in inter-satellite communication

Zhang Yu Ye Zhihui

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: For the inter-satellite communication, the conventional resource allocation does not match the requirement of practical services and the variation of channel conditions, which consequently cannot make full use of limited satellite resource. Nowadays, small satellite formation flying system attracts more attention to its great advantages mainly in reliability, cost, performance, and becomes a promising technology in the field of international aerospace. Inter-satellite communication bears the mission of information interaction between two small satellites, the small satellite and relay satellite, the relay satellite and the earth synchronous satellite. Since the power and bandwidth in satellite communication is limited, it is of great significant to improve the utilization of such resources. In this paper, by constructing satellite communication system capacity model, a joint communication bandwidth and power allocation algorithm is proposed under different channel conditions and service requirement with respect to different communication link. Then, the Lagrangian duality theory and the subgradient method is adopted mathematically. With the iteration of the power and bandwidth, respectively, the optimal power and bandwidth can ultimately be achieved. Simulation results indicate that the proposed algorithm can allocate the bandwidth and power resource efficiently, increase the system capacity, and improve the utilization of resources.

Keywords: Inter-satellite communication; channel capacity; resource allocation; joint optimization

1 引言

星间通信是目前卫星通信领域内研究的热点问题之一,Arthur C. Clarke 于1945年阐述了卫星在地球静止轨道(geostationary orbit, GEO)上进行中继无线电信号的方法,通过该方法,无线电信号可以实现在地球上任一点进行无盲点的通信。虽然目前天上卫星很多,却都自为体系,难以实现资源共享;而单独一颗卫星已经很难满足各式各样

的需求,因此卫星之间实现多点通信是卫星通信发展的必然趋势^[1]。

星间通信链路是完成卫星与卫星之间数据交互的最佳手段,它也是实现卫星之间多点通信的必要前提。而在空间通信中,星上资源非常珍贵,却也存在着卫星系统星上资源浪费的现象,因此,提高星上资源的利用率就显得尤为迫切,目前存在的一种解决手段是在有限的星上资源内争取更多的信道容量。由于每条通信链路是不同的,其业务需

求也是实时变化的,因此其所分配到的资源也应该是随着其业务需求等不断变化的。文献[2]针对认知无线网络,采用拉格朗日对偶方法进行优化问题的求解,并给出了兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配的分布式算法。Fujii H 等人通过将认知无线电引入卫星通信,利用认知无线电通信等的方式方法来有效提高卫星通信的频谱利用率^[3-10]。文献[11]针对多波束通信卫星,通过多波束频率复用,采用迭代方法,利用拉格朗日对偶理论和次梯度法对功率和带宽进行优化。文献[12]提出基于贪婪搜索算法的无线多用户系统中最优功率和带宽分配。但星间通信链路不同于以上各种系统,因此其算法难以直接应用于星间通信链路。

本文主要通过构建多条通信链路的星间通信系统模型,根据认知无线电中带宽与功率联合分配的原理,考虑卫星功率与带宽的耦合关系,提出一种通过对链路间功率、带宽的二次迭代的算法,将星上功率带宽实时的对各个通信链路进行统筹分配。同目前已有的分配星上资源的方式相比,本文所提出的功率和带宽联合分配算法进一步提高了卫星的系统容量,减少了运算量,具有相对较高的星上资源利用率。

2 系统模型

2.1 系统拓扑结构

在大型的卫星网络中,星间通信链路的形式和网络拓扑结构多样化,星间通信链路的形式有编队飞行小卫星内星-星之间的通信链路、编队飞行小卫星主星-中继卫星之间通信链路;中继卫星-地球同步通信卫星之间的通信链路。编队飞行小卫星和整个支持系统间的拓扑结构示意图如图 1 所示。由图可知,其通信链路为星状网或者网状网。

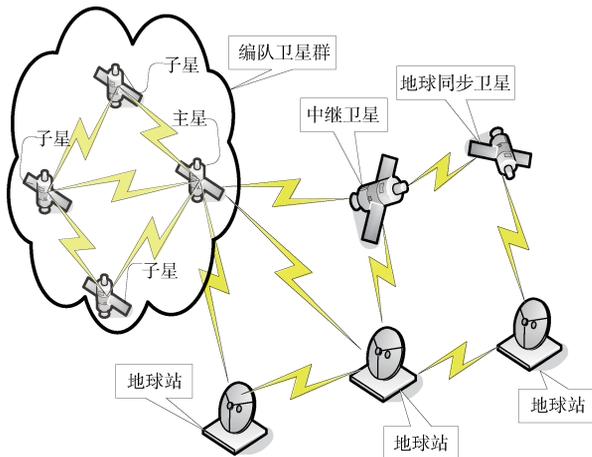


图 1 星间通信系统拓扑图

2.2 系统建模

星间通信的系统模型如图 2 所示, C_i 为每条链路的信道系统容量, T_i 为每条链路的吞吐量, P_i 和 B_i 分别是第 i

条链路所分配的系统功率和信道带宽,通信链路的信道衰减系数为 α_i ,其衰减系数主要包含系统自由空间损耗、多普勒频移以及噪声等。假设该通信链路的信道为高斯信道, N_0 为每个通信链路的噪声功率谱密度, P_{all} 和 B_{all} 分别为系统的总功率和总带宽。第 i 个信道的香农信道系统容量为:

$$C_i = B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right) \quad (1)$$

$$\sum_i P_i \leq P_{all} \quad (2)$$

$$\sum_i B_i \leq B_{all} \quad (3)$$

从式(1)可以看出,随着分配给每个通信链路的系统功率和信道带宽的增加,分配给每个信道的系统容量 C_i 也会增加。但由于星上资源是有限的,因而只有通过合理的分配带宽和功率资源来增加系统总容量。

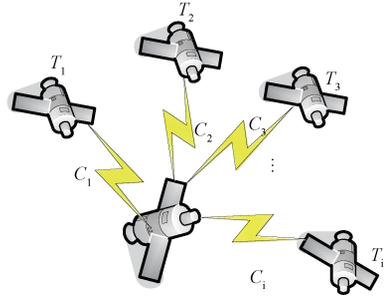


图 2 星间通信系统模型

3 最优带宽和功率分配

3.1 算法模型

根据文献[9],本文对每条通信链路的系统容量和每条通信链路的业务需求进行综合考率,通过采用二阶差分优化目标函数,将优化问题建模为:

$$\min \sum_{i=1}^N (T_i - C_i)^2 \quad (4)$$

$$\text{s. t. } C_i = B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right) \leq T_i \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_i P_i &\leq P_{all}, P_i \geq 0 \\ \sum_i B_i &\leq B_{all}, B_i \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:约束条件(5)表明每条通信链路所分配到的信道容量不能超过其业务需求,约束条件(6)代表系统总功率和总带宽的限制。由于式(4)的优化问题是一个非线性优化问题,并且在该优化问题中,变量 B_i 和 P_i 是相互关联的,因此很难得到全局最优解。为了解决该优化问题,本文提出了基于对偶优化理论的联合带宽和功率分配算法(optimal bandwidth and optimal power, OBOP),即如果优化问题是凸优化问题,并且对偶间隙为 0,则此对偶问题的最优解就是原问题的最优解^[10-11]。

3.2 证明该优化问题是凸优化问题

式(1)函数 C_i 的 Hession 矩阵为:

$$\mathbf{H}_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 C_i}{\partial P_i^2} & \frac{\partial^2 C_i}{\partial P_i \partial W_i} \\ \frac{\partial^2 C_i}{\partial P_i \partial W_i} & \frac{\partial^2 C_i}{\partial W_i^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于 $\frac{\partial^2 C_i}{\partial P_i^2} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{-\alpha_i^2 P_i}{N_0 B_i + \alpha_i^2 P_i} \leq 0, |\mathbf{H}_c| = 0$ 。因此

根据半负定矩阵的定义判断出 H_c 为半负定的,因此函数 C_i 是凹函数。

为证明式(4)为凸函数,只需证明函数 $f_{(B_i, P_i)} = (T_i - C_i)^2$ 为凸函数。

$f_{(B_i, P_i)} = (T_i - C_i)^2$ 的 Hession 矩阵为:

$$\mathbf{H}_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial P_i^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial P_i \partial B_i} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial P_i \partial B_i} & \frac{\partial^2 f}{\partial B_i^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial P_i^2} = 2 \left(\frac{\partial C_i}{\partial P_i} \right)^2 + 2(T_i - C_i) \frac{B_i}{\ln 2 \left(\frac{N_0 B_i}{\alpha_i} + P_i \right)^2} \geq 0 \quad (10)$$

$$|\mathbf{H}_f| = 4(T_i - C_i) \frac{C_i^2}{B_i \ln 2 \left(\frac{N_0 B_i}{\alpha_i} + P_i \right)^2} \geq 0 \quad (11)$$

根据半正定矩阵的定义,由式(10)(11)可得 \mathbf{H}_f 是半

正定的,因此 $\sum_{i=1}^N (T_i - C_i)^2$ 为凸函数,即优化问题的目标函数是凸函数,同时所有的约束条件又都是线性约束,所以式(4)是一个凸优化问题。

3.3 问题求解

由于式(4)是一个凸优化问题,可以采用标准的拉格朗日对偶方法进行求解^[9]。通过引入非负对偶变量 λ, μ 。拉格朗日函数为:

$$L(P, B, \mu, \lambda) = \sum_{i=1}^N [T_i - B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right)]^2 + \mu (B - \sum_{i=1}^N B_i) + \lambda (P - \sum_{i=1}^N P_i) \quad (7)$$

式中: $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$, $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]$ 。

所以该优化的问题式(4)对偶问题的目标函数为:

$$D_{(\lambda, \mu)} = \max_{\lambda, \mu \geq 0} L(P, B, \mu, \lambda) \quad (8)$$

最终的到该优化问题的对偶问题为:

$$\min_{\lambda, \mu \geq 0} D(\lambda, \mu) \quad (9)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \lambda} = P - \sum_{i=1}^N P_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \mu} = B - \sum_{i=1}^N B_i \quad (11)$$

采用梯度下降法求解对偶问题式(8),得到对应的拉格朗日乘子 $\lambda/$ 和 $\mu/$ 的迭代公式分别为:

$$\lambda(k+1) = \left[\lambda(k) - m \left(P - \sum_{i=1}^N P_i \right) \right]^+ \quad (12)$$

$$\mu(k+1) = \left[\mu(k) - m \left(B - \sum_{i=1}^N B_i \right) \right]^+ \quad (13)$$

式中: $[x]^+ = \max\{0, x\}$, m 为迭代的步长因子,通常取一个很小的正数, k 表示迭代次数。

为了得到对应于 $\mu(k+1)$ 和 $\lambda(k+1)$ 的带宽和功率分配,继续使用梯度下降法求解。令

$$f_i(B, P) = [T_i - B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right)]^2 - \mu B_i - \lambda P_i \quad (14)$$

则有:

$$\frac{\partial f_i}{\partial B_i} = 2 [T_i - B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right)] \cdot \left[\log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right) - \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{\alpha_i P_i}{N_0 B_i + \alpha_i P_i} \right] - \mu \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial P_i} = \frac{2 [T_i - B_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i P_i}{B_i N_0} \right)]}{\ln 2} \cdot \frac{\alpha_i B_i}{B_i N_0 + \alpha_i P_i} - \lambda \quad (16)$$

所以得到带宽和功率的迭代公式分别为

$$B_i(k+1) = \left[B_i(k) + m \frac{\partial f_i}{\partial B_i} \right]^+ \quad (17)$$

$$P_i(k+1) = \left[P_i(k) + m \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \right]^+ \quad (18)$$

上述的梯度下降法只要迭代步长 m 选择足够小,就能保证最优收敛性^[9]。联合带宽和功率分配算法流程图如图3所示。

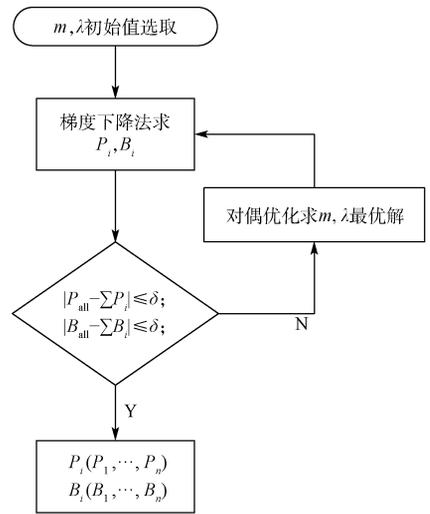


图3 算法流程

4 仿真分析

假设星间链路有10条通信链路,主星的通信总功率和总带宽分别为200 W和500 MHz,每条通信链路的业务需

求为 [80, 90, 140, 150, 160, 170, 120, 120, 120, 120,] (Mbps)。假设每条链路的归一化噪声功率谱密度系数分别为 [0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.3, 0.4, 0.7] $\times 10^{-6}$ 。收敛门限 $\delta=10^{-6}$, 迭代步长固定为 $m=0.01$ 。

为了检测本文所提出的算法 OBOP 的性能, 将该算法同以下两种算法进行对比, 并通过 MATLAB 进行仿真。

1) 优化带宽等功率算法 (optimal bandwidth and equal power, OBEP), 即所有通信链路的功率进行平均分配, 单优化各条链路的带宽^[13]。

2) 等带宽优化功率算法 (equal bandwidth and optimal power, EBOP), 即所有通信链路的带宽平均分配, 单优化各条链路的功率^[14]。

图 4 和图 5 为系统所采用 3 种不同优化算法时每条通信链路所分配的功率和带宽。从图 4 可以看出, 在功率分配的过程中, OBEP 算法采用等功率的分配而不考虑业务需求和信道条件的差异。EBOP 算法与 OBOP 算法相比, 在具有相同的信道条件下, OBOP 算法对于高业务需求的通信链路分配更多的功率, 而对于低业务需求的通信链路分配较少的功率, 在具有相同的业务需求和不同的信道条件下, 信道条件越差, 分配的功率越少, 如链路 5 分配的功率为零, 明显少于其他波束。从图 5 可以看出, 在带宽分配的过程中, OBEP 算法采用等带宽的分配方式而不考虑业务需求和信道条件的差异。EBOP 和 OBOP 算法相比, OBOP 算法在相同的信道条件和不同的业务需求条件下, 对于高业务需求区域的点波束分配更多的带宽, 而对于低业务需求区域的点波束分配较少的带宽, 在相同的业务需求和不同的信道条件下, 信道条件越差, 分配的带宽越少。因此, 可以看出, OBEP 和 EBOP 算法只是优化功率或带宽其中一种资源, 而对另一种资源造成了浪费, 而 OPOB 算法能够根据当前业务需求和信道条件灵活的对星上功率和带宽资源进行实时的分配, 具有更加优异的性能。

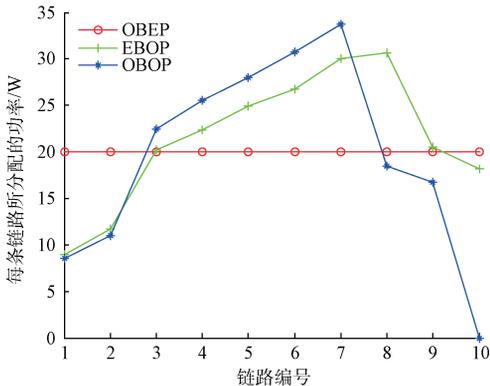


图 4 不同优化算法下各条链路功率

因此可以看出, OBEP 和 EBOP 算法只是对功率或带宽中的一种星上资源进行优化, 而造成另外一种星上资源的浪费; 而 OPOB 算法能够根据业务需求和信道条件对卫星的

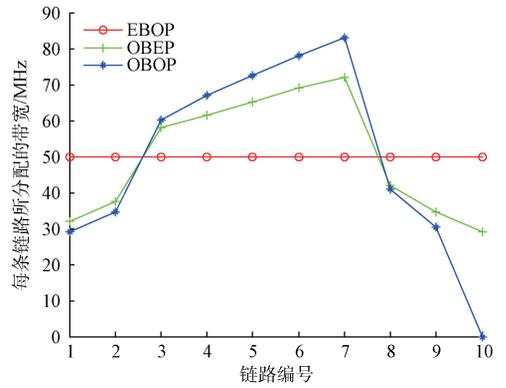


图 5 不同优化算法下各条链路带宽

功率和带宽资源进行实时的分配, 具有更加优异的性能。

图 6 为当系统采用 3 种不同优化算法时不同通信链路的信道容量。由图 6 所示, OBOP 算法与其他两种算法相比, 对具有相同的信道条件, 但业务需求不同通信链路 (如通信链路 1~7), 在采用 OBOP 算法对通信链路进行优化时, 当业务需求超过其门限值时, 高业务需求的通信链路获得比其他 3 种算法进行优化时更多的信道容量, 而当业务需求低于其门限值时, 低业务需求的通信链路获得比其他三种算法进行优化时更少的容量。对于具有相同业务需求, 但不同信道条件的通信链路, 如通信链路 7~10, 在采用 OBOP 算法对通信链路进行优化时, 在信道条件好于其门限值时, 信道条件越好, 通信链路会获得比其他 3 种算法进行优化时越多的信道容量, 而在信道条件低于其门限值时, 信道条件越差, 通信链路会获得比其他 3 种算法进行优化时越小甚至为 0 (如通信链路 10) 的信道容量。

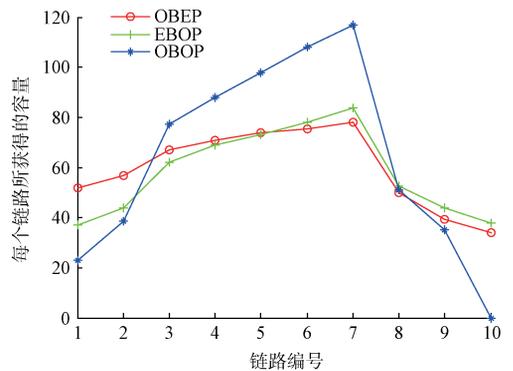


图 6 不同优化算法下各条链路信道容量

表 1 为在不同优化算法情况下的系统总容量。由表 1 可以看出, 采用本文所提出的星间通信中带宽和功率协调分配算法, 可以显著提高星间通信的系统容量。因此, OBOP 与 EBOP 和 OBEP 算法相比, OPOB 算法能够根据当前业务需求和信道条件灵活的对星上功率和带宽资源进行实时的分配, 从而也灵活地分配系统容量, 具有更好的系统性能。

表1 不同算法的系统总容量

算法	$S C_i/\text{Mbps}$
OBEP	576.478
EBOP	559.687 5
OBOP	636.876 5

5 结 论

本文针对星上资源的短缺,提出了一种星间通信中带宽和功率联合协调分配算法,用于提高星间通信的系统容量,更好的分配星上资源。本文根据星间通信链路构建功率带宽联合优化系统模型,构造二阶差分目标函数,采用拉格朗日对偶理论和次梯度的算法,通过将是对偶变量和星上资源(功率和带宽)分别进行迭代来解决该联合优化问题。经仿真分析可知,该功率带宽协调分配优化算法可以灵活分配容量,与其他传统的优化算法相比,信道总容量和频带利用率有明显提升。同时,本文所提算法具有更强的环境适应性,从而显著提高星间通信系统性能。

参考文献

- [1] 杨霞,李建成. Walker 星座星间链路分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2):143-147.
- [2] 闫继垒,李建东,赵林靖,等. 认知无线网络中兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配算法[J]. 通信学报, 2013(10):56-64.
- [3] 陈小毛,陈尚松. 认知无线电的对数正态分布功率控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(2):137-140.
- [4] 贾明伟,吴敏,沙超,等. 节点相邻关系的传感网覆盖优化方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11):1574-1583.
- [5] 褚御芝,郑宝玉. 认知无线网络中基于最佳中继选择的协作传输策略[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):520-526.
- [6] 蒋鹏,宋华华,王兴民. 基于动态生成树和改进不敏卡尔曼滤波的传感器网络目标跟踪算法研究[J]. 仪

器仪表学报, 2015, 36(2):415-421.

- [7] 谢先斌,李新山. 基于频谱感知的认知无线网络容量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1):61-65.
- [8] 张翠. 无线传感网协议测试平台研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6):54-57.
- [9] FUJII H, ASAI T, OKUMURA Y, et al. Capacity achievable by spectrum sharing with adaptive transmit power control; Based on field measurements [C]. 2009 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM '09), IEEE, 2009:1-6.
- [10] 马陆,陈晓挺,刘会杰,等. 认知无线电技术在低轨通信卫星系统中的应用分析[J]. 电信技术, 2010 (4):49-51.
- [11] 贾录良,孟艳,郭道省,等. 多波束卫星通信功率带宽联合优化算法[J]. 信号处理, 2014(8):973-978.
- [12] GONG X, VOROBYOV S A, TELLAMBURA C. Joint bandwidth and power allocation with admission control in wireless multi-user networks with and without relaying [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4):1801-1813.
- [13] 杨自柱,章春娥. 基于凸优化的抗旋转图像盲源分离算法研究[J]. 信号处理, 2012(7):988-993.
- [14] PARK U, KIM H W, OH D S, et al. A dynamic bandwidth allocation scheme for a multi-spot-beam satellite system [J]. Etri Journal, 2012, 34 (4): 613-616.

作者简介

张羽,南京大学硕士研究生,主要研究方向为卫星通信、信号处理。

E-mail:zy_u@163.com

叶芝慧,南京大学副教授,硕导,主要研究方向为深空通信、卫星通信与认知无线电等。

E-mail:zhye@nju.edu.cn