

文章编号: 2095-4980(2024)09-0992-08

针对 OFDM 的低轨卫星资源动态分配算法

张美蓉, 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: 在天地一体化信息网络场景下, 卫星通信与地面 5G 的融合是大势所趋。因此, 正交频分复用(OFDM)作为 5G 空口协议的关键技术, 如何高效服务于频带资源受限的低轨卫星通信系统成为研究热点。针对低轨卫星高动态性、系统信道特征、业务时变性以及大多普勒频移等特点, 提出一种针对 OFDM 的低轨卫星资源动态分配策略。首先根据 3GPP 标准规定和最大化频谱效率选择载波间隔, 子载波分配前通过剔除劣子信道保证信道的传输性能, 通过分簇成倍级减少分配时的循环次数; 随后依据用户需求及信道特征对子载波进行贪婪分配; 最后对单用户按照比例所分到的功率应用注水原理。仿真结果表明, 该算法能有效适应低轨卫星场景, 降低算法的复杂度, 提高系统容量的同时仍可保证用户需求与传输速率的公平性。

关键词: 低轨卫星; 正交频分复用; 多普勒频移; 贪婪算法; 注水原理

中图分类号: TN927⁺.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022239

LEO satellite resource dynamic allocation algorithm based on OFDM

ZHANG Meirong, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin

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

Abstract: In the scenario of integrated terrestrial and space information networks, the integration of satellite communication with terrestrial 5G is an inevitable trend. For Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), a key technology of the 5G air-interface protocol, how to efficiently serve the Low Earth Orbit(LEO) satellite communication systems with limited frequency band resources has become a hotspot. In view of the high dynamics of LEO satellites, system channel characteristics, service variability, and most Doppler frequency shifts, a dynamic resource allocation strategy for OFDM in LEO satellite communication is proposed. Firstly, based on the 3GPP standard and the maximization of spectral efficiency, the subcarrier spacing is selected, and the transmission performance of the channel is ensured by eliminating inferior sub-channels before subcarrier allocation, and the number of cycles during allocation is reduced by clustering in multiples; then, the subcarriers are greedily allocated according to user demand and channel characteristics; finally, the power allocated to a single user is applied according to the proportional water-filling principle. Simulation results show that the algorithm can effectively adapt to the LEO satellite scenario, reduce the complexity of the algorithm, and improve the system capacity while still ensuring the fairness of user demand and transmission rate.

Keywords: Low-Earth-Orbit satellite; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; Doppler shift; greedy algorithm; principle of water-filling

随着空天地一体化信息网络的不断推进, 天地融合通信成为未来通信网络的重要发展趋势。在天地一体化信息网络场景下, 卫星通信融合地面 5G 技术是大势所趋, 而空中接口融合是地面 5G 与卫星通信融合的最终形态。因此, 文献[1]提出, 在不改变终端空口协议栈的前提下, 基于地面空口协议对卫星接入网空口协议进行适应性改进, 以适配星地无线环境。正交频分复用(OFDM)作为 5G 空口协议的关键技术, 成为卫星通信和 5G 融合的重要研究领域。

5G 在传输体制上采用多载波 OFDM, 其子载波在频域内的正交重叠性使系统的频带利用率得到优化, 可有

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究专项资助项目(BK20192002)

效缓解低轨卫星通信系统频带资源紧张、带宽利用率低等问题^[2]。因此，在资源受限的低轨卫星通信系统中，基于 OFDM 通信体制优化资源配置，利用星上可用资源，运用载波、功率资源调配的方式，最大化资源利用率，进行有效的资源管理具有较强的研究意义。但 OFDM 对频率偏移非常敏感，即使是微小频偏也会造成载波间干扰，使接收的信号产生畸变^[3]。而在高速运动的卫星通信系统中，较大的多普勒频移不可避免。因此，针对 OFDM 通信体制提出的多数资源分配策略并不能适用于低轨卫星。

针对 OFDM 体制的资源分配，国内外学者做了大量研究。文献[4]中提出用户容量最优分配算法，使系统总容量最大化，但并没有考虑各用户之间的业务差异，对于信道条件较差的用户，可能接收不到传输数据。文献[5]中研究了系统最大容量最小化问题，保证所有用户可获得最优的通信速率，但没有考虑所有用户之间的比例公平性。文献[6]提出一种改进的基于用户容量最大化的子载波分配算法，主要针对算法的公平性进行优化，尽量同时满足最大化系统容量与公平性。以上算法只适用于地面通信，在卫星网络中应用还需要更多地考虑环境差异。文献[7]提出一种针对低轨卫星的基于效用函数的 OFDM 资源分配方案，基于经验时延、业务排队时延和时延截止期门限，求解子载波分配问题，在效率和公平性之间实现了系统性能的平衡，实时业务的 QoS 得到了很好的满足，但该方案较为复杂。文献[8]分析了 LEO 卫星的高速运动造成的多普勒效应，提出一种用于 LEO 通信的 OFDM 系统子载波间距自适应调整，利用地理位置信息，将波束中的用户分为不同的组以最大限度地提高吞吐量，保证卫星覆盖全过程的通信质量。但该方法只对子载波间隔进行了调整，并未在资源分配算法中予以应用。以上算法都未综合考虑到低轨卫星的高速运动、信道特征、业务时变性、多普勒频移等多重因素，在低轨卫星系统中并不适用。因此，在低轨卫星通信系统中，针对 OFDM 提出一种切实可行的动态资源分配算法仍是需要解决的问题。

对比地面系统，低轨卫星通信具有工作频段高、传输链路长、信道差异性大、移动速度快、星载设备的处理能力较弱等特点。本文旨在提出一种针对 OFDM 的低轨卫星资源动态分配策略，有效适应低轨卫星的动态场景。仿真结果表明，该算法可保证用户需求与传输速率的公平性，达到最大化系统容量的目的，提高用户的满意度，降低算法的复杂度。

1 系统信道模型

在低轨卫星的下行链路中，卫星接收到其覆盖范围内用户的通信需求后，根据用户的请求信息，分配相应的通信资源为用户提供服务。低轨卫星通信系统中，信道特征对资源的高效利用具有较大影响。低轨卫星的高速运动使星地间无线信道多变^[9]，建立的星地间信道模型如图 1 所示。

AWGN(Additive White Gaussian Noise)信道包含云、气体、雾等固定衰减的常数。多径衰落在较长的传输距离下服从莱斯分布，其信号包络概率分布函数为：

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中： r 为合成信号幅度； $2\sigma^2$ 为信号平均多径功率； A 为直射分量的峰值； $I_0(\cdot)$ 为一阶 Bessel 函数。

莱斯分布中的莱斯因子 K ，其大小为直射径与信号平均功率之比，即 $K = 10\lg\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right)$ 。在卫星通信系统中，直射分量较多，多径影响较小，本文取值 $K = 20 \text{ dB}$ ^[10]。

随着卫星通信需求扩大，L、C、X、Ku 等频段已不能满足当前通信高速宽带的需求。Ka 频段(20/30 GHz)具有通信容量大、波束宽度窄、功率密度高、终端尺寸小、轨道平面内可容纳更多卫星以及抗干扰能力强等优点，但由于频率较高，该频段的移动卫星通信受天气和移动环境衰减因素的影响比较严重。大气衰减因素主要包括降雨衰减、大气吸收、闪烁和云雾衰减等^[11]，尤其是雨衰的影响。将当地气象部门得到超过降雨衰减的时间百分比 $p=0.01\%$ 时的降雨率定义为 R_{001} ，基于 ITU-R P.618-11 降雨衰减预报模型，可以计算出 $p=0.01\%$ 时间概率降雨衰减率 A_{001} ^[12]：

$$A_{001} = \gamma_R L_c = k R_{001}^\alpha \times L_c \quad (2)$$

式中： γ_R 为降雨衰减率； L_c 为卫星信号穿过降雨区的有效路径长度； k 和 α 为计算降雨衰减率所需的频率相关系

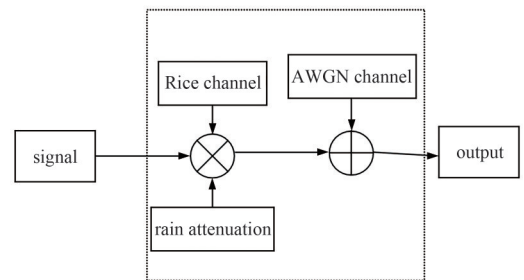


Fig.1 Satellite-ground channel model
图 1 星地信道模型

数, 可通过频率、仰角和极化倾角计算得到。在雨衰计算中, 有诸如该城市的经纬度、降雨强度、极化方式、工作频率、地面站海拔等固定影响因素, 也有天线接收仰角、卫星经度、卫星下行信号穿过降雨区的倾斜路径长度等动态影响因素。在低轨卫星运动过程中, 不同位置的用户收到的信号经历的降雨衰减也不同。

2 多普勒频移

低轨卫星绕地高速运动过程中, 卫星与地面终端的相对位置在不停变化, 多普勒频移随之而变化。构建卫星与地面终端的位置模型, 分析卫星运动位置与多普勒频移的关系。图 2 为星地链路的简化模型, 其中 α 为地心角, θ 为终端仰角, R_e 为地球半径 6 378 km, h 为卫星离地面高度。卫星经过用户区域上方时, 其多普勒频偏 f_{Doppler} 的变化为:

$$f_{\text{Doppler}} = \frac{v}{c} f_c \cos \left(\arccos \left[\frac{R_e}{h + R_e} \cos \theta \right] \right) \quad (3)$$

式中: v 为卫星运动速度; c 为光速。由式(3)可知, 频偏大小与卫星运动速度正相关。OFDM 系统对频偏较敏感, 其破坏了 OFDM 子载波的正交性, 产生载波间干扰, 即使频偏较小也会带来较大的信噪比损失, 且随着多普勒频偏的增加, 信噪比损失更加严重^[13]。

根据香农公式, 可得系统容量为:

$$C_{\text{max}} = B_w \log_2 (1 + R_{\text{SIN, ICL, Doppler}}) \quad (4)$$

式中: B_w 为系统带宽; $R_{\text{SIN, ICL, Doppler}}$ 为多普勒频偏产生载波间干扰情况下的信干噪比。OFDM 中由于循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 的引入, 系统的频谱效率会受 CP 长度影响, 考虑 CP 影响后系统最大容量变为:

$$C_{\text{max}} = \frac{T_s}{T_s + T_{\text{cp}}} B_w \log_2 (1 + R_{\text{SIN, ICL, Doppler}}) = \frac{1}{1 + T_{\text{cp}} f_{\text{sub}}} B_w \log_2 (1 + R_{\text{SIN, ICL, Doppler}}) \quad (5)$$

式中: T_s 为 OFDM 符号持续时间; T_{cp} 为 OFDM 的 CP 的时域长度; f_{sub} 为子载波间隔。由式(5)可知, 系统最大容量受频偏与噪声引起的信干噪比、CP 长度、子载波间隔共同影响。频偏与噪声不可避免, 但 CP 与子载波间隔可以依据 3GPP 中 5G 参数的数据标准做最优的选择^[14]。3GPP 在 30 GHz 时的参数如表 1 所示。

表 1 OFDM 参数设定

Table 1 OFDM parameters selection

subcarrier frequency/kHz	FFT length	OFDM symbol length/ μs	CP length/ μs
15	4 096	66.67	4.68
30	2 048	33.33	2.34
60	1 024	16.67	2.34
120	512	8.33	2.34

在 OFDM 信号参数选定过程中, 综合考虑以下因素:

- 1) CP 会加大系统开销, 影响系统的频谱效率;
- 2) 基于位置信息的同步^[15], 需满足 CP 长度大于 2.25 μs ;
- 3) 循环前缀的长度一般选择 OFDM 有效长度的 1/4、1/8、1/16 或 1/32;
- 4) 为了补偿多普勒频偏对信号的干扰, 选择的子载波间隔越大越好。

因此, 结合 5G 标准下符合 3GPP 参数规定, 减小低轨卫星高多普勒对信噪比的影响以及兼顾系统频谱效率等因素, 子载波间隔选择 120 kHz。

3 联合资源分配

低轨卫星通信系统中, 系统根据用户的资源申请调度信息和信道状态信息, 依据不同用户的业务种类、资源需求大小以及用户位置因素, 对星上带宽(载波)、功率等资源进行合理分配, 最大化系统传输速率, 提高资源

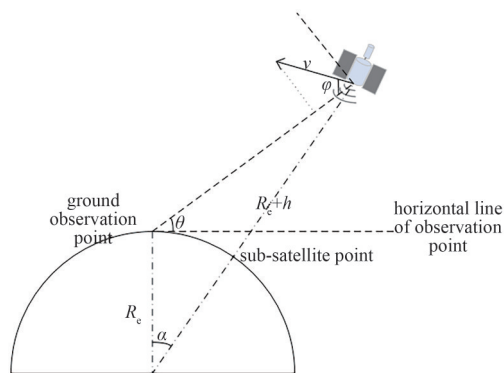


Fig.2 Simplified model of satellite-ground link
图 2 星地链路的简化模型

利用率，满足用户需求。

在下行链路中采用 OFDM 传输体制，将系统总带宽划分为若干子信道，将第 n 个子信道的容量 $C(n)$ 表示为：

$$C(n) = \Delta f \times \log_2 \left(1 + \frac{p(k, n)h^2(k, n)}{\Delta f \times N_0} \right) \quad (6)$$

式中： Δf 为子载波带宽 (120 kHz)； $p(k, n)$ 为用户 k 在子信道 n 上的功率； $h(k, n)$ 为用户 k 在子信道 n 上的信道增益； N_0 为噪声功率。

为保证各用户业务之间的公平性，同时满足各业务速率的传输比例及最大化系统的传输速率，针对 OFDM 系统的资源分配算法的目标函数和约束条件如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sum_{k=1}^K R_k = \max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{\theta(k, n)}{N} \log_2 \left(1 + \frac{Np(k, n)h^2(k, n)}{BN_0} \right) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{C1: } \theta(k, n) \in \{0, 1\}, \forall k, n \\ \text{C2: } \sum_{k=1}^K \theta(k, n) \in \{0, 1\}, \forall n \\ \text{C3: } p(k, n) \geq 0, \forall k, n \\ \text{C4: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \theta(k, n) p(k, n) \leq P_{\text{total}}, \forall k, n \\ \text{C5: } R_1 : R_2 : \dots : R_K = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_K \\ \text{C6: } h^2(k, n) = G_t G_r \left| \frac{\zeta(n)}{\Phi(k, n)} \right|^2, \forall k, n \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (7)$$

式中： K 为总用户数； N 为总子载波数目；带宽 $B = \Delta f \sum_{n=1}^N \theta(k, n), \forall k$ 。约束条件 C1 中， $\theta(k, n)$ 表示子载波的分配结果，表示子载波 n 是否分配给用户 k ，其值为 1 或 0。当其为 1 时，表示将子载波 n 分配给用户 k 。约束条件 C2 表示在任意传输时隙内，一个子载波最多只能分配给一个用户使用^[16]。约束条件 C3 中， $p(k, n)$ 为功率分配结果，表示用户 k 在使用子载波 n 传输数据时所分配的功率，显然功率值必须大于或等于零。C4 为星上功率受限约束，整个系统的传输消耗功率必须在系统所能提供的功率范围内。C5 为用户之间的速率公平性约束条件， ϕ_k 为第 k 个用户的速率比例因子，由于用户的传输速率等于分配给该用户的所有子载波的传输速率的总和，并且各用户的业务不同，因此传输速率需要满足一定比例性。C6 为用户 k 在子载波 n 上的信道增益，包括卫星信号在空间传输时受到的多径衰落、AWGN 固定衰减和雨衰等影响^[17]，式中 G_t 和 G_r 分别表示卫星和地面用户的天线增益， $\zeta(n)$ 为服从莱斯分布的小尺度衰落， $\Phi(k, n) = \frac{4\pi f(n)d_s(k, n)A_r}{c}$ 为自由空间传输和雨衰引入的损耗，其中 c 为光速， $f(n)$ 为子载波频率， $d_s(k, n)$ 为卫星与地面用户间的距离， A_r 为降雨衰减造成的损耗。

资源分配算法流程图如图 3 所示。

3.1 子载波分配

在卫星通信系统资源受限的情况下，对资源的高效利用尤为重要。由于信道具有随机性，而一些深度衰落的信道传输性能差，会造成对资源的浪费。因此，本文算法参考 Fischer 算法对子载波进行筛选，剔除不适合用户传输数据的子载波，仅在可以使用的子载波上进行功率分配^[18]。同时，由于系统总带宽大，相应的子载波数目也多，而某些子载波的衰落情况相似，将信道增益近似的子载波以簇为单位进行分配，可有效简化算法复

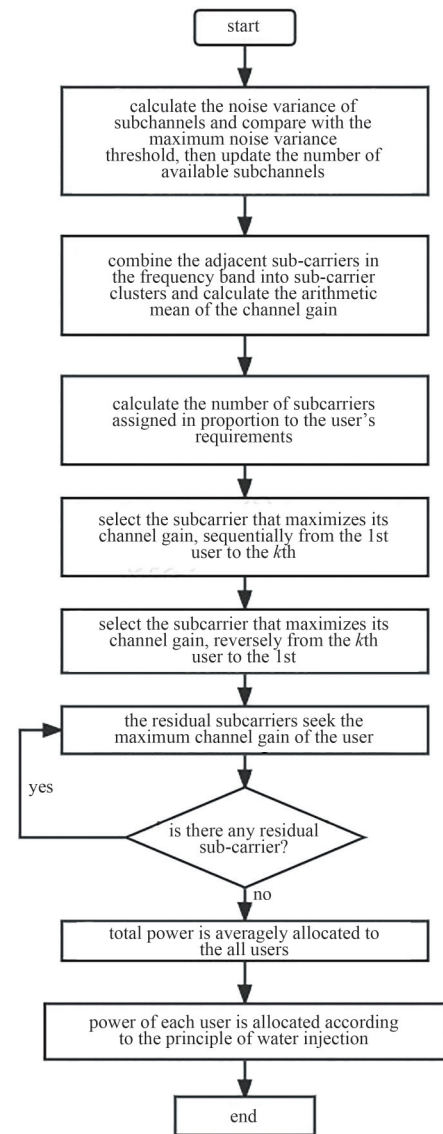


Fig.3 Flow chart of resource allocation algorithm
图3 资源分配算法流程图

杂度。

贪婪算法的核心思想是在对问题求解时，始终选择当前时刻的最优解，得出整体分配的局部最优解。在贪婪分配开始前，更新系统可用子信道数，并将子载波合为子载波簇，用户在子载波簇上的信道增益用该簇包含的多个子载波的信道增益的算术平均值表示。对用户任意排序，从所有子载波簇中找到使用户信道增益最大的子载波簇，按顺序分配给用户；在分配完一轮子载波后，继续将信道增益最好的子载波簇根据用户倒序进行分配；依次轮第循环。为尽量满足用户比例公平性，按用户需求比例计算用户应分配到的子载波数，一旦某用户分配到的载波数满足比例需求后，该用户将不再分配子载波。在进行完若干次循环后，所有用户所分配到的子载波数目都粗略满足用户需求比例后，对剩余的子载波簇采用子载波簇选用户的方式继续进行分配，直到可利用子载波集合为空，算法结束^[6]。

3.2 功率分配

在多用户系统中，首先总功率在多用户之间进行合理分配。为速率高的用户分配更多的功率^[19]，可提高系统容量。为每个用户分配的功率为：

$$P_k = \frac{R_k}{R_b} P_{\text{total}} = \frac{R_k}{\sum_{k=1}^K R_k} P_{\text{total}} \quad (8)$$

在各用户分配的总功率确定时，根据信道状况对发送功率进行自适应分配，即在单用户上应用功率注水算法可以最大化传输速率。在“注水”过程中，信道状态好的子载波分配功率多，信道差的子信道分配功率较少。

求解凸优化目标函数 $C(k, n) = \log_2 \left(1 + p(k, n) \frac{Nh^2(k, n)}{BN_0} \right)$ 时，构造拉格朗日函数：

$$L_C(\mu, p) = \log_2 \left(1 + p(k, n) \frac{Nh^2(k, n)}{BN_0} \right) - \mu \left(\sum_{n=1}^N p(k, n) - P_k \right) \quad (9)$$

求解，令 $\frac{\partial C}{\partial p(k, n)} = 0$ ，求得单用户的每个载波上分配到的功率为：

$$p(k, n) = \left[\frac{P_k + \sum_{n=1}^N \frac{1}{h(k, n)}}{N} - \frac{1}{h(k, n)} \right]^+ \quad (10)$$

式中 $[x]^+$ 表示当 $x > 0$ 时，值为本身 x ；当 $x < 0$ 时，值为 0。

4 仿真结果分析

本文所有的仿真中，信道模型依据星地信道模型，不同位置用户经历的衰减不同。综合考虑莱斯信道特性与雨衰等衰减因素影响，使用多径的频率选择性衰落信道，每径信道由平坦衰落信道模型叠加构成，不同信道相互独立，且各路路径的功率幅值服从指数衰减。假设系统为理想信道，可实现信道估计和同步。

对本文所提算法的系统容量、公平性、算法复杂度、用户满意度等性能进行仿真分析，并将其与参考文献[6]中的算法进行比较。仿真中 LEO 卫星信道莱斯因子为 20 dB，降雨衰减范围在 12~23 dB，系统的子载波间隔为 120 kHz，其他仿真参数如表 2 所示。

在低轨卫星场景中，卫星通信系统带宽较大，子载波数目倍增且不同信道差异性较大，因此需要更多考虑子载波的分配方式。为此，本文算法在子载波分配过程中引入剔除劣信道和分簇。由于在分配子载波时采取了分簇机制，此时子载波的信道增益已经不能很好地表现每个子载波的性能，子载波根据信道增益选择用户时并不能完全取得当前的局部最优解，因此在系统容量方面有所下降。但作为补偿，在功率分配过程中，本文算法根据用户速率比值分配系统总功率，可使速率高的用户获得更多的功率，提高系统容量。图 4 为本文算法(the new algorithm)与文献[6]所提基于公平性的算法(fair algorithm)在系统

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

simulation parameters	value
Rice factor K/dB	20
frequency band Ka/GHz	30
total system bandwidth B/MHz	400
total system power P/W	100
satellite orbit height h/km	1 000
noise temperature T/K	300
Ludwig Boltzmann's constant k/dB	-228.6
sub-carrier length $\Delta f/\text{kHz}$	120
roll-off factor r	0.1
cycle prefix time domain length $t/\mu\text{s}$	2.34
sub-carrier cluster L	2
rain attenuation $A_{\text{rain}}/\text{dB}$	12~23

频带利用率上的对比。可以看到，本文算法在系统频带利用率上有所提升，即系统容量更高。由于多用户分集增益的影响，系统容量随着用户数量的增加而增加。在拥有更多用户和更多子信道的系统中，这种影响更加突出。

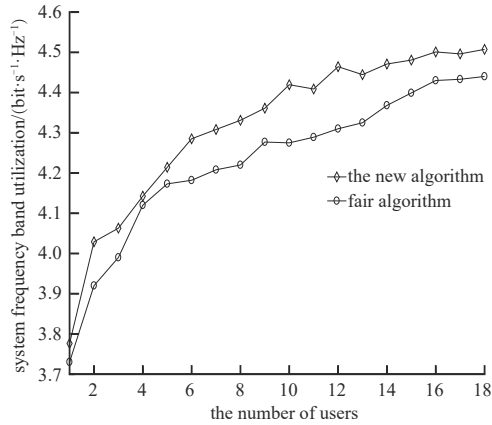


Fig.4 Comparison of the system frequency band utilization between different algorithms

图 4 不同算法的系统频带利用率对比

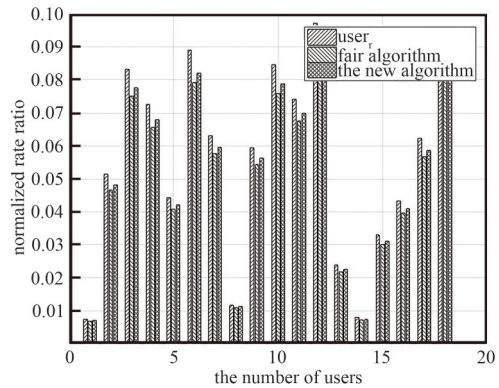


Fig.5 Comparison of normalized rate ratios of different algorithms

图 5 不同算法归一化速率比例对比

图 5 为两种算法用户速率比例性图，其中横坐标表示用户，纵坐标表示归一化容量， $user_i$ 为每个用户需求的归一化速率比例，由 $R_k / \left(\sum_{k=1}^K R_k \right)$ 给出，图中同样给出了两种算法的用户传输速率/需求的归一化比例。由图 5 柱状图趋势可以看出，本文算法和文献[6]算法都能满足不同用户之间的速率公平性。

算法复杂度是衡量算法实用性的重要指标。本文算法通过计算找到子信道可传输信息的最大噪声方差门限，丢弃部分不可用于载波，并经过分簇，大大减少了子载波分配循环次数，因此大大减少了系统运行的时间，降低了算法的复杂度。不同算法子载波分配循环次数对比如表 3 所示，其中 N 为可用子信道。

结合日常生活中通信产生的语音或数据业务看，业务的通信时段具有较强的周期性。从业务的时间维度对卫星业务进行建模，分析业务量随时间的变化情况，文献[20]提出了归一化业务量时间加权因子概念，根据人们一天 24 h 的活动规律，在不同的时间段，将时间加权因子与业务需求峰值加权，得到业务量时间变化模型。仿真其业务量随时间变化的情况，以所有用户在当前时刻总速率需求最高峰时的业务速率为基准，对一天 24 h 内的业务需求进行模拟，对不同时刻用户的总体满意度进行分析。仿真结果如图 6 所示，可以看出，在不同时刻，所提算法总能获得更高的用户满意度。

表 3 不同算法子载波分配循环次数对比

Table3 Comparison of the number of sub-carrier allocation cycles between different algorithms

algorithm	cycle index
fair algorithm	KN
the new algorithm	KN/L

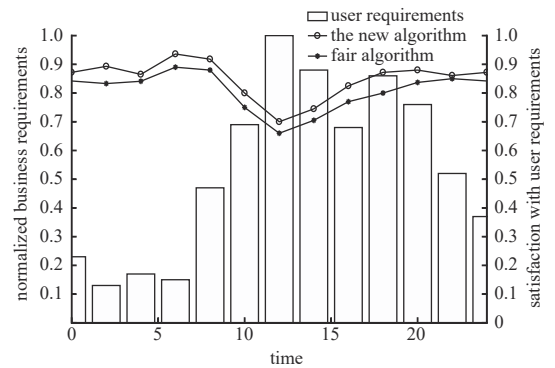


Fig.6 Change of overall users satisfaction at different time in 24 h day

图 6 一天 24 h 内不同时刻用户需求总体满意度变化情况

5 结论

针对 LEO 卫星场景，本文提出了一种适用于低轨卫星场景的联合功率、载波资源分配算法。该算法考虑到低轨卫星的高动态性、信道特征、业务时变特性、多普勒频移等影响，提出一种针对 OFDM 的低轨卫星资源动态分配策略。仿真结果表明，该算法能有效适应低轨卫星场景，降低算法的复杂度，在提高系统容量的同时仍可保证用户需求与传输速率的公平性。下一步的研究中，将考虑不同的莱斯因子设定和强烈天气变化下的雨衰

以及链路等其他因素对信道增益的影响,并在建模中引入更全面的评价参数,进一步适应卫星通信的不同需求。

参考文献:

- [1] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面 5G 融合发展路线探讨[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 115–124. (ZHENG Chong, MIAO Zhongyu, ZHENG Hanyu, et al. Discussion of integrated development roadmap for satellite communications and ground 5G[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(5): 115–124.) doi:10.3969/j.issn.1673–8748.2021.05.017.
- [2] 关庆阳. 低轨宽带卫星移动通信系统 OFDM 传输技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. (GUAN Qingyang. Resource on OFDM transmission technique for broadband Leo satellite communication system[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2011.) doi:10.7666/d.D263858.
- [3] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(二)[J]. 卫星与网络, 2018(11): 22–26, 28. (WANG Chunting, LI Ning, ZHAI Lijun, et al. The fusion of satellite communication and ground 5G(2)[J]. Satellite & Network, 2018(11): 22–26, 28.) doi:10.3969/j.issn.1672–965X.2018.11.005.
- [4] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171–178. doi:10.1109/JSAC.2002.807348.
- [5] RHEE W, CIOFFI J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation[C]// 2000 IEEE the 51st Vehicular Technology Conference Proceedings. Tokyo: IEEE, 2000: 1085–1089. doi:10.1109/VETECS.2000.851292.
- [6] 孙尔京, 李学华, 姚媛媛. OFDM 系统中基于公平性的无线资源分配算法[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 34–38. (SUN Erjing, LI Xuehua, YAO Yuanyuan. Fairness-based wireless resource allocation algorithm in OFDM system[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2019, 34(1): 34–38.) doi: 10.16508/j.cnki.11–5866/n.2019.01.007.
- [7] WU Xiaolu, CHEN Yueyun, GAO Liqiang, et al. A utility-based OFDM resource allocation scheme for LEO small satellite system [C]// International Conference on Cyberspace Technology(CCT 2013). Beijing: IET, 2014: 68–73. doi:10.1049/cp.2013.2096.
- [8] ZHANG Xiaoning, WANG Siqiang. Adaptive sub-carrier spacing OFDM waveform in LEO satellite communication system[C]// 2021 IEEE the 21st International Conference on Communication Technology(ICCT). Tianjin, China: IEEE, 2021: 1372–1376. doi:10.1109/ICCT52962.2021.9657889.
- [9] 于正威. 基于 OFDM 的卫星通信系统设计与软件无线电实现[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020. (YU Zhengwei. Design of satellite communication system based on OFDM and realization of software radio[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020. doi:10.27248/d.cnki.gnjqc.2020.000567.
- [10] 李晓明, 王凤春. MIMO-OFDM 技术在无人机数据链中的仿真运用[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 42–46. (LI Xiaoming, WANG Fengchun. Simulation of MIMO-OFDM technique in UAV data link[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(5): 42–46.) doi: 10.7690/bgzdh.2014.05.013.
- [11] 康晨林. Ka 频段卫星通信信道上多用户 OFDM 自适应资源分配方案[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (KANG Chenlin. Multiuser OFDM adaptive resource allocation scheme in Ka-band satellite communication channel[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.) doi:10.7666/d.D728025.
- [12] 刘杉, 江卫民, 文郑杰, 等. Ka 频段卫星动中通链路雨衰预测与对策分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(4): 259–263. (LIU Shan, JIANG Weimin, WEN Zhengjie, et al. Rain attenuation prediction and countermeasures analysis for Ka-band SOTM link[J]. Radio Engineering, 2021, 51(4): 259–263.) doi:10.3969/j.issn.1003–3106.2021.04.001.
- [13] 宋腾辉. 高铁场景下 OFDM/MIMO 系统多普勒频偏估计算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (SONG Tenghui. Study on Doppler frequency shift estimation of OFDM/MIMO system in high-speed railway scenario[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2016.) doi:10.7666/d.Y3126019.
- [14] 3GPP. Numerology evaluation results for high speed scenario[Z]. 2016: R1–166939.
- [15] 毛兴. 卫星 OFDM 系统的同步与接入技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. (MAO Xing. Research on synchronization and access technologies for satellite OFDM systems[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001565.
- [16] 孙明, 曹伟, 李大辉, 等. 保证公平的最大化 OFDMA 系统容量策略[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1175–1182. (SUN Ming, CAO Wei, LI Dahui, et al. Strategy of maximizing capacity of OFDMA system for ensuring fairness[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1175–1182.) doi:10.13195/j.kzyjc.2018.1221.
- [17] 孟恩同, 于季弘, 卜祥元, 等. 低轨卫星高能载波功率资源联合调度算法[J]. 空间电子技术, 2022, 19(2): 16–22. (MENG Entong, YU Jihong, BU Xiangyuan, et al. Energy efficient scheduling for subcarrier and power resources in LEO satellite systems[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(2): 16–22.) doi:10.3969/j.issn.1674–7135.2022.02.003.

- [18] 周凯福,程伟,窦立超,等. 一种低复杂度的OFDM自适应比特功率分配方法[J]. 空军预警学院学报, 2019,33(3):212-215. (ZHOU Kaifu, CHENG Wei, DOU Lichao, et al. A low complexity OFDM adaptive bit power allocation method[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2019,33(3):212-215.) doi:10.3969/j.issn.2095-5839.2019.03.012.
- [19] 高浩,李学华,姚媛媛. 基于分簇的多用户OFDM自适应资源分配方案[J]. 电子技术应用, 2019,45(3):63-66,75. (GAO Hao, LI Xuehua, YAO Yuanyuan. Multi-user OFDM adaptive resource allocation research based on clustering idea[J]. Application of Electronic Technique, 2019,45(3):63-66,75.) doi:10.16157/j.issn.0258-7998.182693.
- [20] 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.

作者简介:

张美蓉(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信. email:zhangmeirong1999@163.com.

张更新(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天地一体化网络、卫星物联网.

张晨(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化信息网络.

(上接第974页)

- [17] 蒋均,陆彬,何月,等. 140 GHz基于CPWG单平衡基波混频GaAs集成电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):369-373. (JIANG Jun, LU Bin, HE Yue, et al. 140 GHz single-balance fundamental mixer design based on CPWG GaAs IC[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):369-373.) doi:10.11805/TKYDA201803.0369.
- [18] 谢振超,李秀伟,姚崇斌,等. 地球静止轨道微波辐射计技术[J]. 上海航天, 2018,35(2):20-28. (XIE Zhenchao, LI Xiuwei, YAO Chongbin, et al. Research on geostationary orbit microwave radiometer technology[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(2):20-28.) doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.003.
- [19] 吴量. 微波辐射计稳定性的改进研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012. (WU Liang. Research on improvements of microwave radiometers stability[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2012.) doi:10.7666/d.D230289.
- [20] SEMENOV A D, HUBERS H W, RICHTER H. Superconducting hot-electron bolometer mixer for terahertz heterodyne receivers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003,13(2):168-171. doi:10.1109/TASC.2003.813672.
- [21] RISACHER C, BELITSKY V. Low noise cryogenic IF-amplifiers for super heterodyne radioastronomy receivers[C]// The 13th International Symposium on Space Terahertz Technology. Cambridge: Harvard University, 2002:391-400.

作者简介:

王文伟(1982-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为无源遥感微波载荷接收机系统. email:www804@163.com.

王昊(1983-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为毫米波器件设计.

钟海文(1974-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹测试系统设计.

李贝贝(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹准光系统设计.