

文章编号: 2095-4980(2024)08-0851-08

跳波束波位优化与干扰避免的跳变图案设计

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: 跳波束技术利用时间切片的方式提高了通信系统的资源利用率, 但现有的跳波束波位相对固定, 不能随业务需求的变化而变化; 且跳变波束服务的波束越多, 系统排队时延越大; 当多个波束同时工作时, 同频干扰也不容忽视。对此, 本文在波位优化的基础上, 进一步提出一种将时隙分配与跳波束图案设计联合优化的资源分配算法。以最大化系统吞吐量为目标, 首先利用相控阵天线可波束赋形的特点, 根据业务需求, 配置合适大小的波位; 其次利用遗传算法对跳波束图案进行设计, 从而避免共信道干扰。对比联合优化前后系统性能参数, 结果表明, 该方法能够提高系统吞吐量和业务满意度, 降低系统排队时延。

关键词: 跳波束技术; 波位优化; 跳波束图案设计; 相控阵天线; 遗传算法; 共信道干扰

中图分类号: TN927+.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022236

Beam position optimization and interference avoidance hop pattern design for beam hopping

HAO Mengting, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: Beam hopping technology improves the resource utilization of the communication system by means of time slicing. However, the existing beam positions are relatively fixed and cannot change with the change of service requirements, and the more beams the beam hopping serves, the greater the queuing delay of the system. When multiple beams work at the same time, the same frequency interference can not be ignored. To solve the above problems, on the basis of beam position optimization, this paper further proposes a resource allocation algorithm that jointly optimizes the slot allocation and the hop beam pattern design. In order to maximize the system throughput, firstly, the phased array antenna can be beam shaped, and the appropriate size of beam position is configured according to the service requirements. Secondly, genetic algorithm is employed to design the hop pattern to avoid co-channel interference. By comparing the system performance parameters before and after the joint optimization, the simulation results show that the method can improve the system throughput and traffic satisfaction, and reduce the system queuing delay.

Keywords: beam hopping technology; beam position optimization; beam hopping pattern design; phased array antenna; genetic algorithm; co-channel interference

卫星通信系统具有覆盖范围广^[1], 建设成本与距离无关的特点, 受到了越来越多研究人员的青睐。随着卫星通信技术的迅速发展, 人们对卫星通信服务质量的要求也越来越高。由于覆盖区域内的业务需求呈现显著的时空不均性, 传统多波束通信系统会导致系统吞吐量较低, 且固定的资源分配方式缺乏足够的灵活性^[2], 各波束分配的资源难以满足各个波束的实际需求量。为提升多波束卫星通信系统的资源利用率及系统吞吐量, 跳波束技术随之被提出^[3]。该技术增加了系统在空间维度上资源分配的灵活性, 可利用较少的跳变波束覆盖更多的波位^[4], 通过调整波束在不同波位的驻留时间, 提供与业务需求相匹配的通信资源^[5-6]。

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2902600); 国家自然科学基金资助项目(61901230; U21A20450)

跳波束技术的研究最早出现在美国航空航天局的 ACTS(Advanced Communication Technology Satellite)项目^[7], 通过使用开关对天线馈源进行切换, 实现了波束跳变, 从此跳波束技术走进了人们的视野。文献[3]结合跳波束与自适应调制编码技术, 以系统容量最大化为目标, 利用遗传算法设计了一种波束跳变方法, 评估了跳波束技术在业务分布不均匀情况下的应用优势。文献[8]除了时隙分配外, 还分别采用二分法和迭代算法对功率和频谱资源进行了优化分配。文献[9-10]分别建立了最小化同频干扰和最大化信干噪比的跳波束资源分配目标函数, 并对跳波束图案做了初步设计。跳波束通过时分片技术满足了用户的时空分布不均的需求, 提高了星上资源的利用率, 但目前跳波束技术在卫星通信中的应用还面临许多挑战: 一方面, 跳波束技术可以通过改变驻留时间满足各个波位的业务需求, 但波束的形状、大小往往是固定的, 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, 针对业务需求动态变化的情况, 系统的灵活性不高。文献[11]提出可以扩大波位让更多的用户接入, 但系统吞吐量会有所降低, 且该研究的具体的资源分配算法还有待进一步完善; 另一方面, 跳波束技术旨在利用较少的跳变波束覆盖更多的波位, 如果跳变波束服务的波位过多, 系统排队时延也会增加。此外, 现有的资源分配算法通常分为两步, 首先对各个波位进行时隙个数分配, 而后再进行跳波束图案设计。这种分离的两步设计会导致资源分配的复杂度增加, 不适合业务量动态变化较快的场景。

针对上述问题, 本文在前期研究的基础上^[12], 完善波位优化策略, 并进一步提出了时隙分配与跳波束图案设计联合优化资源分配算法。首先根据相控阵天线可动态赋形的特点^[13], 将波位大小划分等级, 根据业务需求调整波位大小: 在用户需求量降低时, 采用大波位解决用户的接入问题, 相同的通信区域可以减少波束个数, 降低星上载荷的负担; 在用户业务需求量增加时, 配置较小的波束, 提高接入速率。其次, 在波位优化的基础上考虑同频干扰, 利用遗传算法进行时隙分配与图案设计。由于波位等级不同, 天线发射增益不同, 天线增益和干扰又是相耦合的, 即同时点亮的波位不同, 干扰也不同。仿真结果表明, 该方法提升了系统实际吞吐量和业务满意度, 并降低了系统排队时延及系统管理的复杂度。

1 系统模型

1.1 跳波束系统模型

卫星跳波束系统主要由网络控制中心、信关站、卫星和终端等组成^[2], 如图1所示。数据流从信关站沿着上行链路发送给卫星, 然后通过卫星跳波束控制器沿着下行链路将数据流切换到不同波束下, 用户最终接入卫星通信系统。

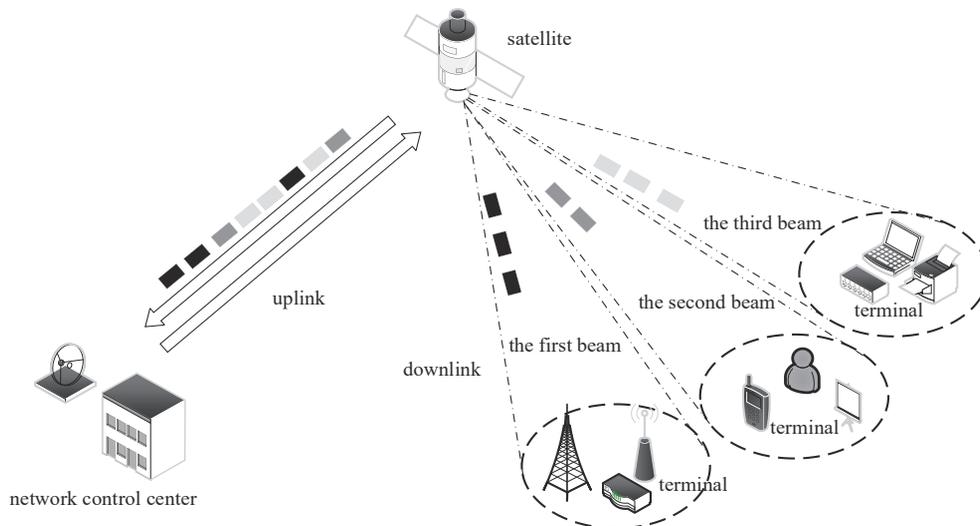


Fig.1 Composition of beam hopping system
图1 跳波束系统组成

网络控制中心根据各波束用户的业务量需求进行时隙资源分配, 生成跳波束时间计划表(Beam Hopping Time Plan, BHTP), 卫星的波束切换依据 BHTP 进行。信关站主要提供与地面网络的接口, 通过各种标准或专用的接口设备, 提供与电话网、互联网等的接入, 为地面网络运营商提供接入平台。跳波束控制器通过解调跳波束控制指令, 实现卫星上波束的同步跳变。终端根据跳波束时间计划表, 在规定时隙内接收请求的业务数据。

跳波束技术采用时分片的方式, 将星上的功率、带宽等资源池化, 各波束可利用星上的全部带宽资源,

根据各波束内用户的业务需求，通过改变跳波束在每个波位的驻留时间动态调整资源分配。相比于传统的碎片化多波束的资源分配方式，跳波束技术提高了系统的资源利用率和系统吞吐量。跳波束系统的下行链路中时隙最小分配单元记为 t ，即分配给一个波束的最小持续时间。根据各波束的业务量需求，决定分配给各波束相应的时隙个数，如图 2 所示。

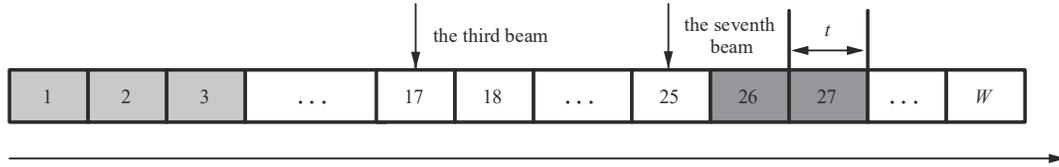


Fig.2 Schematic diagram of beam hopping time slot allocation

图2 跳波束时隙分配示意图

1.2 相控阵天线技术

随着天线技术的发展，相控阵天线由于波束数量可控制、波束指向可变、波束能赋形的特点脱颖而出。相控阵天线通过多端口放大器(Multiport Amplifier, MPA)联合波束成形网络实现波束切换^[14]，使波束资源分配更加灵活。波瓣宽度是定向天线常用的一个重要指标^[15]，波瓣宽度越窄，方向性越好，天线增益越大，空间波束形成可获得的峰值增益就越大。天线增益计算公式^[16]为：

$$G_T(\theta_0) = G_{\max} \left| \frac{J_1[u(\theta_0)]}{u(\theta_0)} + 36 \times \frac{J_3[u(\theta_0)]}{u(\theta_0)^3} \right|^2 \quad (1)$$

式中： J_1 和 J_3 分别为第一阶和第三阶贝塞尔函数； θ_0 为离轴角；峰值增益 G_{\max} 为：

$$G_{\max} = \eta N^2 \pi^2 / \theta_{BW}^2 \quad (2)$$

式中： θ_{BW} 为相控阵半功率波瓣宽度，本文采用弧度制计算； η 为天线效率，通常取0.6~0.7； N 为相控阵阵元个数，取65。

$u(\theta_0)$ ^[16]为：

$$u(\theta_0) = \frac{2.07123 \sin \theta_0}{\sin \theta_{BW}} \quad (3)$$

1.3 信道容量模型

为更准确地描述卫星的性能指标，具体的参数设置为：星上总带宽为 B_t ，卫星总功率为 P ，每一跳变周期共有 W 个时隙，每个波束分得的时隙个数为 n_i ，总波束个数为 K ，波束 i 的信干噪比为 $R_{SIN,i}$ ，一个跳变周期内波束 i 的实际吞吐量 T_i 为：

$$\begin{cases} T_i = \frac{n_i}{W} B_t \log_2(1 + R_{SIN,i}) \\ R_{SIN,i} = \frac{PG_T G_R}{N_0 + I_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中： G_T 为天线发射增益； G_R 为天线接收增益； N_0 为噪声功率； I_i 为对波束 i 的干扰。

1.4 波束间干扰分析

实际通信系统中同时点亮的波束不止一个，此时不可避免会产生共信道干扰。共信道干扰 I 产生是由于天线辐射方向图的旁瓣效应，如图3所示。

设干扰源波束为 b ，被干扰波位为 a ，星下直射点为 o ，干扰值主要与信号入射方向以及波束中心指向夹角 θ_{ab} 有关，波束间的干扰^[17]为：

$$I = \sum_{b \neq a} \frac{[PG_{T,b}G_T(\theta_{ab})]}{(4\pi d_{ab}/\lambda)L(\theta_{ab})} \quad (5)$$

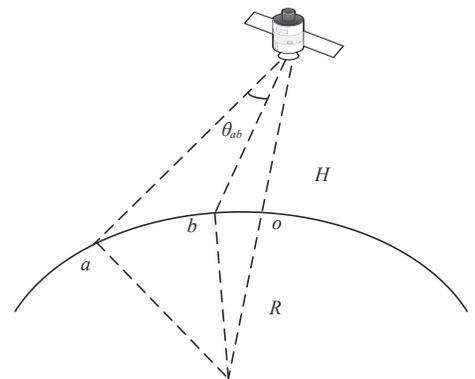


Fig.3 Schematic diagram of inter beam interference

图3 波束间干扰示意图

式中： $G_{T,b}$ 为卫星到波束 b 中心点的天线增益； d_{ab} 为波位 a 、 b 中心点之间的距离； λ 为信号波长； $L(\theta_{ab})$ 为卫星受到干扰波位 a 中心点的信道衰落； $G_T(\theta_{ab})$ 为覆盖波位 b 的波束对于波位 a 中心点的天线增益，可由式(6)计算得出：

$$\theta_{ab} = \arccos \frac{2H^2 + 2R(R+H) \left[2 - \cos\left(\frac{d_{ao} - d_{ab}}{R}\right) - \cos\left(\frac{d_{ao}}{R}\right) \right] - d_{ab}^2}{2 \sqrt{\left\{ H^2 + 2R(R+H) \left[1 - \cos\left(\frac{d_{ao} - d_{ab}}{R}\right) \right] \right\} \left\{ H^2 + 2R(R+H) \left[1 - \cos\left(\frac{d_{ao}}{R}\right) \right] \right\}}} \quad (6)$$

式中： H 为卫星轨道高度； R 为地球半径； d_{ao} 为被干扰波位 a 与星下直射点 o 之间的距离。

由式(5)~(6)可知，干扰值主要与干扰源波束的天线发射增益 $G_{T,b}$ 及干扰波束间的夹角 θ_{ab} 有关。当有多个跳变波束同时工作时，同频干扰不可避免，会极大影响系统容量。基于门限的干扰避免是指当波束间距离大于 4 倍的波束半径时，信干噪比与信噪比大致相等，即干扰功率比噪声功率小，干扰对于信号质量的影响可以忽略^[17]。但对于弹性波位，波束半径不固定，因此不能按照大于 4 倍的波束半径的方法来避免波束间干扰。

2 弹性波位优化

卫星通信系统中，星上资源非常宝贵。为提升系统容量及系统的灵活性，当各波束业务需求量发生变化时，考虑由系统适应用户的需求：业务需求量增加的波位则缩小波瓣宽度；业务需求量减少的波位则配置波瓣宽度较大的波束，从而在提高系统容量的同时，降低系统排队时延及复杂度。虽然全部配置最小波束可以最大提升系统的吞吐量，但星上设备成本也会过大，且单个跳变波束服务的波位过多，系统排队时延也会过大。基于相控阵天线的特点，本文根据业务量分布的特点配置合适的波束大小。

本文将波束大小划分为若干等级，等级越低，波束覆盖范围越小，天线的指向性越好，增益越高；反之，天线的增益越低。随着等级的变化，天线增益也随之发生变化，波位优化时可根据需要选择合适等级的波位。首先假设该波束的大小为中间等级，当该波位业务需求量增加时，配置较小等级的波束；当业务需求量减少时，配置较大等级的波束。衡量指标为该波束内的业务需求量与波束的能力是否匹配，如式(7)~(8)所示。

$$F = \frac{R_b}{\frac{1}{K} B_t \log_2 \left(1 + \frac{P G_{T,b} G_R}{N_0} \right)} \quad (7)$$

$$L = \frac{R_{b1}}{\frac{1}{K} B_t \log_2 \left(1 + \frac{P G_{T,b1} G_R}{N_0} \right)} \quad (8)$$

式中： R_b 为波束等级未改变时，该波位内的原始业务需求量； R_{b1} 为波束等级发生改变后，该波位内的业务需求量； $G_{T,b1}$ 为对应的天线发射增益； K 为通信覆盖区域内的波束个数。式(7)表示某波位业务需求量发生变化，波束等级未变化时系统的匹配能力，式(8)表示某波位业务需求量发生变化，波束等级也发生变化时系统的匹配能力。比较式(7)与式(8)的数值大小，更接近 1 的，说明该系统的匹配能力更优，因此选择该波束等级。

流程图如图 4 所示。 F 、 L 均要大于 1，因为资源是有限的，卫星载荷的能力要小于业务需求量。

3 基于时隙分配与图案设计联合优化

文献[12]中以 n 阶差分为目标函数，利用凸优化求解各个波束内分配的时隙资源，未考虑共信道干扰影响。

本文在考虑共信道干扰的同时，考虑到波束动态赋形对系统容量产生的影响，以最小化差分容量为目标建立跳波束时隙资源分配模型，求解动态波束赋形下跳波束时隙资源分配。

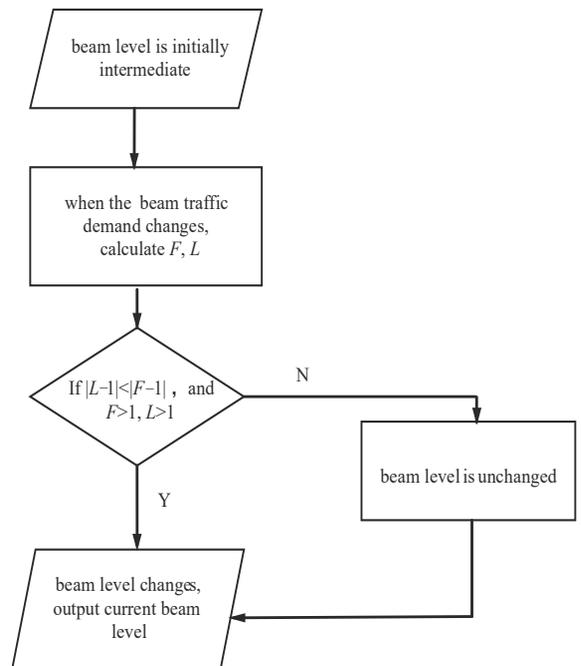


Fig.4 Flow chart of elastic beam optimization
图4 弹性波位优化流程图

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^K (T_i - R_i)^2 \\ \text{s.t. } T_i \leq R_i, \forall i \end{cases} \quad (9)$$

跳波束卫星资源优化主要是实现需求容量与卫星系统所能提供的容量相匹配，式(4)为波束 i 提供的容量。当星上带宽固定时，各波束的业务提供量与信干噪比有关，不同波束等级的天线发射增益及波束间干扰值不同，因而信干噪比也不相同。第 i 个波束的发射增益为 $G_{T,i}$ ，则 $R_{\text{SIN},i}$ 计算为：

$$R_{\text{SIN},i} = \frac{PG_{T,i}G_R}{N_0 + I_i} \quad (10)$$

$$I_i = \frac{\sum_{j \neq i} [PG_{T,i}G_T(\theta_{ji})]}{(4\pi d_{ji}^2/\lambda)L(\theta_{ji})} \quad (11)$$

由前文分析可知，目标函数受各波束的发射增益 $G_{T,i}$ 影响。由于各波束等级不同，天线的发射增益 $G_{T,i}$ 也不同，由式(11)可知，干扰值 I_i 也受 $G_{T,i}$ 影响，因此 BHTP 表会影响目标函数值。因需要优化的独立参数数量多、可能的解空间维数大以及容量函数的高度非线性特性，迫切需要找到一种全局优化的方法。遗传算法^[18]原理简单易懂，迭代过程比较容易实现，且计算中所需的参数相对较少，更为重要的是全局最优搜索能力强，可以调节参数以适应不同的搜索需求。本文采用该算法求解非线性时隙分配与图案设计问题。

遗传算法通过编码将解空间 BHTP 转化为染色体，并通过选择、交叉和变异操作保留优秀的父代，最终经过迭代求解，获得 BHTP。遗传算法的操作流程为：

1) 根据目标函数确定可行解域，并根据该可行解域选择可行解的编码方法^[19]。遗传算法的编码方式有：二进制编码、自然数编码、实数编码和树形编码等^[20]。目前最常见的为二进制编码，编解码操作简单易行，因此本文选择二进制编码方式。

2) 对可行解进行评估，根据适应度函数值选择优良父本个体，适应度值由适应度函数确定，适应度函数的确定通常和目标函数相关联。适应度函数用来评价个体对于问题的适应程度^[21]，决定了算法的寻优方向。本文中，适应度函数与系统的差分容量有关。适应度用来表征群体中各个体的优良程度，适应度较高的个体遗传到下一代的概率就较大；适应度较低的个体遗传到下一代的概率就相对小一些。为正确计算这个概率，根据不同种类的问题，须预先确定好目标函数值到个体适应度之间的转换规则，适应度函数是由目标函数变换而成。针对目标函数式(9)为最小问题，本文通过对其取倒数的方式计算个体适应度值。

3) 确定种群规模、交叉变异概率以及进化终止条件等参数。遗传算法从随机产生初始种群开始搜索，根据群体中每个个体的适应度值，使用遗传算子选择保留个体，生成适应优化问题需求的下一代种群，完成种群进化。若当前进化代数 g 达到设置的最大遗传迭代次数 g_{max} ，则停止迭代。

具体算法描述如下：

输入：各波束需求容量 R_i ；干扰矩阵 I ；各波束的发射增益 $G_{T,i}$ ；差分容量目标函数；种群规模 $Popsiz$ ；种群个体数 $Population$ ；交叉概率 F_c ；变异概率 F_n ；迭代次数 g_{max}

输出：满足最小化差分容量的 BHTP

基于遗传算法的 BHTP 求解伪代码如下：

初始化参数： R_i 、 I 、 $G_{T,i}$ 、 $Popsiz$ 、 F_c 、 F_n 、 g_{max} ；

遗传算法迭代过程：

{

$g=0$; //初始迭代次数为 0

$Init_population()$; //种群初始化

$Fitness()$; //根据适应度函数计算各波束选择 BHTP 不同间隙位置时的适应值，选择最优个体作为染色体

$while(g < g_{\text{max}})$ {

$g++$;

$Select()$; //从 $Population$ 中选择相应种群规模的个体来构造新的 $Population$

$Cross()$; //对新群体中的染色体进行交叉操作

$Mutate()$; //对新群体中的染色体执行变异操作

$Evaluate()$; //计算群体中每个染色体的适应值，根据染色体适应度的变化，增加或减少每条染色体的适应度

值，并调整 F_c 和 F_n 的值。根据每个染色体的适应值，保留群体中的最优个体

```

    } //结束迭代
} //最后找出最优的 BHTP
    
```

4 仿真与分析

仿真参数如表 1 所示。原通信区域假设有 12 个波束，同时点亮波束最大个数为 2，各波束的业务需求量为 [20,30,125,136,35,25,45,26,495,130,24,27] Mbps。根据波束优化策略，本文将 3 dB 波瓣宽度划分为 3 个等级，分别为 0.8°、1.6°、3.2°，初始等级波束的波瓣宽度为 1.6°。由于各波束的业务需求量差异较大，在业务需求量较高的区域，配置较小等级的波束；在业务需求量减少的区域，配置较大等级的波束。波位优化之后波束个数为 9 个，各波束的业务需求量分别为 [110,125,136,130,118,130,125,122,121] Mbps，如图 5 和 6 所示。

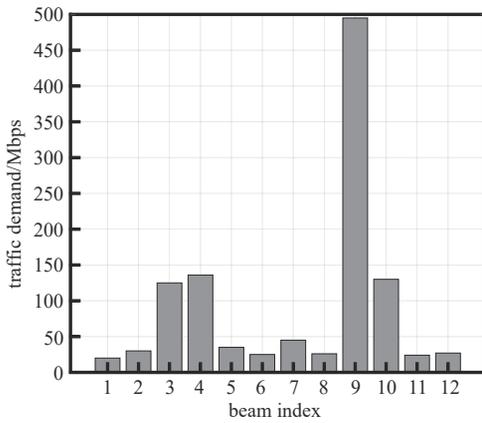


Fig.5 Traffic demand of each beam before optimization
图5 优化前各波束业务需求量

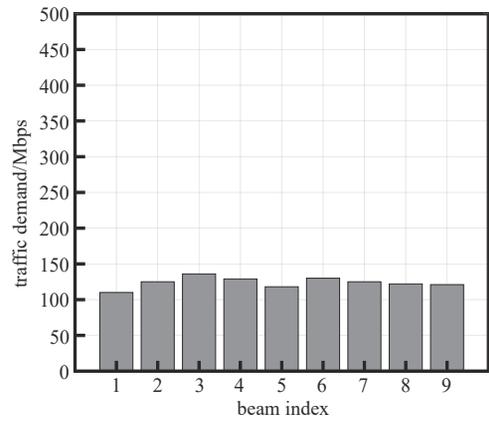


Fig.6 Traffic demand of each beam after optimization
图6 优化后各波束业务需求量

由图 6 可知，波位优化后各波束间的业务需求量变得更均衡。遗传算法的种群规模、交叉概率和变异概率等参数是决定算法成败的重要参数，鉴于研究中的问题比较复杂，将种群规模设置为 100，即在初始化种群时随机产生 100 个 BHTP 用于迭代进化，遗传算法参数具体设置如表 2 所示。跳波束时隙分配模型中由于考虑了各波束等级不同的情况，各波束时隙分配位置和波束间干扰是耦合的，虽然优化问题独立参数数量多、可能解空间维数大以及目标函数具有非线性，但通过引入的遗传算法解后可以直接一步获得 BHTP，减少了计算步骤。

为验证本文提出的在弹性波位优化的基础上利用遗传算法进行干扰避免的方法在性能上是否有提升，对比了根据 n 阶差分求得各波束分配的时隙数，再根据高业务量优先排布的跳波束图案设计方法获得 BHTP 的情况，结果如图 7 和 8 所示。

图 7 为波位未优化各个波束的业务分配量，总的系统吞吐量为 754 Mbps；图 8 为波位优化后，高业务量优先进行图案设计，以及采用联合优化方法的各个波束的业务分配量，总的系统吞吐量分别为 879 Mbps、1 054 Mbps。由此可知，联合优化方法的系统吞吐量最高。

业务满意度是指实际分配的业务量与业务需求量的比值，本文对比了传统多波束均分、高业务量优先和联合优化后的业务满意度，仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知，联合优化后的业务满意度明显优于高业务量优先以及传统多波束均分的业务满意度。

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

simulation parameters	value
total system bandwidth B_s /MHz	100
total system power P /W	100
slot window length W	128
maximum number of simultaneously working beams N_{max}	2
antenna transmit gain before optimization G_T /dBi	75
beam 3 dB angle before optimization θ_{BW} /rad	0.08
earth station antenna receiving gain G_R /dBi	25
antenna transmission gain after optimization G_T' /dBi	[81 75 69]
beam 3 dB angle after optimization θ_{BW}' /rad	[0.014 0.028 0.056]
satellite orbit height H /km	35 786
slot length t /ms	100

表 2 遗传算法参数设置

Table2 Parameter setting for genetic algorithm

parameter	value
population size	100
cross probability	0.6
mutation probability	0.02
iterations	100

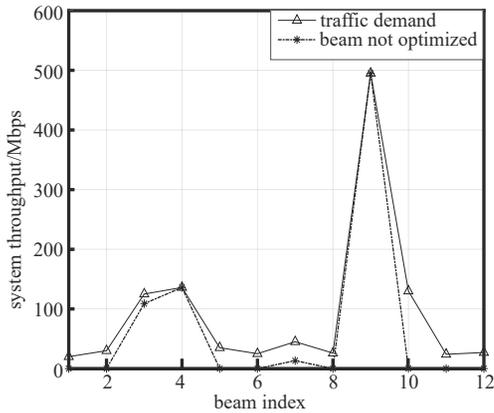


Fig.7 System throughput before beam optimization
图7 波位优化前系统吞吐量

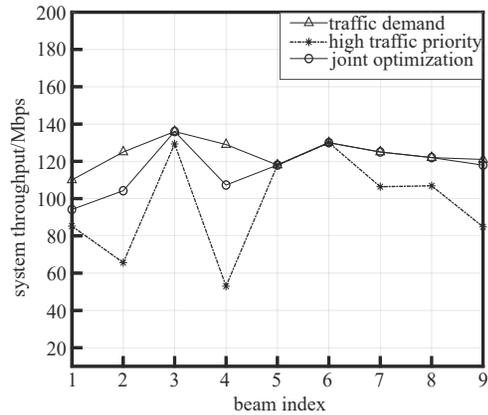


Fig.8 System throughput after beam optimization
图8 波位优化后系统吞吐量

由文献[16]可知，整个系统的平均排队时延 Q 为：

$$Q = \frac{t}{2N_{\max}} \times \frac{\sum_{i=1}^K C_i \sum_{j=1}^K \frac{D_i}{C_j}}{\sum_{k=1}^K D_k} \quad (12)$$

式中各物理量含义见文献[16]。

由香农公式可知，第 i 个波束的通信容量 C_i 为：

$$C_i = B_t \log_2(1 + R_{\text{SIN}, i}) \quad (13)$$

设 $[0, S]$ 表示一个跳波束周期时间长度，为使数据包不会被阻塞，第 i 个波束在 $[0, S]$ 时间内的传入的业务量应不超过分配的业务量：

$$D_i L_p S \leq T_i \quad (14)$$

式中： D_i 为第 i 个波束的数据包平均到达速率； L_p 为数据包长度。本文 D_i 取值使式(14)取等号，确保系统达到饱和吞吐量。设数据包的长度 L_p 为 1 000 bit，将式(12)~(14)联立，可解得优化前后的系统排队时延：弹性波位优化前的系统排队时延为 272 ms，波位优化后的系统排队时延为 168 ms。系统排队时延优化后比优化前降低了 38.2%，由此可知，波束个数越少，系统排队时延越低，优化后系统的时延性能有了极大改善。

5 结论

针对用户动态变化且分布不均的情况，为提高系统吞吐量，降低系统排队时延，提高系统的灵活性，本文采用相控阵跳波束技术进行时隙分配，结合遗传算法进行图案设计。首先利用相控阵天线的特性，在业务需求高的区域配置较小等级的波束，在业务需求低的区域配置较大等级的波束，采用大波位解决较大范围内用户的接入问题。其次考虑了共信道干扰问题，当多个波束同时点亮时，为减小干扰，采用遗传算法求解弹性波位下的跳波束时间计划表，使波束的能力和覆盖区域的业务需求更匹配，降低了资源分配的复杂度及星上载荷的压力，提高了系统吞吐量和业务满意度，降低了系统排队时延。

参考文献：

- [1] 刘冲. 卫星通信系统资源调度算法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2021. (LIU Chong. Research on resource scheduling algorithm of satellite communication system[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.) doi:10.27675/d.cnki.gcydx.2021.000853.
- [2] 李聪,何雯,王一帆. 关于卫星跳波束系统的几点思考[J]. 空间电子技术, 2021,18(1):8-13. (LI Cong, HE Wen, WANG Yifan. A study of beam-hopping technology in satellite systems[J]. Space Electronic Technology, 2021,18(1):8-13.) doi:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.01.002.

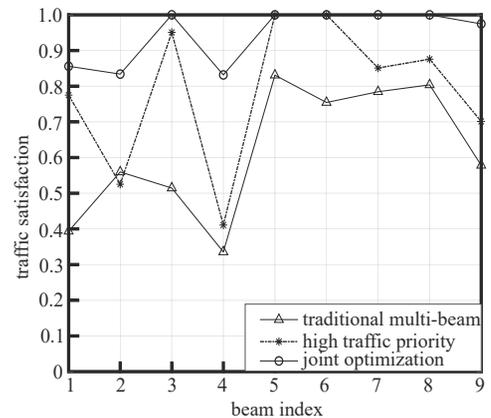


Fig.9 Traffic satisfaction
图9 业务满意度

- [3] ANGELETTI P, PRIM F D, RINALDO R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]// The 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. San Diego: AIAA, 2006:5376. doi:10.2514/6.2006-5376.
- [4] 丁祥, 续欣, 张森柏, 等. 业务自适应的卫星跳波束系统资源分配方法[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(3):29-35. (DING Xiang, XU Xin, ZHANG Senbai, et al. Service-adaptive resource allocation method for satellite beam-hopping systems[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2022, 1(3):29-35.) doi:10.12018/j.issn.2097-0730.20210121001.
- [5] 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 Jingyu, LI Guangxia, BIAN Dongming, et al. Review on resource allocation for beam-hopping satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5):21-26.) doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2019.05.004.)
- [6] LEI Lei, LAGUNAS E, YUAN Yaxiong, et al. Deep learning for beam hopping in multibeam satellite systems[C]// 2020 IEEE the 91st Vehicular Technology Conference(VTC2020-Spring). Antwerp: IEEE, 2020: 1-5. doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128905.
- [7] ACOSTA R J, LARKO J, NARVAEZ A, et al. Advanced Communication Technology Satellite(Acts) multibeam antenna analysis and experiment[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest. Chicago: IEEE, 1992:1356-1358. doi:10.1109/APS.1992.221645.
- [8] ALBERTI X, CEBRIAN J M, DEL BIANCO A, et al. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multi-media satellite systems[C]// 2010 the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Cagliari: IEEE, 2010:226-233. doi:10.1109/ASMS-SPSC.2010.5586902.
- [9] ALEGRE-GODOY R, ALAGHA N, VÁZQUEZ-CASTRO M A. Offered capacity optimization mechanisms for multi-beam satellite systems[C]// 2012 IEEE International Conference on Communications(ICC). Ottawa: IEEE, 2012: 3180-3184. doi: 10.1109/ICC.2012.6364414.
- [10] ALEGRE R, ALAGHA N, VÁZQUEZ-CASTRO M Á. Heuristic algorithms for flexible resource allocation in beam hopping Multi-Beam satellite systems[C]// The 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference(ICSSC-2011). Nara: AIAA, 2011:2011-8001. doi:10.2514/6.2011-8001.
- [11] 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: CN, 201711167658.1[P]. 2017-11-21. (WU Danfang, HE Jing, LI Jiahong, et al. A beam hopping oriented elastic scheduling system for beam position resources and its scheduling method: CN, 201711167658.1[P]. 2017-11-21.)
- [12] 镐梦婷, 张晨, 张更新. 基于相控阵的跳波束波位优化及资源分配算法[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(1):18-26. (HAO Mengting, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin. Beam hopping beam optimization and resource allocation algorithm based on phased array[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(1):18-26.) doi:10.11959/j.issn.2096-8930.2022003.
- [13] 黄子轩, 周家喜, 张靖, 等. 基于捷变波束的卫星通信网络用户随机接入技术[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(1):9-17. (HUANG Zixuan, ZHOU Jiayi, ZHANG Jing, et al. User random access technology based on beam hopping satellite communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(1):9-17.) doi:10.11959/j.issn.2096-8930.2022002.
- [14] 李靖, 王金海, 刘彦刚, 等. 卫星通信中相控阵天线的应用及展望[J]. 无线电工程, 2019, 49(12):1076-1084. (LI Jing, WANG Jinhai, LIU Yangang, et al. Application and prospect of phased array antenna in satellite communications[J]. Radioengineering, 2019, 49(12):1076-1084.) doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2019.12.011.
- [15] 李修坤. 相控阵天线超宽角扫描研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2021. (LI Xiukun. Research on ultra-wide angle scanning of phased array antenna[D]. Beijing: Electronic Science and Technology Institute, China Electronics Technology Group Corporation., 2021.) doi:10.27728/d.cnki.gdzkx.2021.000035.
- [16] TANG Jingyu, BIAN Dongming, LI Guangxia, et al. Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Access, 2021(9):57578-57588. doi:10.1109/ACCESS.2021.3072104.
- [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 Yaxin, BIAN Dongming, HU Jing, et al. Optimization method for full bandwidth beam hopping pattern based on clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4):169-176.) doi:10.19678/j.issn.1000-3428.0055179.
- [18] 杨雄, 吴东. 遗传算法密码分析中改进选择算子研究[J]. 信息工程大学学报, 2022, 23(3):344-350. (YANG Xiong, WU Dong. Improved selection operator in genetic algorithm cryptanalysis[J]. Journal of Information Engineering University, 2022, 23(3):344-350.) doi:10.3969/j.issn.1671-0673.2022.03.015.