

# 基于 MATLAB 的卫星通信资源分配 教学软件设计

张 晨, 刘子威

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘 要:**系统资源的优化分配是提升卫星通信系统容量和用户业务满足度的重要技术手段之一,也是卫星通信课程教授的重点内容。影响卫星通信系统资源分配的因素复杂且动态变化,但现有的课程教学大多以静态条件下的资源分配为主,也很难建设以实物为主的卫星通信教学环境,而且传统的理论教学直观性不强,不利于学生掌握相关知识点。为直观演示多种条件变化下的卫星资源分配,提升学生的学习兴趣,基于 MATLAB 软件利用图形用户界面工具设计开发了卫星资源动态分配教学演示软件,涵盖用户业务需求、链路雨衰、频谱资源等条件变化下的资源分配,并进一步设置了不同的资源分配算法进行对比分析。该教学软件可交互性强、直观性强、架构灵活,并在设计过程中贯彻组件化、模块化、接口化思想。实际教学效果表明,该软件对卫星资源分配的仿真效果良好,可以更好地辅助教师授课、帮助学生掌握知识点。

**关键词:**卫星通信课程;卫星资源分配;虚拟仿真;教学软件;可视化

中图分类号:TP317;G434

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2024)04-0187-06

doi:10.20165/j.cnki.ISSN1673-629X.2024.0028

## Design of Teaching Software Based on MATLAB for Resources Allocation of Satellite Communication

ZHANG Chen, LIU Zi-wei

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The optimal allocation of system resources is one of the important methods to improve the capacity of satellite communication system and the satisfaction of users' requirement, which is also the key content of satellite communication course. The factors affecting the resource allocation of satellite communication are complex and dynamic, but the existing teaching content mainly focuses on the resource allocation in the static conditions. It is also difficult to build a teaching environment for satellite communication based on physical equipment and the traditional theoretical teaching is not intuitive. In order to visually demonstrate the allocation of satellite resources under various conditions and enhance students' learning interest, a teaching demonstration software for dynamic allocation of satellite resources was designed and developed by using graphical user interface tools based on MATLAB software, including user's traffic requirements, rain attenuation, spectrum resources and other conditions. Furthermore, different resource allocation algorithms are set up for comparative analysis. The teaching software is highly interactive, intuitive, flexible, and carries out the idea of componentization, modularization, and interface in the design process. The actual teaching results show that the software has a good simulation effect on satellite resource allocation, and can better assist teachers in teaching and help students master knowledge points.

**Key words:** satellite communication course; satellite resource allocation; virtual simulation; teaching software; visualization

### 0 引 言

卫星通信课程是通信工程、电子信息、航空航天等专业的本科高年级和研究生的重要专业课程,综合了航天技术、无线通信技术、信号处理技术、天线技术等

相关知识,涉及多门交叉学科,且内容较为抽象<sup>[1]</sup>。同时,随着卫星互联网和卫星物联网的发展,系统资源的优化分配作为提升卫星通信系统容量的重要技术手段之一<sup>[2]</sup>,也成为卫星通信课程教授的重点内容。卫星

收稿日期:2023-08-18

修回日期:2023-12-20

基金项目:国家自然科学基金(61901230);南京邮电大学基金(NY219121)

作者简介:张 晨(1985-),男,高级工程师,博士,硕士,通讯作者,研究方向为卫星通信、卫星资源调度;刘子威(1989-),男,副教授,博士,硕士,研究方向为卫星通信、信号分离、同频干扰分析。

通信课程的教学方式多采用“课堂理论教学+实际设备实验”的形式开展<sup>[3-4]</sup>。但影响卫星通信资源分配的因素复杂且动态变化,而现有的课程教学以静态环境下的资源分配为主,另一方面卫星通信的设备大多无法用于现场实验教学<sup>[5]</sup>,使得学生无法直观地学习多种条件变化下的卫星资源动态优化分配,因此学习积极性不高,也无法对知识点进行高效的学习和掌握。由此可见,基于直观性、可交互性的原则,借助虚拟化仿真、可视化等技术,开发一套卫星通信资源动态分配教学演示软件尤为迫切。

近年来,随着虚拟仿真技术的发展以及新工科对人才培养的要求,将虚拟可视化的仿真教学系统引入高校本科教学和实践,已成为教学方法改革的新趋势<sup>[6-7]</sup>。为改进卫星通信课程的教学方法,提升学生的学习兴趣,该文介绍了一种卫星资源动态分配教学演示软件设计方法。该软件基于 MATLAB 软件环境开发,利用图形用户界面工具(Graphical User Interface, GUI)<sup>[8-10]</sup>,可对链路雨衰、用户业务需求、频谱资源等条件变化下的卫星资源动态分配进行直观的原理讲解和教学演示。该教学软件界面友好,可交互性强,对卫星资源分配的仿真效果良好、直观性强,使得课堂授课更加形象化和具体化。并且通过虚拟化仿真,一定程度上解决了实际卫星通信设备难以开展实验的问题,可以更好地辅助教师授课,帮助学生掌握卫星资源动态分配相关知识点,从而加深对卫星通信课程的认识和理解。

## 1 卫星通信课程教学现状分析

然而对于普通高校而言,建设线下以实物为主的卫星通信教学环境,存在以下难点:

(1)许可困难。卫星通信主要用于国防通信、广播电视、内部专网及部分民用、商业应用。由于业务的特殊性,这些卫星地球站一般不对社会开放。另一方面,国内对卫星通信地球站是按空间电台进行管理,采取严格的审批制度。以教学目的取得卫星通信地球站的许可非常困难,导致高校很难部署卫星通信地球站。

(2)费用昂贵。建设卫星通信实物实验环境,除了地球站本身的设备费用外,通常还需要有专用的卫星天线安装场地、机房、信号处理设备、操作人员和供电、防雷、电磁屏蔽等配套建设,导致建设成本很高。同时租用卫星通信链路转发器的费用也非常高,高昂的成本导致难以开展线下实物的卫星通信教学和实验。

(3)复杂度高、可视化困难。卫星的无线通信资源分配是一个理论性和工程性都很强的系统设计工作,其性能的优劣直接影响到通信质量和用户的服务

体验。然而影响卫星通信资源分配的因素复杂,包括用户优先级、业务需求、频谱资源、降雨衰减等,并且这些因素也在随时间不断变化。所以在课堂教学的过程中,学生很难直观地理解各种因素对资源分配,以及最终导致的对通信服务质量的影响。

综合以上,对于普通高校而言,很难开展面向实际设备的卫星通信资源分配的教学和实验环节,从而限制了学生对卫星通信理论和工程的相关知识点理解与掌握。而通过可视化的教学演示软件,能够让学生直观地学习并掌握卫星资源分配的机理,理解各种复杂因素的变化对通信服务质量的影响,并学会如何通过资源的动态调度来满足用户的业务需求。

## 2 卫星资源动态分配模型

随着天地一体化信息网络的建设,大容量、高速率、广覆盖成为卫星通信系统的发展趋势<sup>[11]</sup>。传统的固定式资源分配方法,已不能满足当前卫星通信系统的需求,必须将系统资源进行按需分配,才能提高用户的服务满意度和系统的吞吐量。然而影响卫星通信资源分配的因素复杂,并且这些因素在时空二维上也在动态变化,因此必须建立多种条件变化下的资源分配模型,如图 1 所示,主要因素包括用户业务需求的多样化和分布不均性、链路雨衰的影响,以及可用的频谱资源等。以下行链路为例,假设用户的业务需求速率为  $R$ ,则资源动态分配要使得用户实际传输速率  $C$  尽可能地满足业务需求,即  $C$  尽可能地接近或等于  $R$ 。

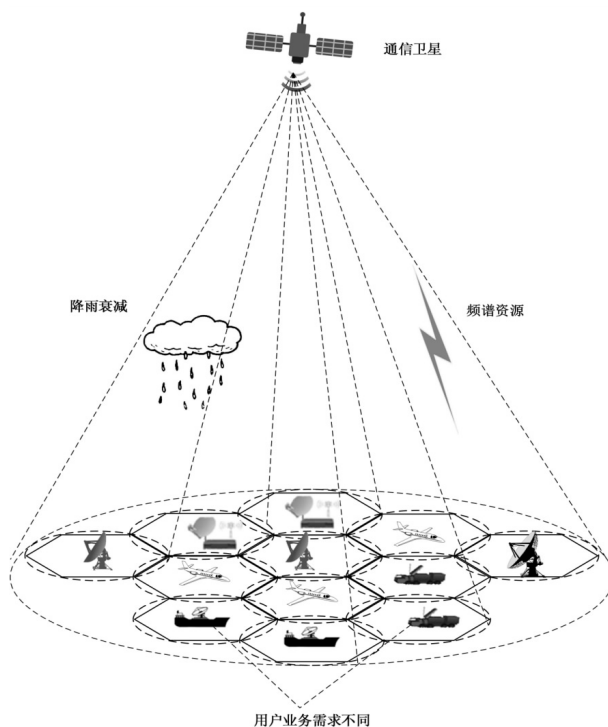


图 1 卫星资源动态分配系统模型

根据香农定律,实际用户可达的传输速率  $C$  为:

$$C = B * \log_2(1 + \text{SNR}) = B * \log_2\left(1 + \frac{PG_R G_T}{N_0 L_R L_p}\right) \quad (1)$$

其中,  $B$  为系统给该用户分配的带宽,  $P$  为发射功率,  $G_R$  和  $G_T$  分别为发射天线和接收天线的增益,  $N_0$  为噪声功率,  $L_R$  为降雨衰减,  $L_p$  为传输路径损耗<sup>[12]</sup>。

从以上分析可以看出,除去相对固定的参数,业务需求速率  $R$ 、系统分配的频谱带宽  $B$ 、降雨衰减  $L_R$  对卫星资源分配的影响很大,因此必须在教学演示软件系统中重点考虑。

### 3 教学演示软件总体设计

通过以上分析,构建的卫星资源动态分配教学演示软件总体架构如图2所示。首先,模拟各用户需求的业务速率、QoS 等级,以及用户优先级,从而建立业务模型,作为卫星资源动态分配的驱动元素。其次,通过对不同地理位置的降雨衰减进行预测,从而建立链路质量模型,作为影响接收信号信噪比的因素。再次,利用频谱感知的结果对当前的频谱资源进行管理,作为影响频谱资源的因素。以上影响因素作为资源分配的输入,并且通过最大最小公平准则和业务优先级准则,两种不同的算法对资源进行动态分配。最后,通过可视化界面进行分配结果和系统性能的呈现和评估。

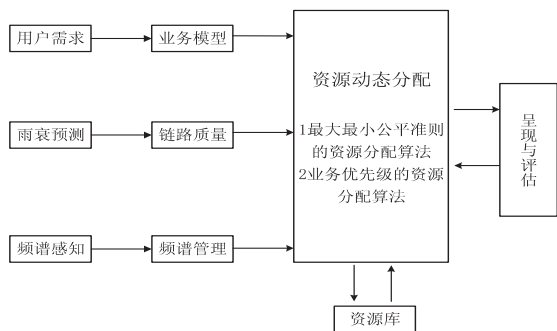


图2 卫星资源动态分配教学软件总体架构

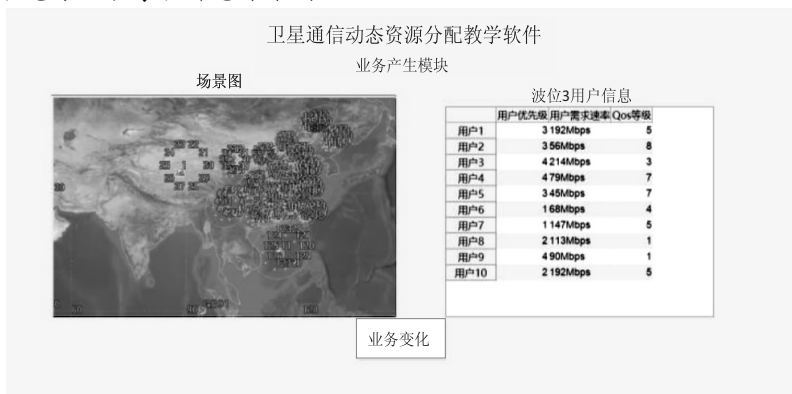


图3 业务产生模块软件界面

### 4.2 雨衰预测模块

降雨衰减是卫星通信链路环境中影响通信性能和资源分配的重要因素。结合卫星通信授课的特点,该

## 4 功能模块的设计与实现

卫星通信课程中关于资源动态分配的知识点,着重介绍了业务和用户等级、降雨衰减、频谱资源的因素,以及不同的资源分配算法对系统性能和资源分配结果的影响。因此,相应的卫星通信资源动态分配教学演示系统主要包括业务产生模块、雨衰预测模块、频谱管理模块、资源动态分配和结果分析模块。每个功能模块主要由后台算法、结果显示、性能评估等程序组成。并且都具备可视化的交互界面,可输入或选择参数,对处理结果进行展示和分析,帮助学生掌握相关知识点,理解影响卫星资源分配的主要因素,以及不同的卫星资源分配算法。下面分别介绍各功能模块的主要算法及可视化界面设计。

### 4.1 业务产生模块

卫星通信服务的用户类型多样,其业务需求的速率和 QoS 等级也各不相同。首先,参考泊松业务模型,建立各用户不同的业务需求速率。其次,根据用户的优先级,定义4个等级(从高到低为等级1到等级4)。最后,参考欧洲电信标准化协会(ETSI)对 QoS 的相关定义,将业务的 QoS 需求划分为8个等级(从高到低定义为等级0到等级7)。从业务需求速率、用户优先级、业务 QoS 需求等级三个维度,对用户的业务进行建模,并且具有一定的随机性,用于刻画用户业务分布的不均性。另一方面,通过2D场景图,对卫星覆盖区域、波位划分和用户在波束中的位置分布进行直观展示,帮助学生建立卫星通信的直观概念。业务产生模块软件界面如图3所示。

在教学过程中,学生可以通过场景图观察各波位的划分、波位内用户的分布;并且通过右侧的用户信息列表,观察并记录各波位内用户的优先级、业务需求速率和 QoS 等级;点击业务变化按钮,观察业务的变化情况。

系统采用基于“事件-需求”的雨衰预测模型<sup>[13]</sup>,生成短期降雨衰减时间序列,该模型可根据给定的降雨持续时间、降雨衰减最大值与相对时刻、载波频率等参



数,模拟一次降雨过程的雨衰的动态变化。其基本原理<sup>[13]</sup>是:在已知  $t - t_1$  和  $t + t_2$  两时刻的雨衰值  $L_R(t - t_1)$  和  $L_R(t + t_2)$  的前提下,可通过条件概率  $p(L_R(t) | L_R(t - t_1), L_R(t + t_2))$  计算出  $t$  时刻的雨衰值  $L_R(t)$ , 其中  $L_R(t) | L_R(t - t_1), L_R(t + t_2)$  服从对数正态分布,

因此可以在两个雨衰值之间进行内插得到颗粒度更高的雨衰序列。另一方面,可对不同区域设定不同的雨衰参数,进行波束间不同降雨衰减的动态模拟,作为卫星资源分配的输入。该功能模块的软件界面如图 4 所示。

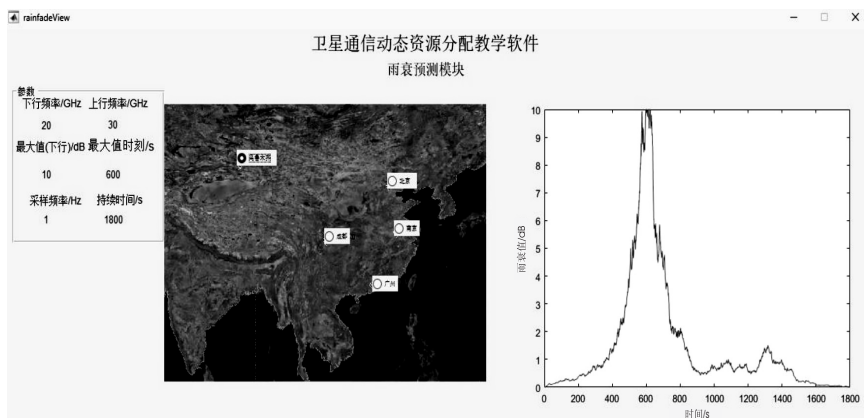


图 4 雨衰预测模块软件界面

在教学过程中,结合教学知识点,学生可以设置不同的频率、降雨时间、降雨位置等参数,产生并观察记录相应的降雨衰减。

#### 4.3 频谱资源管理模块

频谱资源共享与灵活调度是提升系统性能的有效手段。然而在天地一体化信息网络中,受频率和空间资源的限制,卫星通信系统与地面系统之间、高低轨卫星通信系统之间的频谱共享,必然会造成系统内和系统间动态变化的同频干扰,影响可利用的频谱资源<sup>[14]</sup>。实际卫星通信系统中,可采用频谱感知技术,分析频谱占用状态,挖掘可利用的频谱资源,并避免同频的干扰。在本教学软件中,将频谱感知的结果进行瀑布图的分析 and 展示,如图 5 所示,并在后台对频谱占用情况进行实时分析,剔除严重干扰的频段,将可用的频带作为动态资源分配的资源库。

在教学过程中,让学生结合公式 1,理解频谱带宽对实际用户可达的传输速率的重要影响;在教学软件中,选择不同波位,观察并记录可用带宽数值。

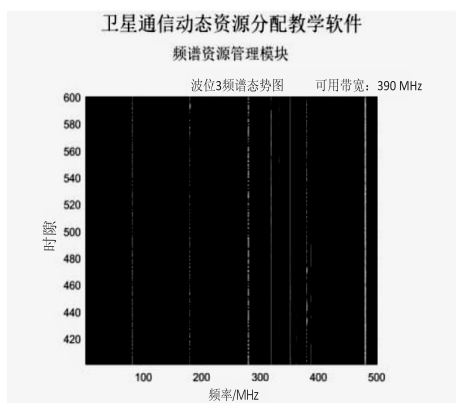


图 5 频谱资源管理模块软件界面

#### 4.4 资源动态分配和结果分析模块

资源动态分配模块主要根据前面 3 个功能模块的输入:用户的业务需求(包括业务速率、QoS 等级、用户的优先级等)、降雨衰减、频谱资源等因素,根据不同的资源分配准则,进行资源的动态分配。本教学软件采用以下两种资源分配算法:

##### (1) 基于最大最小公平准则的资源分配算法。

最大最小公平准则是一种简单而且有效的资源分配公平性准则,基本思想如下<sup>[15]</sup>:对于所有用户平等对待,在每次资源分配时,将系统资源平均分配给各个用户。在这次资源分配完成后,如果有用户分配到的资源大于自己的需求,则将多余的资源再次在没有满足需求的用户之间,继续遵循公平性准则进行分配,直到全部资源分配完成。

最大最小公平性准则的优点是能够保证各用户之间的资源分配的公平性;但缺点也较为明显,对于系统资源需求较少的用户,其业务申请可以得到完全满足,而对于资源需求较多的用户,可能存在分配到的资源不能满足业务基本需求的情况<sup>[15]</sup>。

##### (2) 基于业务优先级的资源分配算法。

另一方面,区别于基于公平准则的分配算法,综合考虑用户的优先程度、业务需求的轻重缓急等因素,根据用户的优先级、业务 QoS 等级进行排序,优先满足等级高的业务需求,形成基于业务优先级的资源分配算法。

两种算法的具体分配流程如图 6 所示。

以上两种资源分配算法的准则和侧重点各不相同,可在软件界面上选择不同的算法,对资源分配结果进行对比分析。并且通过软件界面上系统的容量分

析、用户接入分析、业务满意度分析子模块,观察业务需求、降雨衰减、频谱资源的变化,对资源动态分配结果的影响,如图7所示。

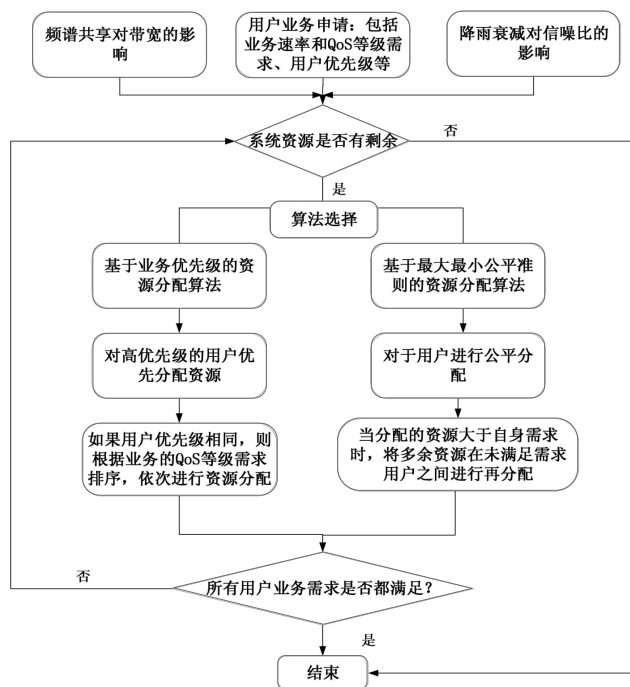


图6 资源分配算法流程

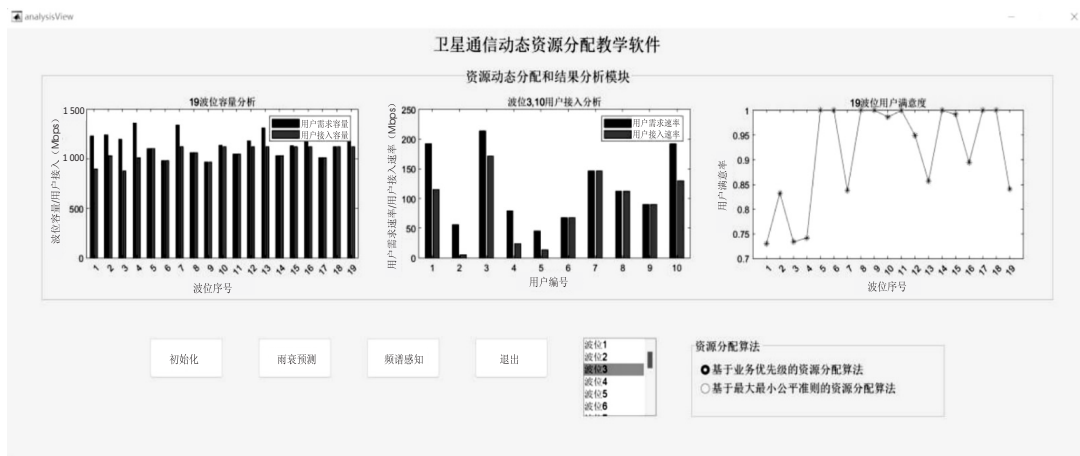


图7 资源分配模块软件界面

在教学过程中,结合不同资源分配算法的特点,让学生记录并对比不同的资源分配算法所得出的资源分配结果与系统性能差异。

## 5 教学设计与应用案例

利用该文提出的卫星通信动态资源分配教学软件,在卫星通信课程的初步教学设计和应用案例如下:

(1)结合卫星通信教材和香农定理的有关内容,讲解公式1卫星通信场景下实际用户可达的最大传输速率,并分析业务需求速率 $R$ 、系统分配的频谱带宽 $B$ 、降雨衰减 $L_R$ 、用户优先级和业务等级等因素对卫星资源分配的影响。

(2)启动业务产生模块,观察波位和用户的位置

分布,查看并记录各波位内用户的业务需求速率、业务等级和用户优先级。

(3)启动雨衰预测模块,选取不同的波位,频点、降雨时间和强度等参数,产生所需的降雨衰减随时间变化的序列。

(4)启动频谱资源管理模块,选取不同波位,观察并记录可用的总带宽值。

(5)在资源动态分配和结果分析模块中,选定资源分配算法准则,观察并记录各波位、各用户的容量、接入情况、业务满意度情况。

(6)在业务生成、雨衰预测、频谱管理软件模块中,调整相应的参数,观察并记录这些因素动态变化之后,对资源分配以及最终导致的各用户实际可达速率

的影响。

(7)保持各种输入参数不变,调整不同的资源分配算法准则(公平准则和优先级准则),观察并记录不同资源分配算法准则对资源分配结果的影响。

最终通过以上教学设计和应用实例,充分利用卫星通信动态资源分配教学软件的可视化优势,帮助学生理解并掌握资源分配的难点。

课堂的学生反馈表明,借助本教学软件能够系统地掌握卫星通信课程中关于资源动态分配的因素,以及各种因素变化后对系统性能的影响,可以帮助学生理论结合实际地理解卫星通信系统的设计。另一方面,在期末考试的成绩统计分析表明,关于资源动态分配知识点的得分率相比往年有了较大的提升。

## 6 结束语

以卫星通信教学中遇到的实际问题作为切入点,对教学方法和教学形式进行了改进和革新。主要阐述了一种基于 MATLAB 图形用户界面工具的卫星资源动态分配教学演示软件及其设计方案,可直观展示链路雨衰、用户业务需求、干扰强度等条件变化下的资源分配。该教学软件对卫星资源分配的仿真效果良好、直观性强,可以更好地辅助教师授课、帮助学生掌握知识点,可应用于理论教学的课内演示以及实践教学的虚拟仿真实验。该教学软件系统架构灵活,并在设计过程中贯彻组件化、模块化、接口化思想,以便进一步与其他卫星通信课程教学软件进行联合。

### 参考文献:

- [1] 张 剑,朱银霞,胡 婧,等.科研嵌入式教学模式“金课”设计——以“卫星通信”课程为例[J].工业和信息化教育,2022(6):5-8.
- [2] 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].中国空间科学技术,2021,41(5):85-94.
- [3] 滕君华,林 彬,闫秋娜,等.卫星通信校外实践基地建设探索与实践[J].实验室研究与探索,2020,39(7):154-157.
- [4] 王 磊,胡铁乔.《卫星通信》课程改革的探索与实践[J].武汉大学学报:理学版,2012,58(S2):74-76.
- [5] 张峰干,井亚鹊,金 伟,等.卫星通信课程实验教学研究[J].实验室研究与探索,2017,36(8):173-175.
- [6] 孙丽华,甄 然,孙会琴,等.新工科背景下电气类专业虚拟仿真实验研究与探索[J].中国现代教育装备,2022(19):77-80.
- [7] 邹 领,陈义明.“通信原理”课程教学探索与实践——基于 SPOC 和虚拟仿真实验[J].物联网技术,2022,12(4):144-146.
- [8] 马崇霄,王 枫,杨 英,等. MATLAB GUI 在《信号与系统》教学中的应用探究[J].科技风,2021(2):71-72.
- [9] 李 俊,张淑玲,帅 晶.基于 Matlab GUI 界面的数字信号处理辅助教学系统[J].信息通信,2020(8):283-284.
- [10] 刘婉妮.基于 MATLAB 的“信号与系统”课程的可视化实验教学平台开发[J].微型电脑应用,2023,39(7):78-80.
- [11] 吴 巍.天地一体化信息网络发展综述[J].天地一体化信息网络,2020,1(1):1-16.
- [12] 夏克文.卫星通信[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [13] CARRIE G, LACOSTE F, CASTANET L. A new ‘event-on-demand’ synthesizer of rain attenuation time series at Ku-, Ka- and Q/V-bands[J]. International Journal of Satellite Communication and Network, 2011, 29:47-60.
- [14] 曲至诚.天地融合低轨卫星物联网体系架构与关键技术[D].南京:南京邮电大学,2020.
- [15] 张道柱.卫星通信网络中带宽资源管理技术研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2010.