

文章编号: 2095-4980(2024)05-0495-09

## 面向低轨巨型星座的多目标卫星接入优化

徐阳威<sup>a,b</sup>, 张晨<sup>a,b</sup>, 张更新<sup>a,b</sup>

(南京邮电大学 a.通信与信息工程学院; b.通信与网络技术国家工程研究中心, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 低轨巨型星座可以提供全球无缝覆盖的卫星通信服务, 但也会导致用户被卫星多重覆盖, 如何选择最优的卫星进行接入, 成为低轨巨型星座接入技术的关键问题。对此, 提出一种基于粒子群的多目标卫星接入优化算法。综合考虑星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载等目标函数, 根据不同业务类型的 QoS 需求, 对参数赋予相应的权值; 针对可视卫星数量多且动态变化的特点, 通过粒子群算法进行低复杂度求解。仿真表明, 相较于对比算法, 所提算法对星地距离和卫星剩余可服务时间进行了优化折中, 保障了服务时间和通信质量, 提高了接入成功率, 能够灵活满足用户的不同业务类型需求, 适应用户业务不同时空分布以及业务离散化的场景。

**关键词:** 低轨巨型星座; 卫星接入; 多目标优化; 粒子群算法

中图分类号: TN927<sup>+.2</sup>

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024020

## Multi-objective satellite access optimization for Low Earth Orbit mega-constellations

XU Yangwei<sup>a,b</sup>, ZHANG Chen<sup>a,b</sup>, ZHANG Gengxin<sup>a,b</sup>

(a.College of Telecommunications and Information Engineering; b.National Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** Low Earth Orbit mega-constellations can provide global seamless coverage of satellite communication services, but also lead to users being covered by multiple satellites. How to choose the optimal satellite for access has become a key issue in the access technology of low-orbit mega-constellations. In response to the above problems, this paper proposes a multi-objective satellite access optimization algorithm based on particle swarm, the objective function comprehensively considers the distance between the satellite and the earth, the remaining service time of the satellite, and the remaining load of the satellite. According to the Quality of Service(QoS) requirements of different traffic types, corresponding weights are assigned to the parameters. Finally, considering the characteristics of a large number of visible satellites and dynamic changes, a low-complexity solution is obtained through the particle swarm algorithm. Simulations show that compared with the comparison algorithm, the proposed algorithm optimizes the trade-off between the distance from the satellite to the earth and the remaining service time of the satellite, guarantees the service time and communication quality, improves the success rate of access, and can flexibly meet the needs of users' different traffic types, adapt to the scenario of users' traffic distribution at different time and spaces, and the scenario of traffic discretization.

**Keywords:** Low Earth Orbit mega-constellations; satellite access; multi-objective optimization; particle swarm algorithm

低轨(LEO)巨型星座因广覆盖和低延迟, 被称为 2020 年十大突破技术之一<sup>[1-2]</sup>, 其特点是卫星众多<sup>[3]</sup>, 如 4.2 万颗的 SpaceX 的“星链”计划<sup>[4]</sup>、1 600 颗的 One Web 计划<sup>[5]</sup>。全球超过 100 个国家或组织考虑建设此类星座<sup>[6]</sup>, 但低轨巨型星座中卫星高速移动, 拓扑复杂且实时变化, 导致用户需要频繁面对卫星接入问题<sup>[7]</sup>。因此, 随着星座规模扩张和通信业务多样化, 处理多星覆盖下的卫星接入问题成为了重要研究方向<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-03-21

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

在多星重叠覆盖区域, 用户需选择一颗卫星进行服务。选择的接入算法会影响用户服务质量(QoS), 接入策略主要考虑3个因素: 星地距离、卫星剩余服务时间和卫星剩余负载<sup>[9]</sup>。目前的研究主要分为两类: 基于单一目标和基于多目标的接入算法。为延长每颗卫星对用户的服务时间, 减少接入频率, 文献[10-11]分析计算用户的卫星剩余服务时间, 以最长剩余服务时间为目标对用户进行选星接入。该算法可以增加用户的卫星服务时间, 但过长的服务时间必然导致卫星服务后期星地距离过长, 通信质量下降。为提高通信质量, 文献[12]提出一种基于图论的卫星接入算法, 采用最短路径算法得出最优的接入方案。然而上述2种算法易导致卫星负载不均衡, 出现网络阻塞。为实现卫星的负载均衡, 文献[13]提出一种基于卫星最大负载的接入算法, 该算法旨在避免某个卫星承载过多负载而导致服务质量显著下降。上述研究仅关注可视卫星的某一属性, 而无法在星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载之间寻找到平衡点。因此, 文献[14-16]提出了卫星接入的综合加权算法, 通过设置不同权重来满足不同区域的业务需求。然而, 对多个接入标准简单加权是无法同时保证通信质量、卫星资源的最大利用率和接入成功率。为此, 文献[17]提出一种基于潜在博弈的接入算法, 考虑了服务时间和卫星仰角, 降低卫星平均接入次数和掉线概率, 满足了不同用户和业务的接入需求。文献[18-19]提出一种基于多智能体强化学习的负载感知卫星接入算法, 可以平衡卫星负载、避免网络拥塞, 并减少信令开销, 但文献[17-19]的算法计算量大, 时间复杂度高。

综合考虑接入标准, 减少算法复杂度, 本文提出一种基于粒子群的多目标卫星接入优化算法。首先, 采用星链的卫星网络参数, 构建了共计2 476颗卫星的低轨巨型星座; 然后根据用户的业务类型需求, 综合考虑星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载, 建立目标函数; 最后, 采用低复杂度的粒子群算法求解目标函数。仿真结果显示, 所提算法在保障卫星服务时间的同时, 有效提高了通信质量和用户的QoS, 且在小区业务持续仿真和相对业务离散变化的情况下, 用户接入成功率均高于对照组。因此所提算法能够灵活满足用户的不同业务类型需求, 适应用户业务不同时空分布以及业务离散化的场景。

## 1 系统模型

### 1.1 多星覆盖场景

为实现全球通信的无缝覆盖, 低轨巨型网络由多颗低轨道地球(LEO)卫星组网构成, 多星覆盖率高, 以全球星通信系统为例, 其双星覆盖率达到90%<sup>[20]</sup>。因此, 处于重叠区域内的地面用户面临多星覆盖下智能选择服务卫星的问题。图1为多星覆盖下的卫星接入场景, 图中 $P$ 为小区用户, 卫星 $B$ 与卫星 $C$ 为同轨卫星, 卫星 $A$ 的轨道高度不同于卫星 $B$ 、 $C$ , 为异轨卫星。假设卫星按图中示意方向运动, 小区用户 $P$ 处于卫星 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 的多重覆盖区域下。现将用户以小区进行划分, 当有 $n$ 个小区进行服务请求时, 进行卫星接入选择的小区集合为:

$$Cell = \{cell_1, cell_2, \dots, cell_n\} \quad (1)$$

提供通信服务的可视卫星网络集合为:

$$LEO = \{LEO_1, LEO_2, \dots, LEO_m\} \quad (2)$$

### 1.2 星座与小区模型

采用Starlink第一阶段的3层卫星网络的轨道参数建立低轨巨型卫星星座, 利用卫星轨道仿真软件对该星座进行建模。以长三角地区为例, 将该区域划分为若干个大小相同的圆形区域, 每个区域定义为一个小区; 同时, 将小区按经度和纬度每 $0.25^\circ$ 为单位进行网格划分, 如图2所示。每个小区中的业务请求量可等同于该区域中用户业务需求的总和。

### 1.3 业务量模型

根据小区内网格所处城市的地理位置、经济发展情况, 确定小区业务量, 以此建立空间业务量模型, 如图3所示。小区业务量由实时数据业务量与非实时数据业

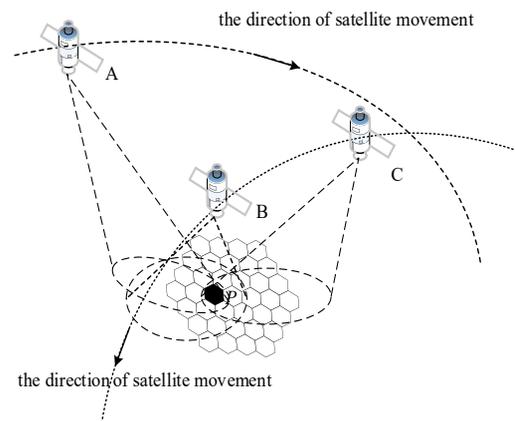


Fig.1 Schematic diagram of satellite access scenario under multi-star coverage

图1 多星覆盖下的卫星接入场景示意图

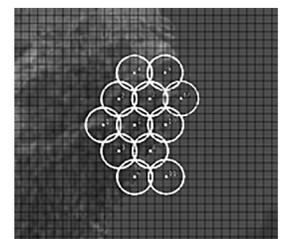


Fig.2 Ground cell model

图2 地面小区模型

务量两部分组成；同时，小区业务量也受时间变化的影响。引入归一化业务参数研究业务量与时间的变化关系<sup>[21]</sup>，将峰值业务量与归一化业务量相乘，即当前时间该小区的业务需求。一天中 10:00~13:00 的归一化业务参数与时间的变化关系如图 4 所示。

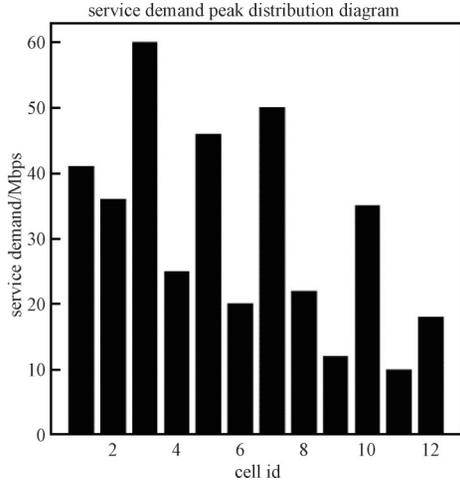


Fig.3 Spatial traffic model  
图3 空间业务量模型

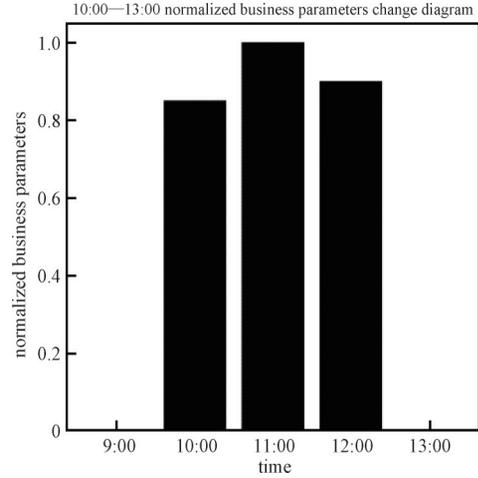


Fig.4 Temporal traffic model  
图4 时间业务量模型

## 2 多目标卫星接入算法

### 2.1 多目标卫星接入算法与目标函数

针对低轨卫星的高动态性，本文综合考虑卫星剩余可服务时间、星地距离和卫星剩余负载等因素，建立目标函数。同时，根据用户业务类型对目标函数中的卫星剩余可服务时间、星地距离和卫星剩余负载等参数进行赋权，采用低复杂度的粒子群算法求解目标函数。

基于粒子群的多目标卫星接入优化算法的目标函数为：

$$p = \alpha \times \frac{t}{T} - \beta \times \frac{d}{D} + \gamma \times \frac{c}{C} \quad (3)$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为常数，分别为卫星剩余可服务时间加权系数、星地距离加权系数和卫星剩余负载加权系数； $t$ 、 $d$ 、 $c$ 为当前卫星的剩余可服务时间、星地距离和剩余负载； $T$ 、 $D$ 、 $C$ 为可选卫星集合 $\zeta$ 中的最长剩余可服务时间、最长星地距离和最大卫星剩余负载。根据业务类型对参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 赋以不同的权重。

### 2.2 卫星参数获取

#### 1) 卫星剩余可服务时间参数的获取

低轨卫星覆盖示意图如图 5 所示，将其与地球圆心的连线作为轴线，以地球半径  $R$  且大小为  $\theta_1$  ( $\theta_1$  为卫星对地面小区的最大覆盖地心角) 的球面角形成的区域，交地球表面于  $M$ 、 $N$  两点。设低轨卫星的轨道高度为  $h$ ，地面小区位置为  $C_u$ ， $\theta_2$  为地心  $O$ 、地面小区  $C_u$  和点  $M$  形成的地心角。

若该卫星为地面小区  $C_u$  的可视卫星，则  $\theta_2$  属于区间  $[0, \theta_1]$ 。设低轨卫星的角速度为  $\omega_s$ ，万有引力常数为  $G_g$ ，地球的质量为  $M_d$ ，则卫星的角速度为：

$$\omega_s = \sqrt{\frac{G_g M_d}{(R+h)^3}} \quad (4)$$

卫星剩余可服务时间为：

$$T_{rem} = \frac{R(\theta_1 - \theta_2)}{\omega_s} \quad (5)$$

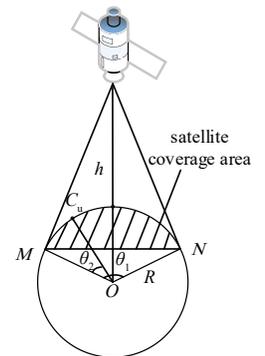


Fig.5 Schematic diagram of satellite coverage  
图5 卫星覆盖示意图

#### 2) 星地距离参数的获取

由图 5 可知，地面小区  $C_u$ 、卫星和地心之间存在三角几何关系。在已知地球半径  $R$ 、地心角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和卫星飞行

高度  $h$  的前提下, 根据余弦定理, 星地距离的大小为:

$$d = \sqrt{R^2 + (R+h)^2 - 2R(R+h)\cos\left(\left|\frac{1}{2}\theta_1 - \theta_2\right|\right)} \quad (6)$$

### 3) 卫星剩余负载的获取

可以在网络控制中心获取卫星的剩余负载。卫星剩余负载是指星地通信中, 卫星可提供的系统容量。当卫星剩余负载为 0 时, 表示卫星的所有系统容量都被占用, 没有空闲容量可为新用户服务, 此时新用户无法接入该卫星。

## 2.3 参数权重赋值

根据不同业务类型对卫星性能的偏好, 需对目标函数中卫星剩余可服务时间、星地距离和卫星剩余负载的参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  赋以不同的权重。根据 3GPP 发布的标准, 共计 4 种基本业务类型: 语音类业务、流媒体类业务、交互类业务和后台类业务。因为需要实时传输语音数据, 语音类业务对时延最为敏感; 流媒体类业务注重数据的连续性, 对网络抖动敏感; 而后台类业务和交互类业务对丢包率较为敏感。因此, 本文将业务类型主要分为对时延敏感的实时数据业务和对时延不敏感的非实时数据业务<sup>[22]</sup>。选择时延、抖动和丢包率作为 QoS 性能指标, 星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载与这些性能指标有关联<sup>[22]</sup>。星地传输距离越大, 则通信时延越大, 并且建筑物遮挡会导致信道质量下降, 进而影响丢包率, 因此, 星地距离关联的性能指标为时延和丢包率。卫星剩余可服务时间指卫星还可为小区提供服务的时间, 时间过短, 可能导致用户频繁切换网络, 产生乒乓效应, 增加网络抖动, 因此, 卫星剩余可服务时间关联的性能指标为抖动。卫星负载失衡会导致排队等候时间增加, 进而产生抖动, 同时网络拥塞也会影响丢包率, 因此, 负载均衡参数关联的性能指标为抖动和丢包率。

通过层次分析法对实时和非实时数据业务关于不同性能指标的重要性进行分析。根据实时和非实时数据业务对时延、抖动和丢包率的要求, 结合星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载与时延、抖动和丢包率的关联信息, 可以得出上述三者对不同业务类型的重要程度<sup>[22]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 业务状态参数重要性分析

Table1 Importance analysis of state parameters for real-time traffic

	distance from satellite to earth		remaining service time		remaining load of satellite	
	real-time traffic	non-real-time traffic	real-time traffic	non-real-time traffic	real-time traffic	non-real-time traffic
distance from satellite to earth	1	1	3	3	2	1/2
remaining service time	1/3	1/3	1	1	1/3	1/4
remaining load of satellite	1/2	2	3	4	1	1

分别抽取表 1 中的实时业务重要性参数、非实时业务重要性参数, 并对其计算后可得到实时数据与非实时数据关于星地距离、卫星剩余可服务时间和卫星剩余负载的参数权重<sup>[22]</sup>, 具体权重如表 2 所示。可以看出, 实时业务对星地距离更为敏感, 非实时业务对卫星剩余负载更为敏感。

表 2 不同业务类型权重分析

Table2 Weight analysis for different traffic types

	distance from satellite to earth	remaining service time	remaining load of satellite
real-time traffic	0.527 9	0.139 6	0.332 5
non-real-time traffic	0.319 6	0.122 0	0.558 4

## 2.4 基于粒子群的多目标卫星接入算法

在低轨巨型卫星星座中, 单目标卫星接入算法难以平衡其他标准对用户 QoS 的影响; 多目标接入算法中, 基于潜在博弈和强化学习的解法, 算法复杂度过高, 难以用于实际。因此, 本文采用具有低复杂度的粒子群算法求解目标函数。粒子群算法将问题的解空间看作是粒子在多维空间中的移动轨迹, 每个粒子代表一个潜在的解, 通过不断地更新粒子的位置和速度, 粒子群算法能够逐渐收敛到最优解, 具体步骤如下:

步骤 1: 确定可视卫星集合。根据 Starlink 第一阶段的 3 层卫星网络的轨道参数, 通过卫星轨道仿真软件建立低轨巨型卫星星座。初始化地面小区场景、小区业务量需求分布等。根据最小通信仰角, 确定可为该小区服务的可视卫星集合。

步骤 2: 初始化粒子群。将可视卫星集合作为粒子群多目标卫星接入算法的解空间, 初始化种群位置  $p[i]$  和速度  $v[i]$ ; 初始化惯性权重、学习因子和最大迭代次数。

步骤 3: 适应值计算。采用式(3)对应的目标函数, 将初始种群中的粒子逐个代入适应值函数中, 得到每个粒子的适应值; 选出种群中适应值最大的粒子作为局部最优位置  $G_{best}$ , 将每个粒子当前位置作为其初始个体最优位置  $P_{best}$ 。

步骤 4：更新。对于每个粒子，根据式(7)~(8)更新其位置：

$$v[i+1]=\omega v[i]+r_1 c_1 (P_{best}-p[i])+r_2 c_2 (G_{best}-p[i]) \quad (7)$$

$$p[i+1]=v[i+1]+p[i] \quad (8)$$

式中： $\omega$ 为惯性权重； $r_1$ 、 $r_2$ 为0与1之间的随机数； $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子。

通过调整粒子的速度和位置，使其朝着更优的方向移动。在更新位置后，计算新位置的适应度值，并与粒子的历史最优适应值进行比较。如果新的适应度值更好，则将其作为当前粒子的局部最优值，并将对应的位置作为种群中每个粒子的局部最优值所在位置。然后，更新粒子所经过的最优位置  $P_{best}$  和种群最优位置  $G_{best}$ 。

步骤 5：结果输出。重复步骤 4 的更新过程，直到达到最大迭代次数  $K$ 。在迭代完成后，输出种群中的全局最优值。

通过以上步骤，粒子群算法能够在迭代中不断优化粒子的位置，寻找到更优的解，最终输出全局最优值，作为小区选择接入的卫星。流程如图 6 所示。

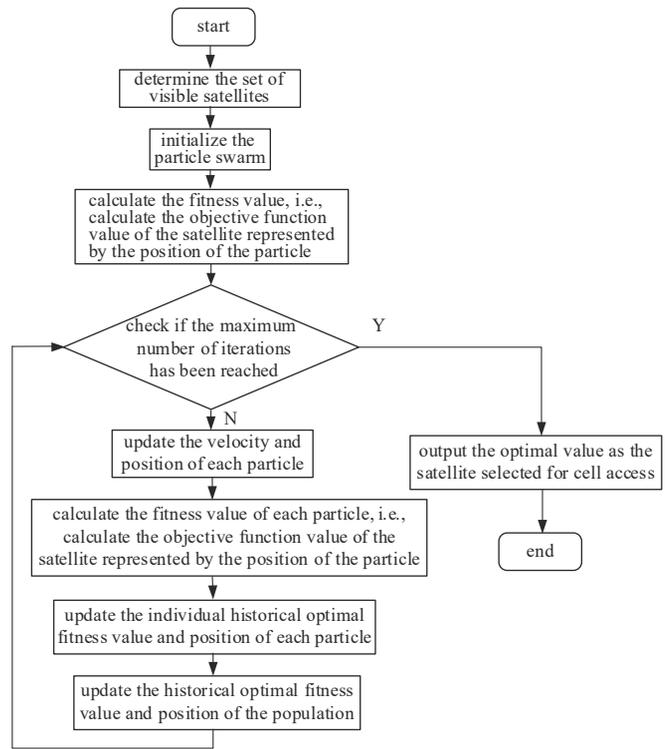


Fig.6 Multi-objective satellite access algorithm based on particle swarm  
图 6 基于粒子群的多目标卫星接入算法

### 3 仿真与分析

本文利用 python 和卫星轨道仿真软件搭建系统仿真环境，以最长剩余服务时间算法<sup>[10]</sup>、最短星地距离算法<sup>[12]</sup>、基于负载均衡和剩余服务时间的算法 (Load Balancing and Remaining Visible Time based Handover, LBRVTH)<sup>[14]</sup>为对照组，对所提算法进行仿真测试。Starlink 是目前技术最先进、规模最大的星座系统，因此本文参考 Starlink 轨道参数建立低轨巨型卫星星座。根据小区建模，地面中心小区坐标为(N 31.230°,E 121.474°)，以此为波位中心坐标进行卫星选择；最低通信仰角为 30°<sup>[23]</sup>。为在提高粒子群算法性能的同时尽可能地降低复杂度，结合实际星座场景选取粒子群算法参数经典值<sup>[24]</sup>：种群规模  $M=20$ 、惯性权重  $\omega=0.9$ ；学习因子  $c_1=c_2=2$ ；迭代次数  $K=50$ ，具体参数如表 3 所示。

粒子群算法的时间复杂度为： $O(MNK)$ ，收敛性如图 7 所示。在上述系统模型下，结合目前卫星通信非实时业务(数据业务)大于实时业务(语音通话)的情况，设置非实时业务与实时业务的比为 7:3；python 结合卫星轨道仿真软件从 26 Mar 2023 10:00—26 Mar 2023 13:00 进行仿真，仿真时间为 3 h，得到各算法下卫星服务时间，如图 8 所示。由于卫星仰角连续变化，仿真曲线较多，本文截取前 3 600 s 的卫星仰角变化，如图 9 所示。

对图 8、图 9 中的信息进行总结分析，结果如表 4 所示。分析表 4 可知，最短星地距离算法平均仰角最高，平均服务时间最短；最长剩余服务时间算法平均仰角最低，平均服务时间最长；LBRVTH 算法更侧重于卫星平均服务时间，而本文所提算法综合考虑了服务时间和星地距离 2 个因素，并对其折中优化，在保障卫星服务时间的基础上，增大了平均通信仰角，提高了用户通信质量。

为验证本文所提算法在不同业务类型下用户的 QoS 保障，对小区业务全部为实时业务或非实时业务 2 种场景下的卫星平均星地距离和剩余负载进行仿真，结果如表 5 所示。

分析表 5 可知，实时业务对通信质量要求较高，因此在卫星接入时，所提算法星地距离参数的权重较高；非

表 3 参数设置

Table3 Parameter settings

parameter	simulation setting		
layer number	1	2	3
number of orbits	72	36	4
number of satellites in orbit	22	20	43
orbit height/ km	550	570	560
orbit inclination/(°)	53.0	70.0	97.6
ground cell center latitude and longitude	N 31.230°, E 121.474°		
minimum elevation angle for satellite communication/(°)	30		
simulation time	26 Mar 2023 10:00—26 Mar 2023 13:00		
population size	20		
inertia weight	0.9		
learning factor	2		
maximum number of iterations	50		

实时业务对丢包率要求较高,因此在选星接入时,所提算法卫星剩余负载参数的权重较高。由表 5 可得,小区业务全部为非实时数据时,所提算法平均卫星剩余负载最高;小区业务全部为实时数据时,所提算法的平均星地距离较全部为非实时数据时有所下降,此时选择的卫星更注重信道质量,提高用户实时通话体验。在用户业务类型不同时,平均卫星剩余负载与平均星地距离未发生明显变化,不能适应用户业务需求去选择合适的卫星接入。因此,通过对参数赋权,本文所提算法可以为用户匹配更适合的卫星,提高了小区用户的 QoS 体验。

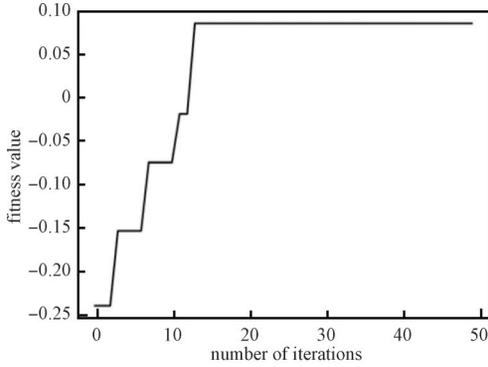


Fig.7 Convergence schematic  
图 7 收敛示意图

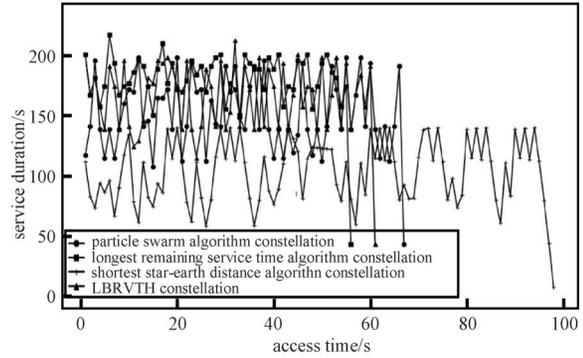


Fig.8 Schematic of satellite service time  
图 8 卫星服务时间示意图

表 4 卫星平均服务时间与平均仰角

Table4 Average service time and average elevation of satellites

	total number of satellite handovers	average service time/s	average elevation/(°)
algorithm with longest remaining service time	56	192.82	49.30
LBRVTH algorithm	61	177.02	54.01
algorithm with shortest star-earth distance	98	110.20	59.52
particle swarm algorithm	67	161.17	56.88

表 5 全部为非实时/实时业务时卫星平均星地距离和剩余负载

Table5 Average satellite to ground distance and remaining payload of satellites under all non-real-time/real-time traffic

	average star-to-earth distance/km		average remaining load/Mbps	
	non-real-time traffic	real-time traffic	non-real-time traffic	real-time traffic
algorithm with longest remaining service time	750.05	755.78	299.45	303.80
LBRVTH algorithm	729.38	728.23	373.97	367.89
algorithm with shortest star-earth distance	647.58	643.49	304.58	305.19
particle swarm algorithm	674.18	652.79	377.22	359.35

为进一步测试基于粒子群的多目标卫星接入优化算法的性能,在对小区业务持续仿真且不同时空分布下,对上述 4 种卫星接入算法的接入成功率进行仿真。本文定义了一个接入成功率系数  $P_a$ ,用于描述在小区能否接入卫星,进行卫星通信:

$$P_a = \frac{\sum R_{sat}}{\sum \hat{R}_{cell}} \quad (9)$$

式中:  $R_{sat}$ 、 $\hat{R}_{cell}$  分别为卫星可提供的全部系统容量、地面小区需要的总业务量;  $r$  为用户平均每次请求的业务量。在仿真 3 h 的时间内,低轨巨型卫星星座下不同算法的接入成功率如图 10 所示。

分析图 4 时间业务量模型可知,在仿真时间 10:00—13:00 内,小区业务量会发生变化,即先升再降,在 11:00—12:00 期间小区业务量最高。对低轨巨型星座下粒子群算法进行分析:10:00—11:00 期间,小区业务量较少,接入成功率为 100%;11:00—12:00 期间,小区业务量增加,接入成功率有所下降;12:00—13:00 期间,小区业务量减少,接入成功率重新回到 100%。在上述 3 h 的仿真中,低轨巨型星座下粒子群算法的平均接入成功率为 98.59%,分别

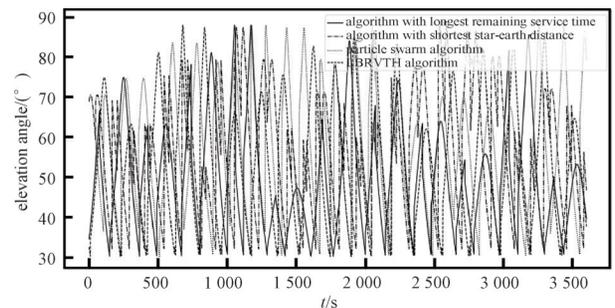


Fig.9 Schematic of elevation angle change  
图 9 仰角变化示意图

比 LBRVTH 算法、最长剩余服务时间算法和最短星地距离算法的平均接入成功率提高 6.88、8.98、9.98 个百分点。

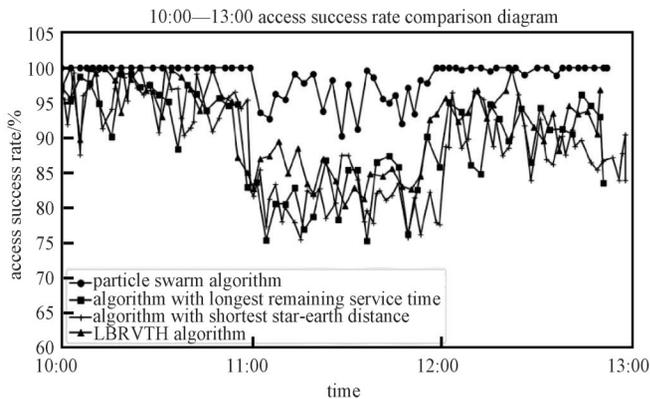


Fig.10 Schematic of satellite access success rate  
图 10 卫星接入成功率示意图

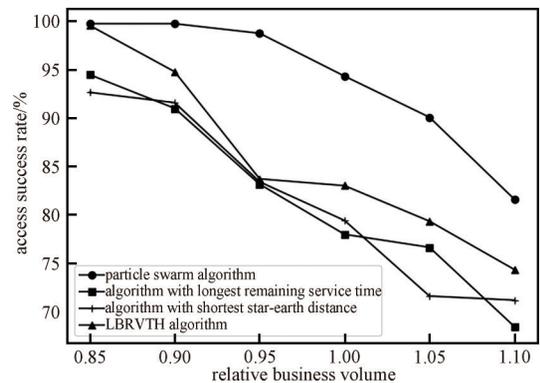


Fig.11 Schematic of satellite access success rate under different cell business requirements

图 11 不同小区业务需求下卫星接入成功率示意图

为进一步探究不同小区业务量对接入成功率的影响，将小区业务量进行离散化，相对业务量从 0.85 增加到 1.10，对上述算法进行仿真，如图 11 所示。

由图 11 可知，随着小区业务量的增加，4 种算法的卫星接入成功率均呈下降趋势。这是因为随着小区业务量的增加，现有的卫星通信系统无法满足全部用户的卫星通信需求，出现通信阻塞，接入成功率下降。但本文所提算法的卫星接入成功率在不同相对业务量下均高于对照算法，且在小区相对业务量为 1.0 时，分别比 LBRVTH 算法、最长剩余服务时间算法和最短星地距离算法的平均接入成功率提高 9.81、14.17、12.92 个百分点。

#### 4 结论

本文提出了基于粒子群的多目标卫星接入算法，该算法综合考虑卫星剩余可服务时间、星地距离和卫星剩余负载，根据不同的业务数据类型对参数分别赋权，以低复杂度的粒子群算法求解多目标函数。在低轨巨型卫星星座下，相较于对比算法，本文算法对卫星服务时间和星地距离折中优化，在保障卫星服务时间的同时提高了通信质量。根据小区用户复杂的业务类型需求，为其选择更适应需求的卫星，提高了用户的 QoS 体验。将小区业务量离散化，在不同相对业务需求下，本文算法的用户接入成功率均明显高于对比算法。

移动互联网业务的发展，尤其是手机接入卫星技术的兴起，进一步促进了卫星通信领域的研究。在本文所述的模型中，低轨巨型卫星星座实现全球覆盖，以小区为单位进行卫星接入选择，在下一步工作中将进一步细化，以小区用户为单位，探讨小区中多个用户卫星接入网络的场景。

#### 参考文献：

- [1] 刘培,徐加友,汪伊婕,等. 面向低轨巨型星座的载荷托管技术发展趋势及展望[J]. 国际太空, 2023(7):24-27. (LIU Pei,XU Jiayou,WANG Yijie,et al. Development trends and prospects of payload hosting technology for low-orbit mega-constellations[J]. International Space, 2023(7):24-27.) doi:10.3969/j.issn.1009-2366.2023.07.005.
- [2] 汪定,陈晓峰,马建峰,等. MIT Technology Review 2020 年"十大突破性技术"解读[J]. 中国科学基金, 2020,34(3):250-265. (WANG Ding, CHEN Xiaofeng, MA Jianfeng, et al. Interpretation of 2020 MIT technology review's top 10 breakthrough technologies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020,34(3):250-265.)
- [3] 周兵,刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评[J]. 电讯技术, 2018,58(9):1108-1114. (ZHOU Bing,LIU Hongjun. Development review of foreign emerging commercial Leo satellite communication(SATCOM) constellations[J]. Telecommunication Technology, 2018,58(9):1108-1114.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2018.09.020.
- [4] 李伟,严康,刘帅军,等. Starlink 星座对 GSO 卫星系统馈电链路的下行同频干扰分析[J]. 中国无线电, 2021(4):43-45,53. (LI Wei,YAN Kang,LIU Shuaijun,et al. Analysis of downlink co-frequency interference from Starlink constellation to GSO satellite system feeder link[J]. China Radio, 2021(4):43-45,53.) doi:10.3969/j.issn.1672-7797.2021.04.031.
- [5] 林莉,左鹏,张更新. 美国 OneWeb 系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2018(9):22-23,18. (LIN Li,ZUO Peng,ZHANG Gengxin. Development situation and analysis of OneWeb system[J]. Digital Communication World, 2018(9):22-23,18.) doi:10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.09.011.
- [6] 陈立豪,刘亚南,张鹏,等. 面向巨型星座的干扰计算等效方法[J]. 电波科学学报, 2023,38(4):721-728. (CHEN Lihao,LIU

- Yanan, ZHANG Peng, et al. Interference computation equivalent method for giant constellations[J]. *Journal of Radio Science*, 2023,38(4):721–728. doi:10.12265/j.cjors.2023051.
- [7] 吴扬,胡谷雨,金凤林,等. 卫星网络组网关键技术[J]. *指挥控制与仿真*, 2022,44(2):88–100. (WU Yang, HU Guyu, JIN Fenglin, et al. Key technologies of satellite networks[J]. *Command Control & Simulation*, 2022,44(2): 88–100.) doi:10.3969/j.issn.1673–3819.2022.02.017.
- [8] 陈全,杨磊,郭剑鸣,等. 低轨巨型星座网络:组网技术与研究现状[J]. *通信学报*, 2022,43(5):177–189. (CHEN Quan, YANG Lei, GUO Jianming, et al. Leo mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. *Journal of Communications*, 2022,43(5):177–189.) doi:10.11959/j.issn.1000–436x.2022075.
- [9] 刘阳. 星地融合网络中的动态切换策略研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2020. (LIU Yang. Research on dynamic switching strategy in satellite-terrestrial integrated network[D]. Chongqing, China:Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.)
- [10] 谢志聪. 高动态卫星网络切换技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (XIE Zhicong. Research on switching technology in high dynamic satellite networks[D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University, 2019.) doi:10.7666/d.D01905653.
- [11] GKIZELI M, TAFAZOLLI R, EVANS B G. Hybrid channel adaptive handover scheme for non-GEO satellite diversity based systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2001,5(7):284–286. doi:10.1109/4234.935743.
- [12] WU Zhaofeng, JIN Fenglin, LUO Jianxin, et al. A graph-based satellite handover framework for Leo satellite communication networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016,20(8):1547–1550. doi:10.1109/LCOMM.2016.2569099.
- [13] PPAPAPETROU E, PAVLIDOU F N. QoS handover management in LEO/MEO satellite systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2003,24(2):189–204. doi:10.1023/A:1022569901936.
- [14] SHI Lele, YANG Feng, WU Wenjun, et al. Load balancing and remaining visible time based handover algorithm for Leo satellite network[C]// 2022 IEEE the 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2022:391–395. doi:10.1109/ICCC56324.2022.10065821.
- [15] 黄飞,许辉,周恒,等. LEO卫星通信中基于服务质量的综合加权接入策略[J]. *电子与信息学报*, 2008,30(10):2411–2414. (HUANG Fei, XU Hui, ZHOU Heng, et al. QoS based average weighted scheme for Leo satellite communications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008,30(10):2411–2414.)
- [16] MIAO Jiansong, WANG Pengjie, YIN Haoqiong, et al. A multi-attribute decision handover scheme for Leo mobile satellite networks[C]// 2019 IEEE the 5th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, China: IEEE, 2019:938–942. doi:10.1109/ICCC47050.2019.9064377.
- [17] WU Yang, HU Guyu, JIN Fenglin, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks[J]. *IEEE Access*, 2019(7):133641–133652. doi:10.1109/ACCESS.2019.2941217.
- [18] HE Shuxin, WANG Tianyu, WANG Shaowei. Load-aware satellite handover strategy based on multi-agent reinforcement learning[C]// IEEE Conference and Exhibition on Global Telecommunications (GLOBECOM). Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2020:1–6. doi:10.1109/GLOBECOM 42002.2020.9322449.
- [19] WANG Jie, MU Weiqing, LIU Yanan, et al. Deep reinforcement learning-based satellite handover scheme for satellite communications[C]// 2021 the 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Changsha, China: IEEE, 2021:1–6. doi:10.1109/WCSP52459.2021.9613411.
- [20] 贾靖,王恒,夏旭,等. 空地一体网络接入选择与切换控制技术研究[J]. *无线电通信技术*, 2023,49(5):826–833. (JIA Jing, WANG Heng, XIA Xu, et al. Research on access selection and handoff control technology for integrated air-ground networks[J]. *Radio Communication Technology*, 2023,49(5):826–833.) doi:10.3969/j.issn.1003–3114.2023.05.007.
- [21] HU Xin, LIU Shuaijun, WANG Yipeng, et al. Deep reinforcement learning-based beam hopping algorithm in multibeam satellite systems[J]. *IET Communications*, 2019,13(16):2485–2491. doi:10.1049/iet-com.2018.5774.
- [22] 彭映晗. 空间低轨卫星网络智能化接入与资源分配机制研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2020. (PENG Yinghan. Research on intelligent access and resource allocation mechanism in space low-orbit satellite network[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.) doi:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.002008.
- [23] 陈子博. 低轨卫星通信系统级仿真研究与性能评估[D]. 北京邮电大学, 2023. (CHEN Zibo. System-level simulation research and performance evaluation of LEO satellite[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.)