



多波束卫星通信系统波束干扰下的资源分配策略研究

摘要

多波束卫星通信系统能够为移动用户提供全球范围的通信服务。然而,由于条件限制,星上资源利用率较低,并且星地距离较远,业务传输过程中存在较大时延。为了提高星上资源的利用率,本文在有波束干扰的多波束卫星通信系统中,针对有严格时延要求的卫星通信业务,提出了一种新的下行链路资源分配算法,增加了业务时延限制和最大功率限制两种约束条件,满足各点波束的最大业务时延要求以及对地面网络通信的干扰影响。本文同时考虑了各点波束的相互干扰对系统容量的影响,以最大化满足点波束业务需求量为优化目标,利用拉格朗日对偶理论和次梯度下降法得到最优资源分配结果。仿真结果表明:在噪声功率谱密度相同的信道条件下,与现有的几种算法相比,本文提出的算法可满足每个点波束的时延要求,具有较好的公平性,同时提高了系统的总传输速率,降低了点波束业务需求与所分配通信资源之间的差值,最大化满足用户通信业务需求;在噪声功率谱密度不同的信道条件下,本文提出的算法仍保持较好的公平性。

关键词

卫星通信;多波束;波束干扰;资源优化;时延;干扰功率

中图分类号 TN927.2

文献标志码 A

收稿日期 2021-06-30

资助项目 国家自然科学基金(61501244,61501245);江苏省自然科学基金(BK20150932)

作者简介

司闯,男,硕士生,研究方向为卫星通信。574128265@qq.com

李鹏(通信作者),男,博士,教授,研究方向为卫星通信。peng.li@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

0 引言

基于卫星的物联网系统正受到各个领域研究人员的密切关注,但物联网多连接、低功耗的特点给传统的卫星通信系统带来了巨大的挑战^[1]。万物互联通信将会是未来物联网时代的重要组成部分^[2-3]。利用资源分配技术,多波束卫星系统可以满足物联网日益增长的通信业务需求。然而,在多波束卫星通信系统中,星上资源非常有限,当面对海量的通信业务请求时,功率带宽等资源便显得尤为珍贵。如何合理有效地分配星上资源,从而最大化地满足业务需求,成为卫星通信领域研究的热点。

针对多波束卫星通信系统中资源分配的问题,文献[4]提出两种资源优化模型,一种是在功率和频谱分配中寻求折中,另一种采用优化带宽来提高传输速率;文献[5]提出一种低轨卫星的多波束资源联合分配方案,但没有考虑业务时延的问题;文献[6]提出一种不考虑波束间干扰的下行链路功率分配模型;文献[7]建立了基于卫星链路的容量计算模型来对功率进行优化。其中,文献[5-7]仅是优化功率,没有考虑到带宽的灵活分配,对带宽资源造成了一定的浪费。文献[8]构建了一种资源分配模型对功率和频带做联合优化;文献[9]和文献[10]在基于点波束干扰的前提下,分别提出一种功率和带宽联合分配算法,把最小化业务需求量与所分配容量差值平方数作为优化目标,但均未考虑存在时延的实际情况。在多波束卫星系统中,点波束之间的干扰问题不可忽视,文献[11]研究了多波束卫星系统上行与下行链路中的同频波束干扰。

由于星地距离较远,信号传输会有时延的情况存在,并且卫星传输过程中产生的干扰功率会影响地面网络的通信质量。因此,对于存在点波束间干扰和有时延限制的多波束卫星通信系统,本文提出一种以二阶业务未服务量^[7]作为优化目标函数的功率带宽联合优化算法,约束了卫星的最大传输时延和干扰功率,优化系统容量,逼近业务需求量,并且利用拉格朗日对偶理论和次梯度下降法获得了此算法的最优解。

1 系统模型

多波束卫星通信系统如图1所示。该系统由对地静止地球轨道卫星、多个点波束以及多个卫星用户组成,系统返向业务信道采用频分

多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)体制.由于卫星用户有实时业务需求,所以相关点波束的业务需求是高度动态的.假设此系统中多波束卫星共有 N 个波束,第 i 个点波束覆盖的系统容量为 C_i ,用户业务需求量表示为 T_i ;系统的总功率资源为 P_{total} ,分配给第 i 个点波束的功率为 P_i ;系统的总带宽资源为 W_{total} ,分配给第 i 个点波束的带宽为 W_i .

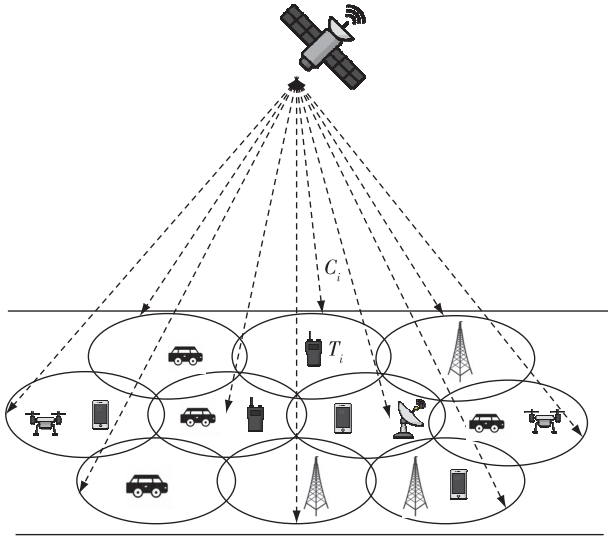


图1 多波束卫星通信系统

Fig. 1 Multi-beam satellite communication system

利用多波束天线和频率复用方案,卫星系统可以在同频信道中同时发送多个信号,但在这种情况下,使用相同频率的点波束之间会产生干扰,如图2所示.为了表示系统的波束间干扰,引入波束间干扰矩阵 \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & 0 & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $h_{ij}(i, j \in (1, 2, \dots, N))$ 表示第 j 个点波束对第 i 个点波束的干扰系数,并且 $h_{ij} = \alpha_{ij}^2 / \alpha_i^2$, α_{ij}^2 是第 j 个点波束的波束旁瓣发射到第 i 个点波束而产生的链路衰减因子, α_i^2 为第 i 个点波束的链路衰减因子. h_{ij} 的值取决于频率复用方案,因为点波束对自身产生的干扰极小,可以忽略不计,所以 h_{ii} 的值可设为0.从式(1)中可以得出,第 i 个点波束受到其他点波束的总信号干扰 $I_i^{\text{total}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j h_{ij}$. 因此,分配给第 i 个点波束的香农有界容量 C_i 可以表示为

$$C_i = W_i \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i^2 P_i}{W_i N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j h_{ij}} \right), \quad (2)$$

其中, N_0 是每个点波束的噪声功率谱密度.从式(2)中可以得出,第 i 个点波束的容量 C_i 的大小和分配给此点波束的功率 P_i 以及带宽 W_i 成正比.然而由于存在波束间干扰, C_i 会随着分配给其他点波束的功率增加而减少.所以,每个点波束的容量的大小不仅仅取决于分配给它的功率以及带宽,还取决于分配给其他点波束的功率和带宽.

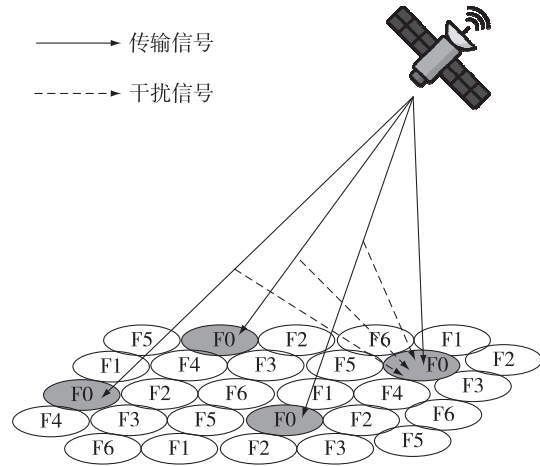


图2 卫星下行链路的同频干扰

Fig. 2 Co-channel interference in satellite downlink

2 功率带宽联合分配算法

在多波束卫星通信系统中,不同用户的通信业务需求也不同.其中语音、视频等实时业务有严格的时延要求.若用 A_i 表示产生新的业务需求增长速率, U_i 表示由于通信业务完成导致的业务需求下降速率,为了保证系统的通信服务保持稳定,系统需要满足下列条件:

$$T_i < \infty, A_i < U_i. \quad (3)$$

第 i 个点波束在系统稳定状态下的时延 $d_i^{[12]}$ 可以表示为

$$d_i = \frac{T_i}{A_i} \geq \frac{T_i}{U_i} \geq \frac{T_i}{(1 - e_i) C_i}, \quad (4)$$

其中, e_i 是第 i 个点波束下行链路的误包率, $e_i < 1$. 对于有严格时延限制的通信服务,用 D_i 表示第 i 个点波束的最大时延限制,所以系统的时延 d_i 应该满足条件:

$$d_i \leq D_i. \quad (5)$$

与式(4)结合,可以得到:

$$D_i \geq \frac{T_i}{(1 - e_i)C_i}, \quad (6)$$

即:

$$C_i \geq \frac{T_i}{(1 - e_i)D_i}, \quad (7)$$

其中, $(1 - e_i)D_i > 1$. 根据式(7), 可以将时延约束转化为最小业务需求量的约束, 即每个点波束的最大时延限制决定它的最小业务需求.

为了评估分配算法的性能, 选择合理的评判指标至关重要. 本文的最终优化目标是点波束所分配到的容量最大程度接近它们的业务需求. 基于以上约束条件, 本文采用二阶差分函数作为优化目标来最小化它们的差距^[9]. 为了量化业务需求与实际所分配的系统容量之间的差距, 将二阶业务未服务量函数定义为 $(T_i - C_i)^2$, 其中 T_i 是第 i 个点波束的业务需求量, C_i 是分配给 i 个点波束的容量.

假设本文多波束卫星系统有 N 个点波束, 为了最大化满足每个点波束的通信需求, 分配给点波束的容量应与它的业务需求量接近, 因此可以根据上述条件建立如下数学模型^[13-14]:

$$\min f(P, W) = \min_{\{P_i, W_i\}} \sum_{i=1}^N (T_i - C_i)^2, \quad (8)$$

$$\text{s.t. } C_i \leq T_i, \quad (9)$$

$$C_i \geq \frac{T_i}{(1 - e_i)D_i}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\text{total}}, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N W_i \leq W_{\text{total}}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i g_i \leq P_{\text{int}}, \quad (13)$$

其中, $i \in (1, 2, \dots, N)$. 式(9)表明点波束的容量不能大于它的业务需求量, 避免造成资源浪费; 式(10)表明分配容量的下限与时延有关, 每个点波束都受到最小业务需求的限制; 式(11)和(12)分别表明分配给每个点波束的功率之和与带宽之和不能大于系统的总功率与带宽资源; 式(13)中, P_{int} 是保证地面网络通信服务质量的最高干扰功率, g_i 是第 i 个点波束的信道增益, 此约束可以确保卫星通信产生的干扰不会影响地面网络通信的服务质量.

当各点波束相互之间不存在干扰时, 点波束干扰矩阵中的每个元素都为0, 上述问题便是凸优化问题. 但此资源分配模型中考虑了点波束间的相互干扰, 优化变量 P_i 是相互耦合的, 此优化问题不属于凸

优化问题, 因此可以从对偶问题的角度来获得联合优化问题的最优解.

引入非负对偶变量 ρ, λ, μ 和 ν , 可以得到联合优化问题的拉格朗日函数为

$$L(P, W, \rho, \lambda, \mu, \nu) = \sum_{i=1}^N (T_i - C_i)^2 + \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{T_i}{(1 - e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_i - P_{\text{total}} \right) + \mu \left(\sum_{i=1}^N W_i - W_{\text{total}} \right) + \nu \left(\sum_{i=1}^N P_i g_i - P_{\text{int}} \right), \quad (14)$$

其中, $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)$, $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, $W = (W_1, W_2, \dots, W_N)$.

从式(9)可以得到拉格朗日对偶函数为

$$g(\rho, \lambda, \mu, \nu) = \min_{P, W} L(P, W, \rho, \lambda, \mu, \nu) = \min_{P, W} \left(f(P, W) + \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{T_i}{(1 - e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_i - P_{\text{total}} \right) + \mu \left(\sum_{i=1}^N W_i - W_{\text{total}} \right) + \nu \left(\sum_{i=1}^N P_i g_i - P_{\text{int}} \right) \right) \leq f(P^*, W^*) + \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\frac{T_i}{(1 - e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_i^* - P_{\text{total}} \right) + \mu \left(\sum_{i=1}^N W_i^* - W_{\text{total}} \right) + \nu \left(\sum_{i=1}^N P_i^* g_i - P_{\text{int}} \right) \leq f(P^*, W^*) = d^*, \quad (15)$$

其中, d^* 是原问题约束条件下的最优解, 可以通过拉格朗日对偶理论和次梯度下降法获得.

具体说明, 原优化问题可以分解为以下3个子问题:

1) 子问题1(功率分配): 在给定对偶变量 ρ, λ, μ 和 ν 的初始值以及各点波束初始带宽的情况下, 根据 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[15] 对式(14)中的 $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 求偏导, 且令 $\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0$, 可以得到:

$$T_i - C_i + \frac{\rho_i}{2} = \frac{\lambda \nu g_i \ln 2 \left(W_i N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j h_{ij} + \alpha_i^2 P_i^* \right)}{2\alpha_i^2 W_i}. \quad (16)$$

通过数值方法计算, 可以得到分配给每个点波束的最优功率 $P_i^{\text{opt}} = \max\{0, P_i^*\}$.

2) 子问题2(带宽分配): 将通过数值计算得到的功率 P_i^{opt} 代入式(14), 并对 $W_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 求偏

导,令 $\frac{\partial L}{\partial W_i} = 0$, 得到:

$$2 \left(T_i - C_i + \frac{\rho_i}{2} \right) \times \left[\log_2 \left(1 + \frac{\alpha_i^2 P_i^{\text{opt}}}{W_i^* N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j^{\text{opt}} h_{ij}} \right) - E \right] - \mu = 0, \quad (17)$$

其中

$$E = \frac{W_i^* N_0 P_i^{\text{opt}}}{\ln 2 \left[\frac{\left(W_i^* N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j^{\text{opt}} h_{ij} \right)^2}{\alpha_i^2} + P_i^{\text{opt}} \left(W_i^* N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j^{\text{opt}} h_{ij} \right) \right]}. \quad (18)$$

利用数值方法计算式(17)与(18)中 W_i^* 的值, 便可以得到分配给每个点波束的带宽 $W_i^{\text{opt}} = \max\{0, W_i^*\}$.

3) 子问题3(更新对偶变量): 利用次梯度下降法对对偶变量进行迭代更新:

$$\begin{aligned} \rho_i^{n+1} &= \left[\rho_i^n - \Delta_{\rho_i} \left(C_i^{\text{opt}} - \frac{T_i}{(1 - e_i) D_i} \right) \right]^+, \\ \lambda^{n+1} &= \left[\lambda^n - \Delta_{\lambda} \left(P_{\text{total}} - \sum_{i=1}^N P_i^{\text{opt}} \right) \right]^+, \\ \mu^{n+1} &= \left[\mu^n - \Delta_{\mu} \left(W_{\text{total}} - \sum_{i=1}^N W_i^{\text{opt}} \right) \right]^+, \\ \nu^{n+1} &= \left[\nu^n - \Delta_{\nu} \left(P_{\text{int}} - \sum_{i=1}^N P_i^{\text{opt}} g_i \right) \right]^+, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $[x]^+ = \max\{0, x\}$, n 是迭代次数, Δ^n 是迭代步长. 只要 Δ^n 的值选择适当, 则次梯度下降法可以保证对偶变量快速收敛到最优解.

本文提出的算法步骤具体描述如下:

步骤1. 为对偶变量 ρ, λ, μ, ν 和迭代精度 ε 设定适当的初始值, 设定最大迭代次数 n . 令每个点波束的初始带宽 $W_i = W_{\text{total}}/N, i \in (1, 2, \dots, N)$.

步骤2. 将步骤1中设定的初始值代入式(16), 计算出分配功率 $P_i^{\text{opt}}, i \in (1, 2, \dots, N)$.

步骤3. 将 P_i^{opt} 以及对偶变量 ρ, λ 和 μ 的值代入式(17)和(18), 计算出分配带宽 $W_i^{\text{opt}}, i \in (1, 2, \dots, N)$.

步骤4. 将步骤2和3得到的 P_i^{opt} 和 $W_i^{\text{opt}}, i \in (1, 2, \dots, N)$ 的值代入式(19), 更新对偶变量的值.

步骤5. 如果分配的功率以及带宽满足条件

$\left| P_{\text{total}} - \sum_{i=1}^N P_i^{\text{opt}} \right| < \varepsilon, \left| W_{\text{total}} - \sum_{i=1}^N W_i^{\text{opt}} \right| < \varepsilon$, 则进行下一个步骤, 否则返回步骤2.

步骤6. 资源优化分配完成.

根据上述过程, 如果步骤2中计算单个点波束分配功率的数值方法复杂度为 $O(S)$, 则步骤2、步骤3和步骤4的计算复杂度分别为 $O(SN)$ 、 $O(SN)$ 和 $O(2 + N)$, 其中 N 是点波束的个数. 因此, 该算法的总计算复杂度为 $O(2KSN + 2K + KN)$, 其中 K 为迭代次数. 此算法的复杂度与点波束的数目成线性关系, 表明该算法在实际应用中具有可行性.

算法流程如图3所示.

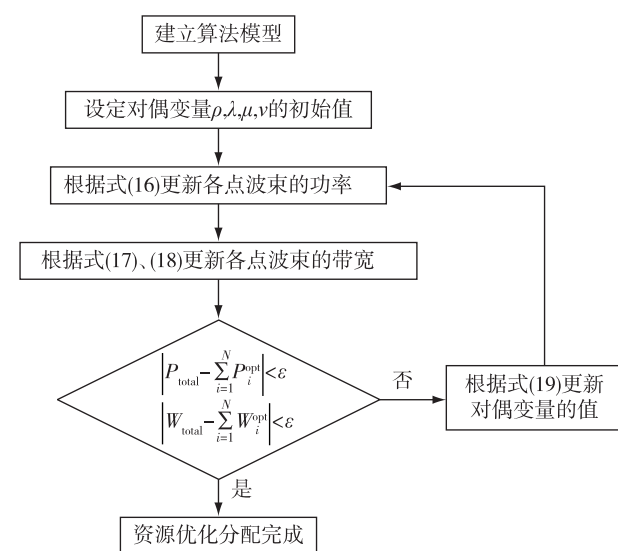


图3 资源优化分配算法流程

Fig. 3 Flow chart of the optimized resource allocation algorithm

3 算法仿真与分析

在本文多波束卫星通信系统模型中, 共有10个点波束. 系统总功率资源为200 W, 总带宽资源为500 MHz, 每个点波束的噪声功率谱密度 N_0 为 0.2×10^{-6} W/Hz. 根据文献[4], 点波束干扰矩阵中元素的值设为

$$h_{ij} = \begin{cases} 0.3, & |j - i| = 1 \text{ 或 } |j - i \pm 10| = 1, \\ 0.2, & |j - i| = 2 \text{ 或 } |j - i \pm 10| = 2, \\ 0.1, & |j - i| = 3 \text{ 或 } |j - i \pm 10| = 3, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (15)$$

通过仿真对比以下4种算法, 验证本文所提出算法的性能:

1) 本文提出的考虑时延约束的功率带宽联合分配算法, 时延约束可转换为最小业务需求量约束, 如式(6)和(7)所示。

2) 不考虑时延约束的功率带宽联合分配算法^[9]。

3) 功率带宽平均分配算法^[7]: $P_i = P_{total}/N$, $W_i = W_{total}/N$ 。

4) 功率带宽比例分配算法^[16]: $P_i = P_{total} T_i / T_{total}$, $W_i = W_{total} T_i / T_{total}$ 。

所有点波束的信道条件相同时, 假设每个点波束的业务需求量以步长 10 Mb/s 从 80 Mb/s 递增到 170 Mb/s, 最大迭代次数 $n = 100$ 。目标函数迭代过程数值变化如图 4 所示, 经过有限次数的迭代, 优化目标函数数值收敛到了稳定值, 收敛速度的快慢取决于对偶因子迭代步长的大小。

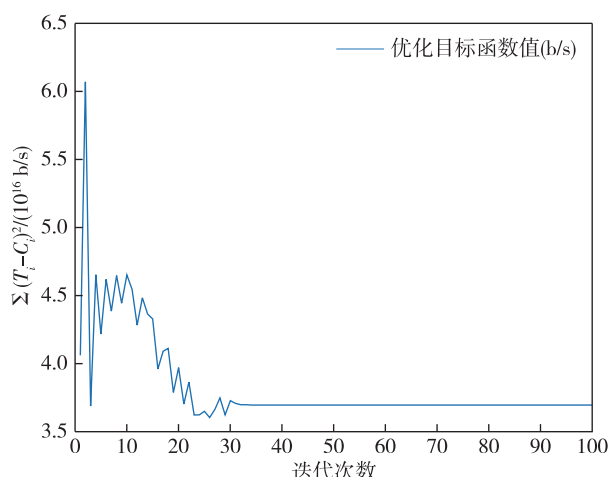


图 4 总二阶业务未服务量的收敛情况

Fig. 4 Convergence of unserved quantity of total second-order service

图 5 为 4 种算法分配容量的仿真结果。由图 5 可以看出: 平均分配算法^[7]将功率带宽平均分给每个点波束, 业务需求量较小以及业务需求量较大的点波束的容量大小相同, 导致资源浪费; 比例分配算法^[16]按照业务需求量的比例进行资源分配, 无法满足每个点波束的最小业务需求, 系统总容量较低; 无时延约束的联合分配算法^[9]给点波束 3~10 分配的容量较高, 但分配给点波束 1 的容量极低, 不具有公平性, 且系统总容量不能达到最优; 本文提出的联合分配算法可以满足每一个点波束的最小业务需求, 给业务需求量较高的点波束分配较多的容量, 并且得到的系统总容量较其他 3 种算法更大, 提高了资

源利用率。4 种分配算法的系统总容量如表 1 所示。

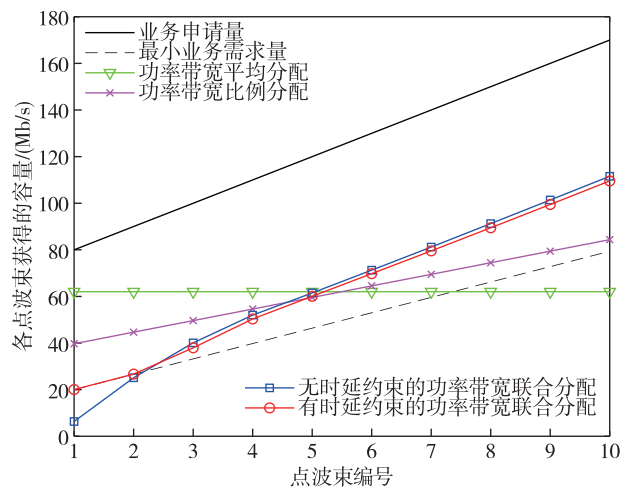


图 5 相同信道条件下各点波束获得的容量

Fig. 5 Capacity of each spot beam under the same channel

表 1 4 种算法分别得到的系统总容量

Table 1 Total system capacity obtained by the four algorithms

资源优化算法	$\sum C_i / (\text{Mb/s})$
有时延约束的功率带宽联合分配算法(本文)	642.95
无时延约束的功率带宽联合分配算法 ^[9]	641.72
功率带宽平均分配算法 ^[7]	620.50
功率带宽比例分配算法 ^[16]	623.68

信道条件相同情况下 4 种分配算法得到的二阶业务未服务量如图 6 所示: 平均分配算法分配给每个点波束的资源相同, 因此二阶业务未服务量与业务需求量成正比增长; 比例分配算法在点波束 1~4 得到的二阶业务未服务量较低, 但随着业务需求量的增长仍呈现上升趋势; 无时延约束的联合分配算法在点波束 1 产生的二阶业务未服务量最大, 不具有公平性; 利用本文提出的联合分配算法业务需求量较高的点波束可以得到较低的二阶业务未服务量, 从表 2 中可以得到, 此算法最终得到的总二阶业务未服务量最小, 即优化目标函数能够达到最优, 体现了本算法的公平性与有效性。

表 2 4 种算法分别得到的总二阶业务未服务量

Table 2 Unserved quantity of total second-order service obtained by four algorithms

资源优化算法	$\sum (T_i - C_i)^2 / (\text{b/s})$
有时延约束的功率带宽联合分配算法(本文)	3.687×10^{16}
无时延约束的功率带宽联合分配算法 ^[9]	3.722×10^{16}
功率带宽平均分配算法 ^[7]	4.789×10^{16}
功率带宽比例分配算法 ^[16]	4.172×10^{16}

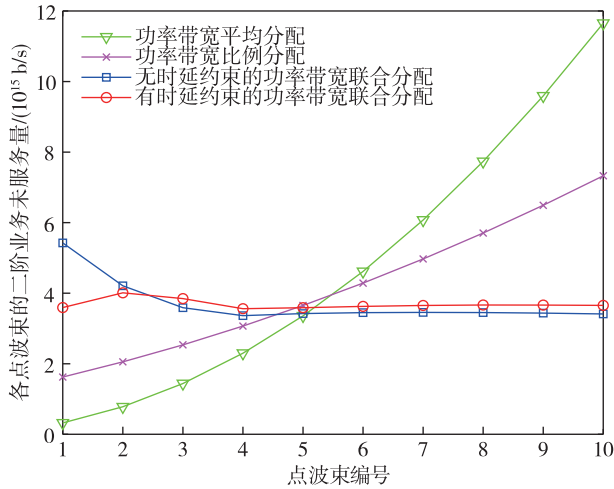


图 6 相同信道条件下各点波束的二阶业务未服务量
Fig. 6 Unserved quantity of second-order service for each spot beam under the same channel

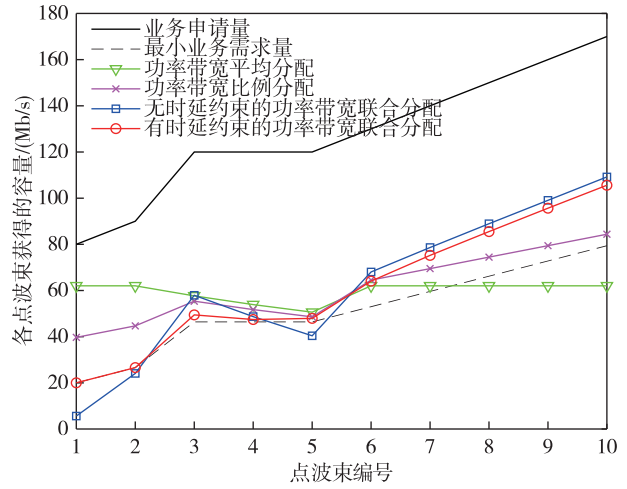


图 7 不同噪声功率谱密度信道条件下各点波束获得的容量
Fig. 7 Capacity of each point beam under different noise power spectral density channels

在信道条件不同的情况下,对信道条件不同的点波束设定相同的业务需求来分析 4 种分配算法的性能.假设 10 个点波束的噪声功率谱密度分别为 0.2、0.2、0.25、0.3、0.35、0.2、0.2、0.2、0.2 和 0.2,业务需求量分别为 80、90、120、120、120、130、140、150、160 和 170 Mb/s.4 种算法的仿真结果如图 7 所示.平均分配算法给不同信道条件的点波束分配的资源较少,给业务需求量较低了点波束分配了较多的资源,造成资源浪费;比例分配算法同样给不同信道条件的点波束分配较少的资源;无时延约束的联合分配算法分配给点波束 3 的资源较多,分配给信道条件最差的点波束 5 的资源较少,且无法满足点波束 1、2 和 5 的最小业务需求;本文提出的分配算法对信道条件不同而最小业务需求量相同的点波束分配大小相近的资源,同时可以满足每个点波束的最小业务需求,但略微降低了点波束 4 和 5 的容量,把资源分配给业务需求量较大的点波束.在信道条件不同的情况下本文提出的算法仍然具有较好的公平性.

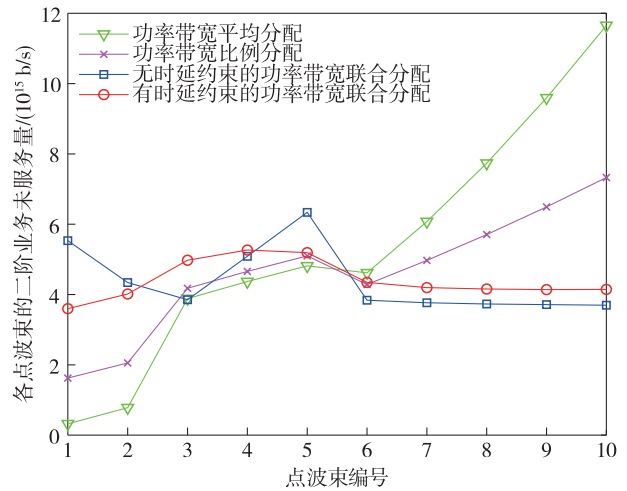


图 8 不同噪声功率谱密度信道条件下各点波束的二阶业务未服务量
Fig. 8 Unserved amount of second-order service for each spot beam under different noise power spectral density channels

4 结束语

卫星通信系统中的星上资源稀缺,为了提高星上资源的利用率,本文建立了多波束卫星系统下行链路的容量分配模型,考虑了点波束间的干扰、时延限制、对地面网络的功率干扰等条件,提出一种以二阶业务未服务量为优化目标的功率带宽联合分配算法,利用拉格朗日对偶和次梯度下降理论,将资源分配问题分为 3 个子问题,最终得到最佳资源分配方案.与已有的几种算法相比,本文提出的分配算法能够最大化减少业务需求与实际分配容量之间的差

图 8 是 4 种算法在不同信道条件下得到的二阶业务未服务量.从图 8 中可看出:平均分配算法和比例分配算法以及无时延约束的分配算法随着点波束 3~5 的信道条件变差,二阶业务未服务量都呈较快增长的趋势,无时延约束的算法在点波束 5 的二阶业务未服务量最大,以上 3 种算法的性能受到信道条件的影响较大;本文提出的算法在点波束 3~5 处的二阶业务未服务量的变化趋势较为平缓,受信道条件的影响较小,表现出较好的公平性.

距,并且提高了系统容量;在信道条件不同的情况下仍能保持较好的公平性,具有更好的性能。

参考文献

References

- [1] 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
- [2] Helbing D, Brockmann D, Chadeaux T, et al. Saving human lives; what complexity science and information systems can contribute[J].Journal of Statistical Physics,2015,158(3):735-781
- [3] Jalili M, Perc M. Information cascades in complex networks[J].Journal of Complex Networks,2017,5(5):665-693
- [4] Ding G R,Wu Q H,Wang J L.Sensing confidence level-based joint spectrum and power allocation in cognitive radio networks [J]. Wireless Personal Communications,2013,72(1):283-298
- [5] 王诗琪.低轨卫星系统的动态资源调度策略研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021
WANG Shiqi.Research on dynamic resource scheduling strategy for low orbit satellite system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2021
- [6] 王蔚龙,李勇军,赵尚弘,等.基于两阶段帕累托优化的卫星下行链路功率分配方法[J].电子学报,2021,49(6):1101-1107
WANG Weilong, LI Yongjun, ZHAO Shanghong, et al. Power allocation based on two-stage Pareto optimization in satellite downlink[J].Acta Electronica Sinica,2021,49(6):1101-1107
- [7] Wang H,Liu A J,Pan X F, et al.Optimization of power allocation for a multibeam satellite communication system with interbeam interference[J].Journal of Applied Mathematics,2014,2014:1-8
- [8] 王磊,郑军,贺川,等.高通量多波束通信卫星系统资源分配方法[J/OL].中国空间科学技术:1-10[2021-09-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20210122.0853.002.html
WANG Lei,ZHENG Jun,HE Chuan, et al.Resource allocation in high throughput multibeam communication satellite systems[J/OL].Chinese Space Science and Technology:1-10[2021-09-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20210122.0853.002.html
- [9] 史煜,张邦宁,郭道省,等.考虑波束间干扰的多波束卫星功率带宽联合分配算法[J].计算机工程,2018,44(2):103-106,113
SHI Yu,ZHANG Bangning, GUO Daoxing, et al. Joint power and bandwidth allocation algorithm with inter-beam interference for multi-beam satellite[J].Computer Engineering,2018,44(2):103-106,113
- [10] 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,2014,30(8):973-978
JIA Luliang,MENG Yan, GUO Daoxing, et al.A joint optimization algorithm of power and bandwidth for multi-beam satellite communication system [J]. Journal of Signal Processing,2014,30(8):973-978
- [11] Lutz E. Co-channel interference in high-throughput multibeam satellite systems [C] // 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC).June 8-12,2015,London,UK.IEEE,2015:885-891
- [12] Cover T M,Thomas J A.Elements of information theory [M].New York,USA:John Wiley & Sons,Inc.,1991
- [13] Ding G R,Wu Q H,Wang J L.Sensing confidence level-based joint spectrum and power allocation in cognitive radio networks [J]. Wireless Personal Communications,2013,72(1):283-298
- [14] 李君,叶兰兰,金宁,等.OFDMA 系统中容量最大化的资源分配算法[J].计算机工程,2014,40(6):49-52
LI Jun, YE Lanlan, JIN Ning, et al. Resource allocation algorithm for capacity maximization in OFDMA system [J].Computer Engineering,2014,40(6):49-52
- [15] 张亚梅,张国平.基于拉格朗日对偶的认知无线网络最优资源分配算法[J].现代电子技术,2016,39(19):6-10,15
ZHANG Yamei,ZHANG Guoping.Lagrange duality based optimal source allocation algorithm of cognitive radio network[J].Modern Electronics Technique,2016,39(19):6-10,15
- [16] Wang H,Liu A J,Pan X F, et al.Optimization of power allocation for multiusers in multi-spot-beam satellite communication systems[J].Mathematical Problems in Engineering,2014,2014:1-10

Resource allocation strategy for multi-beam satellite communication system under inter-beam interference

SI Chuang¹ LI Peng¹ SHI Chuansheng¹ GE Qiwei¹

¹ School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Multi-beam satellite communication system can provide mobile users with global communication services. However, the on-board resource utilization is low due to the limited resources as well as the long distance between satellites and the earth, and the resulted time delay in service transmission. To address this, we propose a new downlink resource allocation algorithm for a multi-beam satellite communication system with beam interference,

which is designed under two constraints of strict service delay and limited maximum interference power. Meanwhile, the influence of inter-beam interference on the system capacity is considered, and the Lagrange duality theory and sub-gradient descent method are used to obtain the optimal resource allocation strategy in order to maximize the service capacity of spot beam. The simulation results show that under the same noise power spectral density channel, the proposed algorithm meets the time delay requirement for each spot beam, has good fairness, improves the system in total transmission rate, and reduces the difference between the spot beam service demand and the allocated communication resources, therefore can provide maximized communication service to users; while under the condition of different noise power spectral densities, the proposed algorithm still maintains good fairness.

Key words satellite communication; multi-beam; beam interference; resource optimization; time delay; interference power