

基于相控阵的跳波束波位优化及资源分配算法

镐梦婷, 张 晨, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 跳波束技术能够为卫星通信系统提供足够的灵活性和较高的资源利用率, 在宽带卫星通信系统中展现良好的性能, 但现有的跳波束技术波位规划方案相对固定, 不能随业务需求特点的变化而变化, 对于用户需求分布不均且位置分散的情况, 跳波束技术的优势很难发挥。针对上述问题, 提出一种波位优化的方法, 利用相控阵天线的捷变特性, 根据业务分布特点调整波束的大小, 使得各个波束内的业务需求更加均衡。在此基础上, 从需求量与实际传输容量相匹配的角度, 建立最小化 n 阶差分目标函数, 利用凸优化算法求解各个波束内分配的时隙资源, 并对比波位优化前后系统的整体满意度及系统时延等性能参数。仿真分析结果表明, 相比传统的波位规划方案, 该算法能在提高系统整体满意度的同时降低系统时延, 提升用户的接入成功率。

关键词: 跳波束技术; 卫星通信; 波位优化; 相控阵天线

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022003

Beam Hopping Beam Optimization and Resource Allocation Algorithm Based on Phased Array

HAO Mengting, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin

College of Telecommunications&Information Engineering, Nanjing University
of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Beam hopping technology can provide enough flexibility and high resource utilization for satellite communication system, and shows good performance in broadband satellite communication system. However, the existing beam planning scheme of beam hopping technology is relatively fixed and can not change with the change of service demand characteristics. For the situation of uneven distribution of user demand and scattered location, the advantages of beam hopping technology are difficult to play. To solve the above problems, a beam optimization method was proposed, which used the agility characteristics of phased array antenna to adjusted the size of beam according to the characteristics of service distribution, so as to made the service demand in each beam more balanced. On this basis, from the perspective of matching the demand with the actual transmission capacity, the minimization n -order difference objective function was established, the time slot resources allocated in each beam were solved by convex optimization algorithm, and the overall satisfaction and system delay of the system before and after beam optimization were compared. The simulation results showed that compared with the traditional beam planning scheme, the algorithm could improved the overall satisfaction of the system, reduced the system delay and improved the access success rate of the users.

Keywords: beam hopping technology, satellite communication, beam optimization, phased array antenna

0 引言

随着卫星通信技术的不断发展, 空天地一体化已经成为卫星通信领域的发展趋势^[1]。由于卫星终端种类越来

越多, 业务需求量急剧上升, 因此星上的可用资源越发紧张, 卫星通信资源供需不平衡的问题日益突出。业务分布的时空不均性, 使得现有的资源配置方式可能造成

收稿日期: 2022-01-07; **修回日期:** 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61901230, No.U21A20450); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (No.BK20192002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No. 61901230, No.U21A20450), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province, Major Project(No.BK20192002)

各波束有“劳逸不均”“忙闲过度”的情况^[2]。因此,如何提高卫星网络的传输能力、灵活分配可用资源成为亟待解决的问题。

跳波束技术^[3]是在此基础上发展起来的一种能够灵活分配资源的技术。跳波束技术旨在利用较少的波束跳变来实现传统多波束系统的覆盖,从而提高系统的实际吞吐量和资源利用效率。它的基本思想是利用时间分片技术,在同一时刻并不是卫星上所有的波束都工作,而是只有其中的一部分波束工作^[4]。考虑多波束卫星系统各个覆盖区域内波束业务需求不同,业务种类不同,构建宽带多媒体卫星通信系统模型,从时域上对星上功率、带宽资源进行优化,将整段卫星带宽资源以时隙为单位分配给各个波束。这种新的思想,相比于传统的多波束卫星通信系统,更加能够满足业务需求不均衡的应用场景。但是现有的跳波束通信系统中,波束的形状、大小往往是相同的,并在通信区域内按照系统的规划对波束进行排布,根据用户的接入申请进行资源分配,由用户适应系统,而非系统适应用户需求。对于用户分布比较分散且严重不均的情况,就会存在部分用户可以接入、部分用户没有资源可以使用的情况^[5],很难发挥跳波束技术的优势,且同一通信区域内波束划分的个数越多系统时延也越大^[6]。

参考文献[5]根据业务需求量的动态变化调整波束的覆盖范围,从而实现星上资源的弹性调度,但该研究的具体资源分配算法还有待进一步完善。参考文献[7]通过扩大波束覆盖范围降低资源的浪费,但没有考虑在资源受限的情况下,业务需求量低的波束可能没有资源分配的情况。有学者提出通过使用不规则多波束来克服各波束间业务分布不均的情况^[8]。参考文献[9]提出非均匀带宽和非均匀波束大小的联合优化,以更好地匹配各波束的业务量需求,从而提高系统的资源利用率。但多波束的资源分配算法能否在跳波束技术中使用还有待进一步研究,且这种方式分配给每个波束的功率和频率资源仅是全部卫星资源的一部分,无疑会造成卫星资源的“碎片化”调度^[10],系统的实际吞吐量不高。

为了解决上述问题,本文提出一种波束优化资源分配算法。在卫星资源受限的情况下,针对业务分布不均、用户比较分散的情况,为了保证用户能够高效接入,利用相控阵天线能够灵活改变跳波束的指向、宽度和形状的特点^[11],根据业务分布特点调整波束大小。在用户分散时,采用大波位解决较大范围内用户的接入问题,改善少数用户无资源可用的情况。这样可根据用户需求灵活调度资源,尽可能优化资源的分配。相比于传统方法中设计相同大小的波束排列,由终端去适应系

统,本文算法可以通过多等级波束的弹性调度,提高系统用户的整体满意度。波束等级变化时,波束覆盖范围内的业务需求量和发射天线的增益会变化。如何在业务需求量和发射天线增益变化之间达到一种平衡,在提高用户整体满意度的同时尽可能地最大化系统的实际吞吐量,是本文研究的重点问题。本文算法能够用较少的波束覆盖有通信业务需求的区域,降低星上波束控制的复杂度和系统时延。在此基础上,从地面业务需求量与卫星波束容量相匹配的角度来设计资源分配算法,建立最小化 n 阶差分目标函数,利用凸优化求解各个波束应该分配的时隙资源;并假设业务场景,对比波束优化前后的用户整体满意度、系统时延及用户接入成功率,进一步验证该方法的可行性及有效性。

1 系统模型

1.1 跳波束前向链路模型

卫星通信系统中的前向链路,是指将信息由信关站发送至卫星再到地面用户的过程。现有的跳波束研究主要针对前向链路,因为大多数用户通信业务需求集中在前向链路^[12],且前向链路的资源管理集中在星上统一处理。因此本文的研究主要集中于考虑前向链路的下行段。前向链路的业务模型如图1所示。

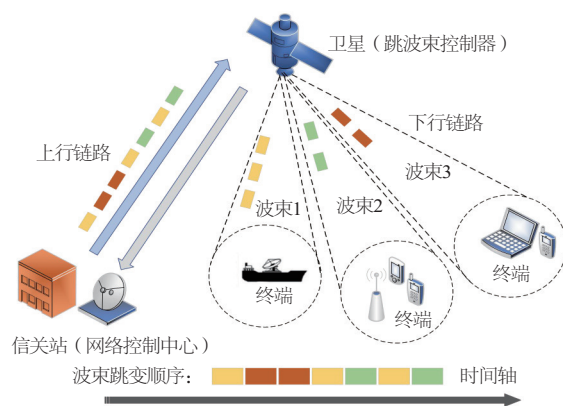


图1 前向链路业务模型

假设某区域由 K 个波束覆盖,在传统多波束系统中,所有的波束同时工作,但不是每个波束时刻都有业务请求,这在一定程度上造成资源的浪费。跳波束技术则是将资源通过不同的时隙分配给不同的波束,即任一时刻,该波束只能点亮一个波位。工作波束能够使用星上资源的全部带宽和功率,从而实现星上资源的池化。从图1可以看出,跳波束技术通过为每个波束分配不同的时隙数目,尽可能地满足各波束的业务需求。

为了更准确地描述卫星的性能指标,将具体参数设置如下:星上总带宽为 B_t ,卫星的总功率为 P_t ,每一跳变周期共有 W 个时隙,总波束数为 K ,波束 i 的信噪比为 $\text{SNR}_{i,c}$ 。一个跳变周期内波束 i 的实际吞吐量 T_i 为

$$T_i = \frac{B_t}{W} \sum_{j=1}^W F_{i,j} \log_2(1 + \text{SNR}_{i,j}) \quad (1)$$

其中, $F_{i,j}$ 表示波束 i 在时隙 j 中的工作状态,取值为0或1,当 $F_{i,j}=0$ 时表示第 i 个波束在时隙 j 中不处于工作状态, $F_{i,j}=1$ 表示第 i 个波束在时隙 j 中处于工作状态。 SNR_i 的关系式为

$$\text{SNR}_i = \frac{P_t G_T G_R}{L_{\text{free}} N_0} \quad (2)$$

G_T 为发射天线增益, G_R 为接收天线增益, L_{free} 为自由传输损耗, N_0 为噪声功率。

1.2 相控阵天线

相控阵天线通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位来改变方向图的形状。控制相位可以改变天线方向图最大值的指向,以达到波束扫描的目的。相控阵天线和传统多波束天线相比具有极大的优势,其主要特点是可以自由地对波束进行控制,能灵活改变跳波束的指向、宽度和形状^[13]。相控阵天线采用电子方法实现波束无惯性扫描,所以又被叫作电子扫描阵列,其波束方向可控、扫描灵活、天线增益更高。

相控阵天线在硬件结构上可以采用固定增益衰减器改变波束的大小,即每一个阵元连接一个固定增益衰减器,组成窗函数序列。首先确定波束生成的宽度以及中心角度,以线性调频序列作为权矢量,通过改变序列的参数调整波束宽度和中心角度;还可以通过增加或者减少子阵的方法控制波束的覆盖范围,设计加权向量的相位实现对波束指向的控制^[14]。相控阵天线增益^[15]如式(3)~式(5)所示

$$G_T(\theta) = G_{\max} \left(\frac{J_1(u(\theta))}{u(\theta)} + 36 \frac{J_3(u(\theta))}{(u(\theta))^3} \right)^2 \quad (3)$$

其中, θ 是离轴角, J_1 和 J_3 分别表示第一阶和第三阶贝塞尔函数。峰值增益 $G_{\max}$ 为

$$G_{\max} = \eta N^2 \pi^2 / \theta_{3\text{dB}}^2 \quad (4)$$

η 是天线效率,通常取0.6~0.7, N 是相控阵阵元个数, $\theta_{3\text{dB}}$ 指天线的波瓣宽度。

$$u(\theta) = \frac{2.071 \, 23 \sin \theta}{\sin \theta_{3\text{dB}}} \quad (5)$$

相控阵跳波束技术在系统资源有限的情况下,能够很好地解决业务需求容量小而地理位置相对分散的通信问题^[5]。宽带卫星通信接入系统中星上多波束相控阵载荷

产生的不同波束将覆盖不同的区域,不同区域内用户数量和用户的业务量需求存在时空差异性。相控阵天线可以通过捷变特性控制波束的指向和赋形,将多波束覆盖范围内的业务尽量均匀地分散到不同的波束中,充分发挥星上多波束相控阵载荷波束数量可控制、波束指向可变、波束能赋形的优势,提高宽带卫星系统的资源利用率。

2 波束优化及资源分配算法

2.1 波束优化

在卫星通信系统中,星上资源是非常有限的,尤其是面向大量的通信业务请求时,带宽功率等资源十分宝贵。如何合理高效地利用星上资源,从而最大化地满足用户的业务需求,是卫星通信领域研究的热点。为了让更多的用户接入网络,提高用户的整体满意度,本文算法对业务分布比较分散的波束进行波位优化;并基于相控阵天线的特性,根据业务量分布特点来改变波位的大小。如不做特殊说明,本文提到的波束和波位均为同一概念。

本文考虑将波束宽度划分为若干等级,等级越低,波束覆盖范围就越小,天线的定向性越好;由式(3)~式(5)可知,发射天线的增益就越高,反之,增益会越低。同一波位等级的天线增益相同,随着等级的增高,由于波束覆盖范围不同,增益也跟着发生变化。根据用户的业务接入申请信令选择最佳的波束宽度以满足通信需求,小波位对应的张角窄,信息传输速率比较高,空间抗干扰能力强;大波位对应的张角宽,信息传输速率比较低,空间抗干扰能力弱。波位优化的简化模型如图2所示。在用户相对集中时,采用较窄的波束不仅可以提高信息传输速率,还能有效地对抗空间干扰;在用户相对分散时,采用宽波束,可以让更多的用户接入^[5]。

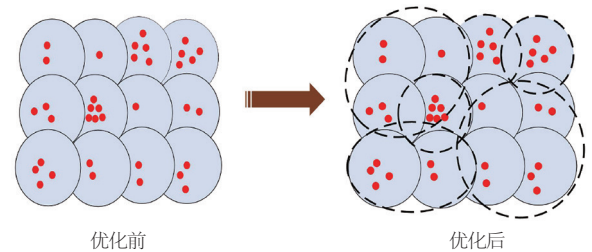


图2 波束优化的简化模型

从各波束之间业务量均衡的角度考虑,为了便于分析,波束初始宽度设计为大小相同的圆波束,波束优化步骤如下。

步骤一:首先确定业务需求量最低和最高的波束位

置及各自的业务需求量 $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 。

步骤二：从业务需求量最低的波束开始与邻近波束进行合并，用户业务需求量小且业务空间分布比较分散的位置放置较大等级的波束。

步骤三：波束等级变大，该波束内的业务需求量增加，但发射天线的增益会随之减小。由香农公式可知，发射天线增益与系统容量呈对数关系。为了使该波束内业务需求量的增加和天线增益的减小趋于平衡，建立目标函数为

$$\begin{aligned} \min & |R_a \log_2 G_{Tc} - R_{\max} \log_2 G_{T1}| \\ \text{s.t. } & c \leq M \end{aligned} \quad (6)$$

其中， R_a 指优化后各波束的业务需求量，即波束优化后对应波束用户的业务需求速率之和。 G_{Tc} 指优化后的发射天线增益为第 c 等级增益， c 的取值为 $1 \sim M$ ， M 是波束宽度最大等级。初始波束宽度为第一等级，对应的天线发射增益记为 G_{T1} 。考虑到如果发射天线增益总体降低会使得系统总容量减少，为了在整体满意度的升高和系统总容量的减少之间达到一种平衡，本文将优化前波束业务需求量最大值作为衡量标准，对业务需求最高的波束不再进行波束优化。

步骤四：已经优化的波束不再重复考虑，从剩余波束取出业务需求最低的波束再次进行优化，直到所有波束优化完毕，输出各波束的各项参数。

具体算法描述如下。

输入：输入各个波束的业务需求量 R ， M 个波束等级，初始各波束等级设置为1，即 $c=1$ 。

输出：输出优化后的各个波束的业务需求量 R_a 及各自的波束等级 c 。

波束优化的伪代码算法如下。

初始化参数：

1. R ：各波束的业务需求量

2. M ：波束宽度等级

3. G_T ：天线发射增益

迭代过程：

4.//找出可未优化波束中业务需求量的最小值 $R_{\min}$ 、最大值 $R_{\max}$ 以及 $R_{\min}$ 波束对应的位置 (a,b)

5.//从 (a,b) 开始，该位置放置的波束宽度等级递增

6.循环 $c=1:M$

$s(c)$ =此时该等级各个波束的业务需求量之和；

$s_{\text{dif}}(c) = |s(c) \log_2 (G_{Tc} - R_{\max} \log_2 (G_{T1}))|$ ；

$c=c+1$ ；

循环结束

7.//比较上述 M 种情况，选出最合适的波束等级

$$R_{\text{dif}} = \min(s_{\text{dif}})$$

R_a 等于使 s_{dif} 最小时的该等级所有波束的业务需求量之和；

c 为使 s_{dif} 最小时的等级；

8.已经优化的波束不再考虑，输出优化后的各个波束参数，计算出其对应的业务需求量 R_a 及优化后各波束的等级 c 。

2.2 资源分配算法

根据系统的业务申请接入需求可以建立多种目标函数，以更好地解决业务分布的时空不均性并满足用户需求的轻重缓急。参考文献[16]根据分配算法的目标函数以及是否需要考虑共信道干扰（Co-channel Interference, CCI），对现有的资源分配算法进行整理。当考虑CCI时，优化问题通常是NP-hard问题。当不考虑CCI时，则该问题为一般的凸优化问题。当同一时隙被点亮，波束间距离大于4倍的波束半径时，干扰对于信号质量的影响可以忽略^[17]。本文主要从实现业务需求容量与卫星系统所能提供容量相匹配的角度考虑，建立最小化 n 阶差分目标函数。假设簇内只有一个波束在同一时隙点亮的场景，不考虑CCI的影响，如式(7)所示^[18]

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^K |R_i - T_i|^n \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^K N_i \leq N_{\max} W \end{aligned} \quad (7)$$

此时各波束的容量分配 T_i 为

$$T_i = \frac{N_i}{W} B_i \log_2(1 + \text{SNR}_i) \quad (8)$$

其中

$$N_i = \sum_{j=1}^W F_{i,j} \quad (9)$$

N_i 为一个跳波束周期内各波束的时隙分配个数，引入约束变量 λ ，则其拉格朗日函数为

$$L(N_i, \lambda) = \sum_{i=1}^K |T_i - R_i|^n + \lambda (\sum_{i=1}^K N_i - N_{\max} W) \quad (10)$$

解得 n 阶差分目标函数时隙分配的闭式解为

$$N_i = \frac{R_i W}{B_i \log_2(1 + \text{SNR}_i)} - \frac{\sum_{j=1}^K \frac{R_j W}{B_j \log_2(1 + \text{SNR}_j)} - N_{\max} W}{\sum_{j=1}^K \left(\frac{\log_2(1 + \text{SNR}_j)}{\log_2(1 + \text{SNR}_i)} \right)^{\frac{n}{n-1}}} \quad (11)$$

对上面优化目标函数进行凸优化求解之后，可得各波束的时隙分配个数 N_i ； $N_{\max}$ 为同一时隙内同时工作的最大波束个数，本文 $N_{\max}$ 设为1， R_i 为各波束的业务需求量。

由于本文采用全频带复用的方式,所以波束可用带宽是星上整个带宽资源 B_i 。优化后各波束的信噪比 SNR_i 为

$$\text{SNR}_i = P_i + G_T^i + G_R - L_{\text{free}} - N_0 \quad (12)$$

由1.2小节可知,不同的波束宽度对应的天线增益不同,因此各个波束的信噪比也不尽相同, G_T^i 为优化后第 i 个波束的发射天线增益。

3 系统性能衡量参数

3.1 系统整体满意度

系统整体满意度是一个重要的性能评价指标,用来对比优化前后的系统性能是否有所提升。业务满意度 ρ 指实际分配的业务量与业务需求量的比值,系统的整体满意度 ρ_{tot} 为各波束业务满意度的平均值,具体见式(13)~式(14)

$$\rho = \frac{\min(T_i, R_i)}{R_i} \quad (13)$$

$$\rho_{\text{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^K \rho_i}{K} \quad (14)$$

3.2 系统时延

另一个重要的性能评价指标是系统时延。任何数据通信网络中,数据包都会由于传播时延、缓存和排队而产生系统时延^[19],高轨卫星跳波束通信系统也不例外。传播时延取决于星地间链路距离,高低轨卫星由于轨道高度的不同,对地通信传播时延的差异比较大,排队时延是唯一可控的时延。由于物理条件的限制,波束跳变速度远小于数据包的到达速度^[20],数据包到达星上转发器之后不能及时将数据包分配给各波束的用户。本文仿真分析中,将排队时延等同于系统时延。由参考文献[6]可知整个系统的平均排队时延为

$$Q = \frac{t}{2N_{\text{max}}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^K C_i \sum_{j=1}^K A_j}{\sum_{k=1}^K A_k} \quad (15)$$

其中, t 为一个时隙长度表示最小的时间单元,由香农公式可知第 i 个波束的通信容量 C_i 为

$$C_i = B_i \log_2(1 + \text{SNR}_i) \quad (16)$$

第 i 个波束的数据包平均到达速率记作 A_i , L_p 记作数据包长度, $[0, T_s]$ 表示一个跳波束周期时间长度,由前文可知, R_i 为第 i 个波束的业务需求量,由此可得

$$A_i L_p T_s = R_i \quad (17)$$

3.3 用户接入成功率

用户接入成功率是指覆盖区域内用户成功接入的个数 U_s 与用户总数 U_t 的比值,如式(18)所示

$$Z = U_s / U_t \quad (18)$$

4 仿真及结果分析

假设该通信区域内共有21个波束,为了便于分析问题,优化前波束图排布如图3所示。在该设计中跳波束的初始形状、大小是相同的,但各个波束的业务需求量分布的不均衡。优化前各波束的业务需求量如图4所示。

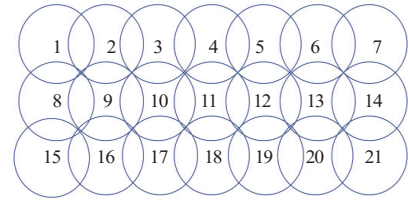


图3 优化前的波束图排布

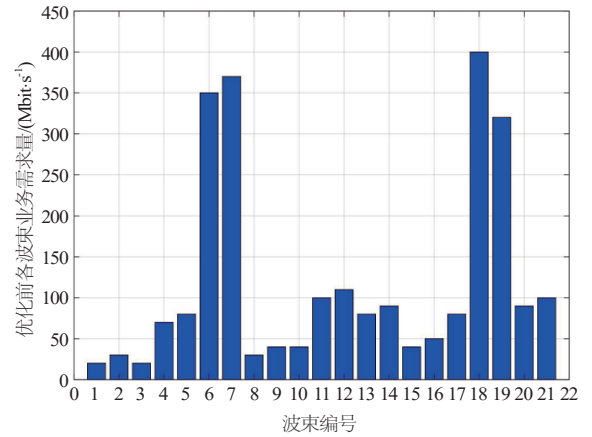


图4 优化前各波束的业务需求量

由图4业务需求量柱状图可知波束1、2、3、8、9等业务需求量比较低,波束6、7、18等业务需求量比较高,业务分布极不均衡,用户比较分散。根据第2.1小节提出的对波束的等级划分方法,对业务需求量低的波束进行优化。根据用户的业务接入申请信令选择最佳匹配波束等级以满足通信需求。本文把波束宽度划分成3个等级,初始等级为1个波束,第二等级为相邻的4个波束,第三等级为相邻的9个波束。从业务需求量最低的波束开始进行优化,确定优化后各波束的等级。优化后的波束图及优化后各波束的业务需求量如图5和图6所示。

由波束优化算法进行波束优化后,波束个数由原来的21个变为7个。该通信区域内波束个数减少二分之一,各个波束的业务需求量发生极大的变化,各波束的业务

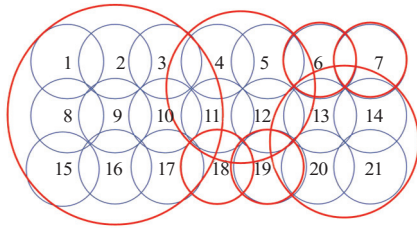


图5 优化后的波束图

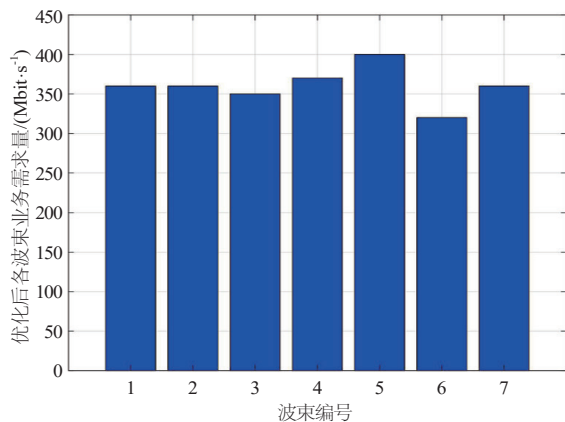


图6 优化后各波束的业务需求量

需求量变得更加均衡。由2.2小节仿真可得优化前后各个波束业务提供量。系统主要仿真参数见表1。

表1 系统主要仿真参数

参数	符号	数值
优化前总波束数目	K	21
原波束覆盖半径	r	100 km
原半功率角度	θ_{3dB}	0.32°
优化后各等级波束覆盖半径	r	[100, 200, 250] km
优化后各等级半功率角度	θ_{3dB}	[0.32° , 0.64° , 0.80°]
总带宽	B_t	240 MHz
总功率	P_t	100 W
时间窗口长度	W	128
单个业务时隙	t	90 ms
仿真时间	T_s	115 s
卫星轨道高度	H	35 786 km
自由空间损耗	L_{fsc}	212 dB
原天线传输增益	G_T	54 dB
优化后各等级的天线传输增益	G'_T	[54, 48, 46] dB
接收天线增益	G_R	40 dB

由2.2小节可计算出在 $[0, T_s]$ 内优化前后各个波束的系统吞吐量，具体如图7和图8所示。

系统实际吞吐量指的是在卫星资源受限的场景下，

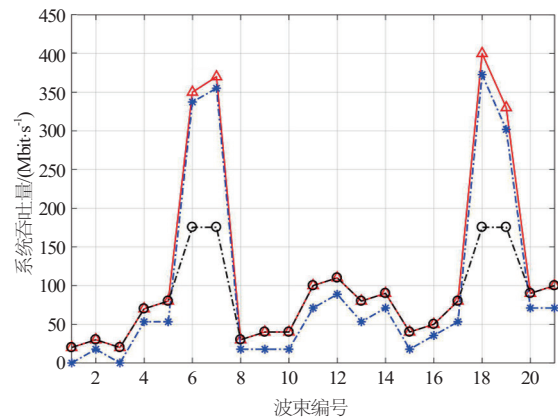


图7 优化前系统吞吐量

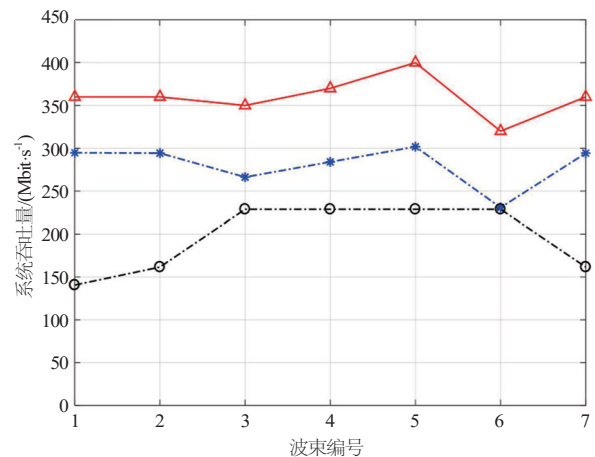


图8 优化后系统吞吐量

各波束实际分配的容量和请求容量之间的最小值。从图7~图8中可以看出， n 阶差分目标函数优化前后的系统实际吞吐量均要高于传统的多波束均分资源分配方法。因为在传统多波束均分方案中，资源分配算法缺乏足够的灵活性，使得供需不平衡，造成通信资源的巨大浪费。采用跳波束技术，波束优化前后的系统实际吞吐量分别为2 050 Mbit/s和1 980 Mbit/s，优化后由于波束的展宽导致发射天线增益降低，使系统实际吞吐量稍有下降。波束优化前业务需求量较小的区域没有时隙资源分配，导致用户没有资源可以接入，降低用户的整体满意度。优化后各个波束之间的负载更加均衡，各波束之间不会出现分布极度不均的情况，虽然系统实际吞吐量略有降低，但各个波束均有资源可以接入。波束优化前后各波束业务满意度如图9和图10所示。

波束优化前系统整体满意度为64%，整体满意度较

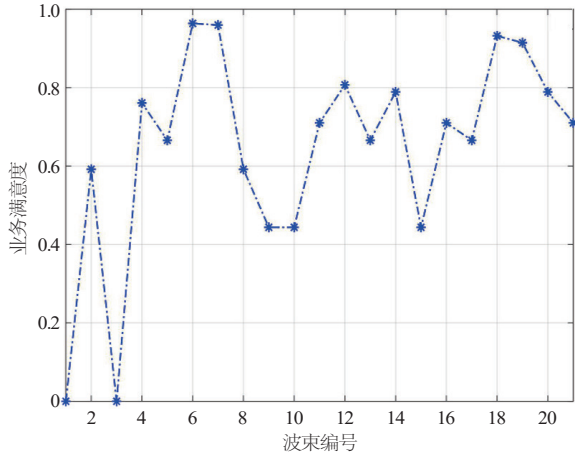


图9 波束优化前各波束业务满意度

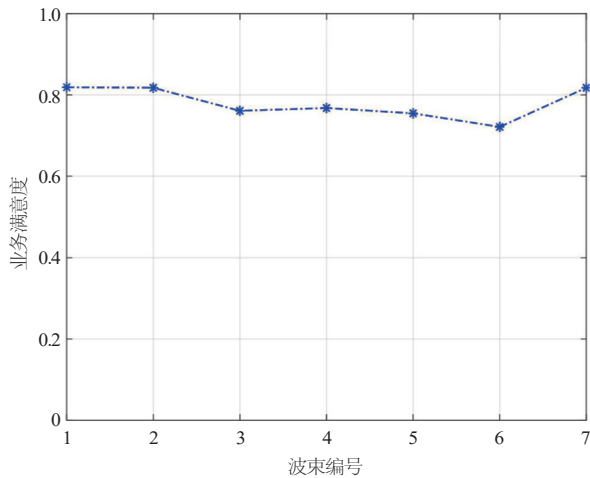


图10 波束优化后各波束业务满意度

低；波束优化后系统整体满意度为78%，整体满意度相比优化前提高14%。

数据包的长度 L_p 假设为10 bit，将式(16)和式(17)联立可解得优化前后的系统时延，优化前的系统时延为945 ms，优化后的系统时延为315 ms，优化后比优化前缩短了200%。由仿真结果可知波束个数越少，系统时延性能越好，优化后系统时延性能有了极大的改善。

从用户终端角度考虑，本文根据载波信息速率不同分为3种类型的用户，所需的载波信息速率分别为10 Mbit/s、5 Mbit/s、2 Mbit/s。各波位用户载波速率之和等于前文提到的各波位的业务需求量。按照最大最小公平性准则对各个用户进行资源分配，其基本思想是在每次进行资源分配时，不考虑各个用户的需求速率。首先将资源均匀地分配给每一个用户，将所有的用户平等地看待，在首次分配之

后，如果有某个用户分配到的资源多于自身的需求，则将多于需求的资源再次在那些没有满足需求用户之间重新分配一次，直到资源被全部分配完为止。资源需求较少的用户能够得到满足，资源需求多的用户被分配到的资源可能不能满足用户最小接入速率，也就无法成功接入系统。不同用户的QoS需求不同，定义最小接入速率 $v_{\min}$ 如式(19)所示^[21]

$$v_{\min}^i = \frac{1}{e^{\left(0.6 + \frac{0.5}{q_i}\right)}} \times v_i \quad (19)$$

其中， q_i 为各类型用户的QoS需求，针对3种类型的用户，本文假设用户的QoS有3级[1,2,3]，各用户QoS需求随机生成，QoS越大的用户它的最小接入速率也就越大。由式(19)可计算各类型用户的最小接入速率，用户分配的资源达到最小接入速率即视为用户接入成功。波束优化前后用户成功接入个数如图11和图12所示。

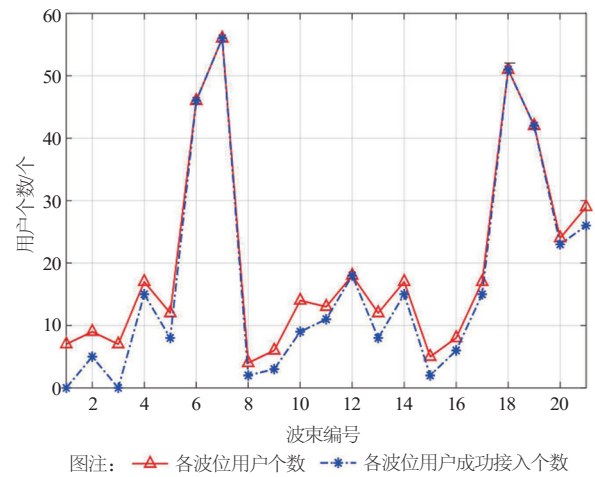


图11 优化前各波束用户成功接入个数

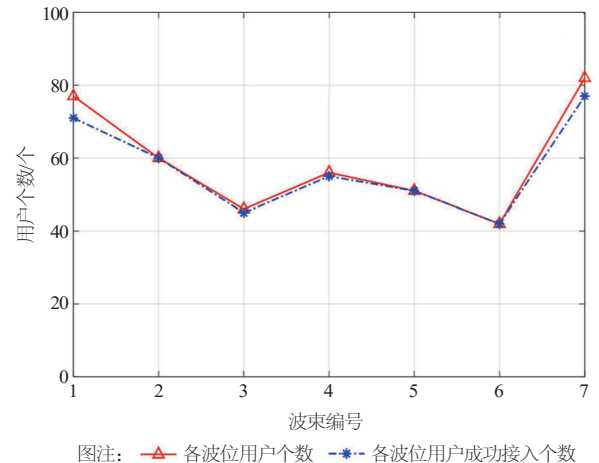


图12 优化后各波束用户成功接入个数

总用户个数为414个, 优化前用户接入成功个数为361个, 由式(18)计算可知, 接入成功率为87%; 优化后用户接入成功个数为403个, 接入成功率为97.3%, 相比波束优化前用户接入成功率提高10.3%。

5 结束语

随着相控阵天线技术的进一步发展及波束赋形特性在卫星中的广泛应用, 下一步将研究多个波束同时工作的波束全局跳变。这其中会涉及共信道干扰问题, 如何在做到干扰避免的同时, 提高用户的整体满意度, 使系统能够适应更加灵活多变的场景, 以得到更高效的资源利用率, 是接下来需要重点攻克的难题。

参考文献：

- [1] 张馨月. 卫星通信系统跨层资源管理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG X Y. Research on resource management of cross-layer design technology over satellite system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [2] 赵凌开. 低轨卫星网络基于跳波束的资源分配算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
ZHAO L K. Resource allocation algorithm based on beam hopping for Leo satellite system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [3] ANGELETTI P, PRIM D F, RINALDO R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston: AIAA, 2006.
- [4] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.
SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of GEO and LEO broadband satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 505-510.
- [5] 毋丹芳, 何婧, 李加洪, 等. 一种面向跳波束的波位资源弹性调度系统及调度方法: CN107949066A[P]. 2018-04-20.
WU D F, HE J, LI J H, et al. Elastic beam position resource scheduling system and scheduling method for jump beams: CN107949066A[P]. 2018-04-20.
- [6] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 57578-57588.
- [7] ZHANG T, ZHANG L X, SHI D Y. Resource allocation in beam hopping communication system[C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [8] ANGELETTI P, LIZARRAGA C J. Traffic balancing multibeam antennas for communication satellites[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(12): 8291-8303.
- [9] EVANS B G, THOMPSON P T, KYRGAZOS A. Irregular beam sizes and non-uniform bandwidth allocation in HTS[C]//Proceedings of 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston: AIAA, 2013.
- [10] 赵旭东, 张晨, 张更新. 宽带卫星通信系统的跳波束技术综述[C]//第十五届卫星通信学术年会. [S.l.:s.n.], 2019.
ZHAO X D, ZHANG C, ZHANG G X. Overview of beam hopping technology in broadband satellite communication system[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference on Satellite Communications. [S.l.:s.n.], 2019.
- [11] 周成英, 李睿, 张楷, 等. 基于FPGA的相控阵天线波束控制器设计[J]. 空间电子技术, 2021, 18(3): 31-35.
ZHOU C Y, LI R, ZHANG L, et al. Design of beam controller in phased array antenna based on FPGA[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(3): 31-35.
- [12] ALBERTI X, CEBRIAN J M, DEL BIANCO A, et al. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multimedia satellite systems[C]//Proceedings of 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 226-233.
- [13] 唐文杰. 一种相控阵天线的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
TANG W J. Research and design on a phased array antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [14] 张更新, 王运峰, 丁晓进, 等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 1-14.
ZHANG G X, WANG Y F, DING X J, et al. Research on several key technologies of satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.
- [15] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Cognitive beamhopping for spectral coexistence of multibeam satellites[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2015, 33(1): 69-91.
- [16] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 21-26.
TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation for beam-hopping satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 21-26.

- [17] 王亚昕, 边东明, 胡婧, 等. 基于分簇的全带宽跳波束图案优化方法[J]. 计算机工程, 2020, 46(4): 169-176.
WANG Y X, BIAN D M, HU J, et al. Optimization method for full bandwidth beam hopping pattern based on clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4): 169-176.
- [18] LEI J, VÁZQUEZ-CASTRO M Á. Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(5): 472-480.
- [19] 刘婉莹, 夏师懿, 姜泉江, 等. 低轨卫星网络基于跳波束的资源调度算法[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 805-813.
LIU W Y, XIA S Y, JIANG Q J, et al. Resource scheduling algorithm based on beam hopping in LEO satellite network[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6): 805-813.
- [20] HAN H, ZHENG X Q, HUANG Q F, et al. QoS-equilibrium slot allocation for beam hopping in broadband satellite communication systems[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8): 2617-2630.
- [21] 毛腾跃. 双层IP卫星网络QoS保障研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.

MAO T Y. Research on QoS guarantee for IP double-layered satellite networks[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.

[作者简介]



高梦婷 (1997-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。



张晨 (1985-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院讲师, 主要研究方向卫星通信、天地一体化信息网络。



张更新 (1967-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。