



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

基于 LSTM 和启发式搜索的遥感卫星地面站天线智能调度方法研究

作者姓名: 孙文军

指导教师: 林友明 正高级工程师

黄 鹏 正高级工程师

中国科学院空天信息创新研究院

学位类别: 工学硕士

学科专业: 信号与信息处理

研 究 所: 中国科学院空天信息创新研究院

2020 年 6 月

Remote Sensing Satellite Ground Station Antenna Intelligent
Scheduling with LSTM and Heuristic Search

A Thesis Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of Science in Engineering

By

Sun Wenjun

Thesis Supervisor: Professor Lin Youming
Professor Huang Peng

Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences

June 2020

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密的学位论文在解密后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

遥感卫星地面站天线调度是解决遥感卫星数据接收天线资源不足和提高资源使用效率的有效途径。中国遥感卫星地面站自建站以来,卫星数据接收任务持续增多,积累了大量的天线调度数据,这些数据中隐含了反映实际地面站天线调度环境特点及调度规则的大量有效信息。为有效提高地面站天线利用率,以最大程度的完成卫星数据接收任务,论文提出了一种长短期记忆神经网络和启发式搜索相结合的地面站天线智能调度方法,充分利用了历史数据,避免了复杂的调度建模过程。主要研究内容和研究成果如下:

首先,分析地面站天线调度问题及其约束条件,使用数学语言描述了地面站天线调度问题,定义了数据联合接收和资源选择冲突两个地面站天线调度需要解决的问题,定义了接收成本函数。

其次,使用一般启发式搜索解决了地面站数据联合接收情况,即为卫星数据接收任务确定唯一地面接收站,避免了地面站接收天线资源浪费。

然后,使用长短期记忆神经网络和基于集束搜索思想的启发式搜索,解决了单地面站资源选择冲突。以中国遥感卫星地面站历史上天线调度数据作为数据集,使用长短期记忆神经网络从历史调度数据中提取地面站天线使用优先级特征,并与地面站天线现有优先级使用规则进行了对比分析。结果表明,从历史调度数据中提取的天线使用优先级特征能够综合反映地面站天线调度环境和调度规则,且具有更加精细的区分度,但是地面站天线使用优先级规则随着地面站天线资源的变动会有些微变化,因此该特征有一定的延迟性;当地面站天线资源变动时,地面站现有天线使用优先级规则会由工作人员及时调整,具有高时效性,但是人为制定的优先级规则具有一定的主观性,且区分度不明显。论文综合了两种优先级规则,给出了一种新的地面站天线使用优先级规则,该优先级规则在保证和地面站现有优先级规则一致的前提下,有效克服了地面站现有天线使用优先级规则的主观性,且具有较高的时效性和更精细的区分度。

最后,运用新的地面站天线使用优先级规则,为数据接收任务分配接收天线,得到初始调度方案,并使用基于集束搜索的启发式搜索方法消解初始方案中可能存在的资源选择冲突问题,得到实际可行的地面站天线调度方案。

实验分析表明，本文算法与结合启发式规则的遗传算法相比，有效利用了历史调度信息，提高了资源利用率；使用集束搜索求解简单，提高了计算效率，且本文算法求解结果和求解时间更加稳定。

关键词：遥感卫星，地面站天线调度，长短期记忆神经网络，启发式搜索，智能调度

ABSTRACT

It is an effective way to solve the shortage of remote sensing satellite data receiving antenna resources and improve the efficiency of resource usage with the scheduling of remote sensing satellite ground station antennas. Since the establishment of the China Remote Sensing Satellite Ground Station(CRSSGS), the number of satellite data receiving tasks have continued to increase, and a large amount of antenna scheduling data has accumulated, which implies a large amount of information reflecting the actual ground station antenna scheduling environment and scheduling rules. In order to complete satellite data reception tasks and improve the utilization of ground station antennas effectively, the paper proposes an intelligent scheduling method for ground station antennas which combines the long short term memory (LSTM) neural networks and heuristic search, making full use of historical data and avoiding complex scheduling model. The main research contents and results are as follows:

Firstly, the paper analyzes the ground station antenna scheduling problem and its constraints, used mathematical language to describe the antenna scheduling problem of the ground station, defined the problems that need to be solved for two ground station antenna scheduling problems: data joint reception and resource selection conflict, and defines the reception cost function.

Secondly, the general heuristic search is used to solve the joint reception of ground station data, which identify the only ground receiving station for satellite data receiving tasks, and avoids the waste of ground station receiving antennas.

Thirdly, to solve the resource selection conflict in every ground station, the paper proposed an intelligent scheduling method with LSTM neural network and beam search. The LSTM neural network was used to extract the priority features of the ground station antenna from the historical antenna scheduling data in CRSSGS, and then the features are compared with the existing priority usage rules of the

ground station antenna. It shows that features and the rules have their own characteristics. The antenna usage priority features extracted from the historical scheduling data can comprehensively reflect the antenna scheduling environment and scheduling rules of the ground station, and they have finer degree of distinction, but the ground station antennas usage priority rules change slightly because of the changes in the ground station antenna resources, so that the features have a certain delay. When the ground station antenna resources change, the staff of CRSSGS will adjust the existing antennas usage priority rules of the ground station in time, so that the existing rules are highly time-sensitive, but the artificially established priority rules are subjective and the distinction is not obvious. The thesis combines the two priority rules and gives a kind of new usage priority rules of ground station antennas. The new priority rules not only ensure the consistency with the existing priority rules, but also are more subjective and finer differentiation.

Finally, the new usage priority rules of ground station antenna are used to allocate receiving antennas for every data receiving task and obtain the initial scheduling scheme. Then beam search is used to resolve the resource selection conflicts that may exist in the initial scheme, and obtain a feasible ground station antenna scheduling scheme.

Experimental analysis shows that compared with the genetic algorithm combined with heuristic rules, the algorithm in this paper effectively uses historical scheduling information and improves the resource utilization rate; the use of beam search is more simple and improves the calculation efficiency, and the results and the computation time of the algorithm in this paper are more stable.

Key Words: Remote Sensing Satellite; Ground Station Antennas Scheduling; Long Short Term Memory(LSTM) Neural Network; Heuristic Search; Intelligent Scheduling

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	V
图 目 录	VIII
表 目 录	IX
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 论文研究内容	2
1.3 论文组织结构	2
1.4 本章小结	3
第 2 章 国内外研究现状	4
2.1 调度模型	4
2.2 调度算法	5
2.3 数据驱动的调度方法	6
2.4 研究现状总结	9
2.5 本章小结	9
第 3 章 地面站天线资源调度问题	10
3.1 卫星数据接收过程	10
3.2 地面站天线调度约束分析	11
3.2.1 任务约束	11
3.2.2 时间窗口约束	12
3.2.3 地面站天线约束	12
3.3 地面站天线调度问题描述	13
3.3.1 地面站天线调度问题表示	13
3.3.2 数据联合接收和资源选择冲突	14

3.3.3	调度方案表示及成本	17
3.4	本章小结	18
第 4 章	遥感卫星地面站天线智能调度	19
4.1	调度方法流程设计	19
4.2	LSTM 模型	19
4.2.1	历史调度数据	20
4.2.2	数据预处理	21
4.2.3	模型结构	23
4.2.4	模型训练	27
4.3	地面站天线调度	33
4.3.1	调度流程	33
4.3.2	数据联合接收处理	34
4.3.3	资源选择冲突消解	35
4.4	本章小结	38
第 5 章	实验结果与分析	39
5.1	案例规模	39
5.2	LSTM 特征提取与分析	40
5.3	求解时间和接收成本	44
5.4	典型案例分析	46
5.4.1	联合接收处理	46
5.4.2	资源选择冲突	49
5.5	本章小结	54
第 6 章	总结与展望	56
6.1	研究成果总结	56
6.2	论文创新点	56
6.3	存在的问题及工作展望	57
参考文献	58
附 录	63
致 谢	70

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	72
-------------------------------	----

图 目 录

图 3.1	地面站接收记录卫星数据	10
图 3.2	卫星数据接收过程	11
图 3.3	接收任务时间关系	15
图 4.1	调度方法流程	19
图 4.2	LSTM 模型训练	20
图 4.3	数据预处理的流程图	21
图 4.4	词汇个数为 n , 词向量维度为 K 的词汇表	23
图 4.5	循环神经网络结构图	24
图 4.6	LSTM 神经元结构	25
图 4.7	LSTM 模型结构图	27
图 4.8	单个数据接收任务在网络中的维度变化	28
图 4.9	损失函数变化曲线图	33
图 4.10	地面站天线调度方法流程	34
图 4.11	数据联合接收处理流程图	35
图 4.12	束搜索过程	37
图 4.13	资源选择冲突处理流程图	38
图 5.1	接收成本折线图	46
图 5.2	案例求解时间折线图	46

表 目 录

表 4.1	数据样例	21
表 4.2	不同长短期记忆神经网络模型结构对比	32
表 5.1	地面站天线资源	39
表 5.2	案例规模	40
表 5.3	LSTM 模型准确率	41
表 5.4	天线使用优先级规则对比（单位:颗）	42
表 5.5	结果对比	45
表 5.6	案例 14:任务 1~16 卫星数据联合接收处理结果	48
表 5.7	案例 10:2019 年 9 月 10 日密云站部分接收任务调度结果	49
表 5.8	案例 15:2019 年 9 月 15 日密云站部分接收任务调度结果	50
表 5.9	案例 1:2019 年 9 月 13 日喀什站接收任务调度结果	51
表 5.10	案例 6:2019 年 9 月 13 日喀什站部分接收任务调度结果	52
表 5.11	案例 14:2019 年 9 月 16 日三亚站部分接收任务调度结果	53
表 5.12	案例 15:2019 年 9 月 15 日三亚站部分接收任务调度结果	54
附表 1	密云站天线使用优先级规则对比	63
附表 2	喀什站天线使用优先级规则对比	65
附表 3	三亚站天线使用优先级规则对比	67

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

遥感卫星对地面目标的观测数据，必须下传到地面，由地面站接收系统接收后，才得以处理和应用到不同领域。遥感卫星数据接收的前提是遥感卫星和地面站接收设备之间具有几何可见时间窗口。遥感卫星地面接收资源调度是在几何可见时间窗口内，为数据接收任务分配满足约束的地面资源。^[1-3]地面站资源调度是指在考虑地面站资源约束条件下，为卫星数据接收任务统筹分配地面站接收资源和接收时间段，避免卫星数据接收任务被重复接收和接收资源未能充分利用的情况，从而最大程度地保证数据完整接收。当遥感卫星地面站收到卫星数据接收任务时，地面站在接收资源调度的约束和假设条件下，使用一定的算法为卫星数据接收任务统筹分配接收时间窗口和地面接收资源，消除接收资源冲突及任务时间重叠，从而更为合理、均衡的使用地面站接收资源，最大限度的满足用户对遥感卫星数据的需求。其中，地面站接收资源主要包括地面接收天线、信道和记录器。

遥感卫星相比于其他信息获取方式，能够更加准确、快速、大面积、低成本的获取地面信息，广泛应用于农业估产、灾害监测、地质勘查、海洋探测、气象预报、军事侦查等领域。随着卫星在军用、民用中的不断深入发展，卫星种类不断增多、功能不断增强、数量不断增长，每天卫星数据接收任务数量也日益增多，而相对有限的地面站资源难以满足接收需求。因此，需要对地面站接收资源进行合理调度，以提高资源使用效率，解决接收资源不足，保证数据接收任务顺利完成。目前，国内外主要的调度模型有数学规划模型、约束满足模型，调度算法主要有确定性算法和启发式算法。随着卫星数据接收任务持续增多，地面站资源调度模型和算法也越来越复杂，这些传统的建模方法在进行调度建模时需对实际复杂调度问题进行简化并附加较多的假设条件，这些人为的假设降低了实际复杂度，从而造成调度方案可靠性较低。^[4-5]以中国遥感卫星地面站的站网调度系统为例，目前采用的模型为约束满足模型，寻优算法采用的是结合启发式规则的遗传算法（后文简称为“原算法”），在建立模型时需要

实际复杂调度环境进行简化，这导致了调度系统给出的调度结果，有些需要人工干预加以调整，以得到更合理的资源安排。

随着地面站卫星数据接收任务调度业务的不断发展，中国遥感卫星地面站已积累了大量的卫星数据接收任务调度历史数据。这些数据是在遗传算法给出可行方案的情况下，经过人工进一步调整后，给出更优的地面站资源调度方案，因此数据中隐含了反映实际地面接收资源信息和调度规则。综上，论文尝试使用数据驱动的方法来解决遥感卫星地面接收天线资源调度问题，即从历史调度数据中提取天线使用优先级特征，以改善地面站现有天线使用优先级规则，从而有效解决地面站天线调度问题，提高调度精度和求解效率。

1.2 论文研究内容

论文使用数据驱动的方法来解决遥感卫星地面接收天线资源调度问题，从而为地面站数据接收任务合理分配接收天线，并提高地面站天线利用率和算法计算效率。主要研究内容分为以下三点：

(1) 长短期记忆神经网络模型提取地面站天线使用优先级特征。利用中国遥感卫星地面站现有的历史调度数据，使用长短期记忆神经网络从历史调度数据中提取天线使用优先级特征，并与地面站现有天线使用优先级规则进行对比分析。

(2) 使用一般启发式搜索处理数据联合接收，为数据接收任务确定唯一的地面接收站。

(3) 使用集束搜索的启发式搜索，为每个地面站的数据接收任务确定接收天线。综合利用长短期记忆神经网络提取的地面站天线使用优先级特征和地面站现有天线使用优先级规则，给出一种新的天线使用优先级规则，结合该规则，给出初始调度方案，并使用启发式搜索消解初始方案中可能存在的资源选择冲突，给出实际可行的地面站天线调度方案。

1.3 论文组织结构

论文的组织结构如下：

第 1 章，绪论。主要介绍了本论文的研究背景、选题意义，阐述了本论文的研究内容、章节安排。

第 2 章，国内外研究现状。详细阐述了国内外在遥感卫星地面资源调度领

域的调度模型和调度算法研究进展，介绍了并总结了数据驱动的调度方法研究现状。

第 3 章，地面站天线资源调度问题。首先，详细介绍了卫星数据接收过程；其次，分析了地面站天线调度的约束条件；最后，对该调度问题的输入输出进行了抽象描述，定义了数据联合接收、资源选择冲突和调度方案接收成本。

第 4 章，遥感卫星地面站天线智能调度。首先，设计了本论文的调度方法流程；其次，详细介绍了历史调度数据来源、数据预处理方法；然后，详细介绍了长短期记忆神经网络模型结构、训练方法和选择策略；最后，详细介绍了本论文数据联合接收和资源选择冲突问题的处理方法。

第 5 章，实验结果与分析。首先，介绍了中国遥感卫星地面站现有接收天线资源分布及数量，选取 15 组实验案例，并介绍了案例规模；其次，给出长短期记忆循环神经网络提取的天线使用优先级特征，并与地面站现有天线使用优先级规则进行了对比分析，综合两者优点，给出了一种新的天线使用优先级规则；然后，结合该优先级规则，使用启发式搜索给出每个案例的调度方案；最后，对比分析了本论文提出的地面站天线调度方法与结合启发式规则的遗传算法，在接收成本和模型求解效率两个方面的优劣。

第 6 章，总结与展望。总结了论文研究过程和成果，归纳了论文创新点和目前尚存在的问题，给出了未来的研究方向。

1.4 本章小结

本章主要阐述了论文的研究背景和选题意义，介绍了论文的研究内容以及章节安排。

第2章 国内外研究现状

卫星数据接收任务调度通常被看作一个复杂的组合优化问题,其涉及到多颗卫星、多个地面站、多个时间窗和多个调度约束条件。由于地面站资源和数据接收时间窗口有限,数据接收任务资源选择冲突也随着任务数量的增多而加剧。这使卫星数据接收任务调度问题变成了具有 NP-Hard 性质的组合优化问题,随着数据接收任务数量的增加,解空间将会爆炸式增长。

通过文献阅读和实际运行系统的调研,目前,在解决遥感卫星地面资源调度问题时,国内外在调度模型和调度算法两个方面均有深入的研究。调度模型有数学规划模型、约束满足(CSP, Constraint Satisfaction Programming)模型,此外,还有 Agent 模型、Petri 网模型和基于图论的模型等其他模型。调度算法有确定性算法和启发式算法,启发式算法又包含了一般启发式算法、一般搜索算法和智能搜索算法。随着调度历史数据的累积,出现了数据驱动的调度方法,此类方法能够从调度历史数据中提取反映实际调度环境和调度知识的有效信息,从而克服传统建模方法和优化方法对实际复杂调度环境做过多简化和假设,改善调度效果。

2.1 调度模型

模型是对实际问题的抽象表达,国内外学者主要把运筹学里的数学规划模型、约束满足模型等模型引入地面站资源调度问题,建立地面站资源调度模型。

(1) 数学规划模型

Gooley^[6-7]在实现对美国空军卫星控制网的调度时,针对低、高空卫星建立了混合整数规划(MIP, Mixed Integer Programming)模型。Schalck^[8]把卫星需求间的相对次序约束加入到 MIP 模型中,减少了决策变量的个数,提高了调度性能。贺仁杰^[9]根据问题特点,建立了 MIP 模型,用以解决侦察卫星任务规划问题。刘洋等^[10]使用整数规划模型为单天线地面站任务调度问题建模。数学规划模型具有明确的目标函数和约束条件,可清晰的描述问题。但是当问题规模较大时,建立的规划模型比较复杂,求解困难。

(2) 约束满足模型

Pemberton^[11-12]把卫星调度视为任务与资源对应,并为任务分配资源的过程,建立了 CSP 模型。贺仁杰^[9,13-14]对卫星侦察调度问题进行抽象,建立了 CSP 模型。Zhang J^[15]在解决地面站资源调度问题时,把该问题看作是一个多目标优化的约束满足问题,其优化的目标即卫星数传总时间最大、地面站接收资源尽可能均衡使用。CSP 适用于规模较大的问题,但是,对规模较大的问题建模时,约束满足模型需要对问题进行适当简化。

(3) 其他类型模型

一些学者还使用 Agent 模型、Petri 网模型和基于图论的模型等对卫星调度问题建模。王红飞^[16]在研究卫星计划调度时,利用 Multi-agent 技术,给出卫星计划调度方案,并建立了调度系统智能机制。王远振等^[17-21]建立了时间约束着色 Petri 网模型,用于解决地面资源优化配置问题。张帆^[22]、陈慧中^[23]等应用图论理论建立的时间序无圈有向图模型,用以解决卫星成像规划调度。

2.2 调度算法

调度算法主要包括了确定性算法、启发式算法,其中启发式算法有包括了一般启发式算法、一般搜索算法以及智能搜索算法等不确定性算法。

(1) 确定性算法

Burrowbridge^[24]采用贪婪活动选择算法^[23],解决了美国空军控制网低轨卫星的单地面站天线调度问题。Barbulescu^[26]提出了一种贪婪算法(GreedyIS 算法),解决了低轨卫星的多地面站天线调度问题。确定性算法虽然能在多项式时间内给出稳定的最优解,但是只能处理简单问题或者是简化后的问题。

(2) 启发式算法

启发式算法在地面站资源调度等问题中应用较多,其根据一些有利于寻找到最优解的信息求解的一类算法,一般可细分为一般启发式算法、一般搜索算法以及智能搜索算法。

(1) 一般启发式算法

Gooley^[6-7]提出了一种启发式插入算法及替换算法相结合的混合算法,对美国空军卫星控制网的卫星进行调度。Dauzère-Pérès^[27]在对卫星进行调度时,把贪婪算法和启发式算法结合使用,取得了良好的效果。金光^[1,2,28]等提出了地面

站资源冲突消解策略的启发式调度算法, 来评估地面站服务能力。王军民^[29]等提出了基于卫星调度规则的启发算法对多个卫星进行调度。一般启发式算法通常利用一些能够引导算法找到较优的解基本特征信息来设计算法, 其运行过程简单, 运算快, 适用于对解要求不高、对运行速度要求较高的问题。

(2) 一般搜索算法

一般搜索算法通常指定一个可行解作为当前解, 从该当前解开始搜索更优的解, 常用的有局部搜索算法、禁忌搜索算法等。Lemaitre^[30-31]等在解决卫星调度问题时使用了局部搜索算法, 结果表明其调度效果比一般启发式算法更好。Bianchessi^[32]、Vasques 等^[33]在解决卫星调度问题时, 分别采用加入了动态禁忌保留机制和约束处理技术的禁忌搜索算法, 改善了调度结果, 提高了时间效率。贺仁杰等^[9,13]在解决卫星侦察调度问题时使用了禁忌搜索算法。一般搜索算法设计简单, 速度快, 但是容易陷入局部最优解。

(3) 智能搜索算法

智能搜索算法是一种仿生算法, 在卫星调度相关问题中使用的智能搜索算法主要有遗传算法和神经网络。Parish^[34]采用一种 GENITOR 的遗传算法解决了美国空军卫星控制网的地面站资源优化配置问题, 并取得较好结果。Wolfe^[35]等在解决卫星调度问题是, 使用遗传算法取得了比贪婪启发式方法更好的调度结果。Abbott^[36]等提出了一种遗传算法和启发式算法相结合的混合遗传算法解决卫星调度问题。阎志伟^[37]等把禁忌搜索的思想引入遗传算法, 用来解决卫星调度问题, 结果表明该方法提高了问题求解精度, 加快了模型收敛速度。张帆^[38]采用 Hopfield 神经网络算法解决了小卫星星务规划问题。

2.3 数据驱动的调度方法

目前, 数据驱动的遥感卫星地面接收资源调度方法的研究还处于萌芽阶段, 这方面可借鉴的相关资料相对较少, 这里主要借鉴针对复杂生产过程调度问题的研究成果。数据驱动的调度方法主要基于制造系统中的历史调度数据或实时数据, 采用特征分析、数据挖掘、机器学习和深度学习等技术, 从数据中获取与生产调度特征和调度性能相关的信息, 从而优化调度结果^[4]。该类方法从历史调度数据中挖掘反映实际调度环境特点及调度知识的大量有效信息, 一定程度上克服了传统建模方法对实际复杂调度环境做过多简化和假设带来的缺陷。

近年来,国内外在使用数据驱动的方法解决调度问题上均取得了一定的研究进展。

(1) 国外研究现状

Koonce^[39]针对作业车间调度问题,首先采用遗传算法获得多个最优调度方案并组成训练数据,然后使用属性规约的方法提取的调度方案和作业之间的关联关系,实验证明加入提取的关联关系后得到的解决方案优于简单调度规则给出的解决方案。Youssef^[40]在研究作业车间调度问题时,采用 C4/5 决策树方法,从遗传算法给出的最优解中提取出每台机器的决策规则。Harrath^[41]在研究工作车间调度问题时,使用 See5 分类器系统从遗传算法给出的近似最优解中挖掘决策规则,并把这些决策规则转换为元启发式信息,以改善工作车间调度。Feng^[42]、Weckman^[43]等使用遗传算法得到一个已知基准问题的较优解为训练数据,训练多层感知机模型 (MLP),训练好的 MLP 模型在新的工作车间调度问题上取得了与遗传算法性能相当的调度效果,并且在大规模的调度问题上具有更好的可扩展性,其中, Feng^[42]在其调度模型中还使用启发式规则来修正 MLP 模型给出的初始调度方案中不可行的调度结果。Kumar^[44]、Shahzad^[45]分别将蚁群算法和禁忌搜索算法应用于生产调度问题,并利用这两种自适应调度算法生成的优化解构造新的调度规则。Vinyals^[46]、Bello^[47]使用一种类似于序列到序列模型 (sequence-to-sequence)^[48]的指针网络(Pointer Net)解决平面旅行商问题和背包问题。

(2) 国内研究现状

董明宇等^[49]在解决纺织制造车间调度时,提出了一种针对并行机调度问题的调度规则挖掘方法。该方法首先使用变邻域禁忌搜索算法求解的最优调度方案组成训练数据,然后使用自适应神经模糊系统从数据中挖掘调度规则。Li L^[50]提出了一种基于数据的调度框架,并对其在半导体制造系统中的实现进行了探讨。该方法首先使用粒子群优化算法得到学习样本,再使用二元回归模型和神经网络学习自适应调度规则参数与工业实时运行状态之间的关系,实现了自适应调度规则参数的自适应调节。王成龙^[51]针对作业车间调度问题,使用基于决策树的调度规则挖掘方法,从基于 Petri 网建模的分支定界算法获得的优化调度方案中提取新的调度规则,并通过实验证明相比于已有的同类调度规则和传统

的优先调度规则, 利用该方法所构建的决策树调度规则能够取得更优的解。王振江^[52]在其硕士毕业论文中采用人工神经网络挖掘作业车间调度规则, 实验证明以调度特征属性作为输入, 一方面提高了调度规则挖掘算法的精度, 另一方面能够根据生产调度环境自适应地输出当前调度决策时刻的最优调度规则。丁建立等^[53]使用 Apriori 关联规则算法, 挖掘隐藏在航班协同保障数据中的潜在知识, 进而优化了航班保障流程, 提升了机场服务保障质量。王家海等^[54]集成支撑向量机和 CART 决策树学习算法, 从历史调度数据中获取调度知识, 并将调度知识和人工鱼群算法相结合用于生产调度, 改进了人工鱼初始化过程。滴滴 AILabs^[55]提出基于强化学习的网约车派单解决方案, 该方法结合了深度强化学习、时间差学习和传统组合优化方法。

从国内外研究现状来看, 数据驱动的调度方法大部分先基于传统的优化算法得出最优解或近似最优解, 然后使用决策树算法、K 近邻算法、属性规约方法、聚类、MLP 等数据挖掘、机器学习等方法提取隐含在数据中的调度规则和调度知识, 从而改善调度结果。

(3) 数据驱动方法在地面站资源调度中的研究

地面站资源调度属于作业调度的一种, 因此使用数据驱动的方法解决调度问题的相关研究, 为地面站资源调度提供了很大的参考价值。目前, 数据驱动的调度方法在解决地面资源调度上的研究比较少。Zhang J^[15]等使用 SVM 和 NSGA- II 相结合的方法来解决地面站资源调度问题。首先, 把地面站资源分配看作是一个多分类问题, 基于已分配地面接收资源的卫星数据接收任务调度结果的历史数据来训练 SVM 分类器, 并使用该分类器解决没有时间冲突的卫星数据接收资源分配问题; 其次, 对于有时间冲突的数据接收任务和一些在 SVM 分类器中没有被分配到地面站资源的数据接收任务, 再使用 NSGA- II 算法进行求解优化。实验结果表明, 与 GA 算法相比, NSGA- II 算法在解决多目标地面站资源调度问题上具有更好的性能; SVM+NSGA- II 比单纯的使用 NSGA- II 算法能够在更短的时间内有效的解决大规模多目标调度问题。该论文中, 虽然只是使用 SVM 分类器解决一些简单的没有时间冲突的资源调度问题, 但这也是首次使用机器学习的方法, 基于历史数据训练分类器来解决地面站接收资源

调度问题, 因此对于使用数据驱动的方法来解决此类问题提供了一种新的思路。

2.4 研究现状总结

从调研结果来看, 遥感卫星地面站资源调度在调度模型和算法上都取得了丰富的成果, 但仍存在一些问题:

(1) 问题建模时对实际调度环境和约束条件做过多简化。不同地面站实际调度环境不同, 资源使用约束条件也不一样, 有些约束条件难以用数学语言描述。传统建模方法在建模时需对实际复杂调度问题进行简化并附加较多的假设条件, 这些人为的假设降低了模型的实际复杂度和调度方案的可靠性。

(2) 求解算法得到的通常都是局部最优解。目前, 地面站资源调度大多采用智能搜索算法, 这类算法存在一定程度的枚举, 收敛速度很慢, 且一般情况下解得最优性难以判断。

(3) 调度模型和算法缺乏灵活性。由于各类卫星数据接收任务需求及约束条件不同, 相应的卫星调度模型和算法也不相同, 目前的调度模型和算法对于问题的鲁棒性能较差, 使其不能灵活适应实际应用中具体卫星的调度需求。

(4) 使用数据驱动的方法解决地面站资源调度问题的相关研究开始出现。数据驱动的方法能够从历史调度数据中提取调度特征, 这些特征对于改善地面站资源调度具有促进作用。

2.5 本章小结

本章详细阐述了国内外在遥感卫星地面资源调度的调度模型和调度算法研究进展, 介绍并总结了数据驱动的调度方法研究现状。

第 3 章 地面站天线资源调度问题

3.1 卫星数据接收过程

卫星按照设计的轨道在太空中运行，在卫星进入地面站接收圈后（即地面站与卫星是可见的），地面站接收天线、信道以及记录器完成卫星跟踪与数据接收，如图 3.1 所示。其中，天线用来接收卫星下传的电磁波信号；信道用来去除已调信号中的载波，恢复出基带数据码流；记录器用来记录解调之后的数据。

在数据接收过程中，不同卫星的轨道高度、编码方式、调制方式、码速率、极化方式和数传频段都可能有所不同，对地面接收系统的要求也就不同。这些差异主要体现在跟踪与接收两个方面。在跟踪方面，地球同步轨道卫星相对地面站基本处于静止或缓慢运动中，跟踪要求相对较低；太阳同步轨道卫星相对于地面站处于快速运动中，对跟踪要求较高。对于太阳同步轨道卫星，轨道越低，卫星相对地面角速度越大，跟踪越困难，需要地面天线的动态性能越好。在接收方面，卫星的编码方式、调制方式、码速率、极化方式和数传频段不同，对地面接收系统的信道和记录的功能和性能指标要求也不同。

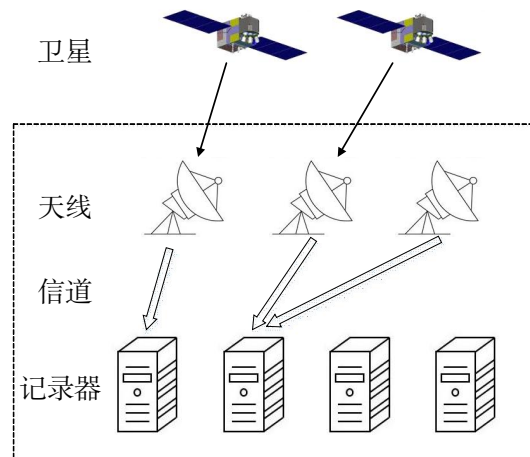


图 3.1 地面站接收记录卫星数据

Figure 3.1 The ground station receives and records satellite data

地面站天线在接收卫星数据的过程由四个阶段组成，分别是准备 (Preparation)、获取 (Acquisition)、跟踪 (Tracking) 和释放 (Releasing) ^[32]，如图 3.2 所示，当卫星到达 T1 时，地面站天线开始为数据接收进行准备工作，

即完成设备准备和卫星捕获。 T_2 到 T_7 是卫星和地面站天线的几何可见时间。在 T_3 时地面站天线的仰角和数据最小捕获角相同时,地面站天线开始接收数据。在 T_4 到 T_5 时间内地面站天线持续追踪卫星天线,卫星也在这个时间段内向地面站传输数据,地面站也是在这个时间段内接收卫星下传的数据。在 T_6 时地面站开始释放资源,整个数据传输与接收过程在 T_7 时刻完成,并释放天线资源。

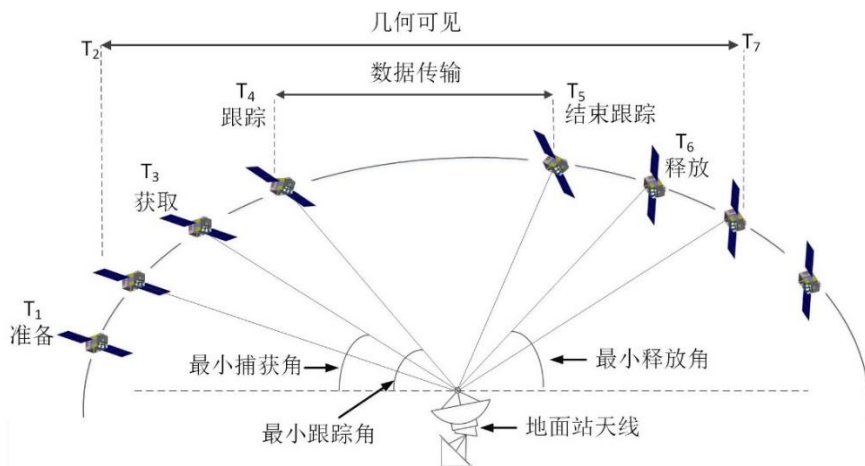


图 3.2 卫星数据接收过程

Figure 3.2 The data reception process of satellite

3.2 地面站天线调度约束分析

地面站资源调度问题可以抽象为一类约束满足优化问题,只有在满足所有约束的前提下,才能对调度目标函数进行优化。因此,需要对地面站资源调度的约束条件进行详细分析。论文的研究内容是为卫星数据接收任务合理分配地面站天线,在结合已有相关研究中的约束条件,以及中国遥感卫星地面站卫星数据接收的实际业务调度,围绕任务约束、时间窗口约束和地面天线约束这三个方面总结出以下约束条件。

3.2.1 任务约束

任务约束具体包括:

(1) 任务时间窗口约束: 各个任务的接收时间窗口必须包含在卫星数据接收任务时间窗口内,即数据接收任务开始时间不早于任务最早开始时间,结束时间不晚于任务最迟结束时间。

(2) 任务持续时间约束: 数据接收任务时间窗口总长度不能小于任务的最

短持续时间。

(3) 任务不可抢占中断约束：为任务分配数据接收时间段后，在任务执行过程中，不允许其他任务抢占其接收天线。

3.2.2 时间窗口约束

为数据接收任务分配的接收时间窗口必须满足以下约束条件：

(1) 时间窗口可见约束：为数据接收任务分配的时间窗口里，卫星和地面天线之间必须是几何可见的。

(2) 最短时间窗口约束：为完整接收数据，卫星和地面天线之间的几何可见时间窗口长度不得小于数据接收任务持续时间。

(3) 数据接收时间窗口唯一性约束：为了节省地面接收天线资源，同一时刻，一颗卫星只能与一部接收天线之间存在接收时间窗口(数据备份除外)；为避免接收资源抢占，同一时刻，同一接收天线只能为一个数据接收任务提供服务。

3.2.3 地面站天线约束

目前中国地面站设有密云站、喀什站、三亚站、北极站、西南站、移动站和牡丹江站等七个接收站点，分布在国内外不同地理位置，其中密云站有八部天线，喀什站有六部天线，三亚站有五部天线，其余各站均有一部天线。本文算法主要针对中国遥感卫星地面站所属的密云站、喀什站以及三亚站的多套天线资源进行任务分配和调度。

在进行地面站天线调度之前，天线必须满足以下约束条件：

(1) 天线状态切换时间约束：同一接收资源在两个任务之间的状态切换需要时间。数据接收时间窗口必须满足天线状态切换所需时间，即使用同一接收天线的两个任务之间必须有足够的时间完成天线状态切换。例如，天线仰角切换需要一定时间，如果两个任务分配到同一天线，那么这两个任务执行的时间间隔一定要不小于天线状态调整时间。

(2) 天线能力约束：地面天线在同一时刻只能为一个数据接收任务提供服务，一个地面站天线不能同时支持两个及两个以上的数据接收任务。

(3) 设备无故障假设：任务在执行期间不可被抢占，且卫星、地面站天线不出现故障。

(4) 天线优先级约束：地面天线具有优先级，为数据接收任务分配地面接收天线时，应该首先考虑优先级高的地面资源。

其中，前三个约束条件在地面站天线调度时必须满足，论文将使用循环神经网络从数据中提取天线使用优先级特征，并结合地面站现有天线使用优先级规则，给出新的地面站天线使用优先级规则，即第四个约束条件，作为启发式搜索的准则。

3.3 地面站天线调度问题描述

地面站接收资源主要包括天线、信道和记录器，通常卫星数据经天线接收后，经过信道的变频和解调，最后由记录器记录。地面站接收资源调度也主要是对天线、信道和记录器的调度，即为每一条卫星数据接收任务合理分配接收时间窗口和地面接收资源，从而使数据尽可能地被完整接收，也使地面站接收资源充分利用。由于信道和记录器资源相对充足，天线资源相对不足，本文的研究内容只针对地面站天线的调度。地面站天线调度是在保证为每一条数据接收任务分配接收天线的基础上，保证数据完整接收，并提高地面站接收天线使用效率，避免资源浪费。论文在解决地面站天线调度问题时主要围绕地面站天线使用优先级提取、解决联合接收以及资源选择冲突情况展开。

3.3.1 地面站天线调度问题表示

地面站天线调度问题的输入可用集合 $GASP$ 描述，其中 T 为需要进行调度的数据接收任务集， G 为地面站集合及每个地面站包含的接收天线， S 为卫星集合及每颗卫星可用接收天线和其使用优先级：

$$GASP = \{T, G, S\}$$

每一个符号代表的含义如下：

- $T = \{t_i | 1 \leq i \leq n_t\}$ 为一个任务集，一个任务集中任意两个任务时间相隔不大于时间 t ，任务集的任务个数为 $|T| = n_t$ ，每一个任务 t_i 由七个元素组成：

$$t_i = \{id_{t_i}, s_{t_i}, g_{t_i}, st_{t_i}, et_{t_i}, p_{t_i}, p_{s_{t_i}}\}$$

id_{t_i} 为任务 t_i 的编号， s_{t_i} 代表 t_i 对应的卫星， g_{t_i} 代表 t_i 所属的地面站，

$[st_{t_i}, et_{t_i}]$ 代表 t_i 数据接收的开始时间和结束时间, p_{t_i} 代表该条数据传输任务的紧急程度, $p_{s_{t_i}}$ 代表该条数据接收任务优先级 (与对应的卫星优先级成正比)。

- $G = \{g_k | 1 \leq k \leq n_g\}$ 为地面站集合, 且地面站的个数为 $|G| = n_g$, 每个地面站有三个元素组成:

$$g_k = \{id_{g_k}, loc_{g_k}, A_{g_k}\}$$

id_{g_k} 代表 g_k 的编号, 地面站 g_k 的地理位置为 loc_{g_k} (包括经度、纬度和高程), A_{g_k} 代表地面站 g_k 所拥有的天线集合。

- $S = \{s_j | 1 \leq j \leq n_s\}$ 为所有卫星集合, 卫星个数为 $|S| = n_s$, 每一颗卫星有三个元素组成:

$$s_j = \{id_{s_j}, p_{s_j}, A_{s_j}\}$$

id_{s_j} 代表卫星 s_j 的编号, p_{s_j} 为卫星 s_j 的优先级, $A_{s_j} = \{a_{s_j,m} | 1 \leq m \leq m_{s_j}\}$ 代表卫星 s_j 可用地面站天线集合, $a_{s_j,m} = \{s_j, p_{a_{s_j,m}}\}$, s_j 为天线 $a_{s_j,m}$ 所对应的卫星, $p_{a_{s_j,m}}$ 为卫星 s_j 的数据接收任务使用天线 $a_{s_j,m}$ 来接收时的优先级。

3.3.2 数据联合接收和资源选择冲突

为了有效解决地面站天线资源调度问题, 需要处理数据联合接收和资源选择冲突两个问题, 这两个问题主要是由于数据接收时间窗口之间的关系和地面站接收资源引起的。两个遥感卫星数据接收任务之间的关系, 本文在时间上把它划分为三种, 即相离关系、部分重叠关系和包含关系。如图 3.3 所示, 任务 1 和任务 2 处于包含关系, 任务 1 和任务 3 处于部分重叠关系, 任务 2 和任务 3 处于相离关系。当两个任务在时间上处于相离关系时, 则地面接收资源使用互不影响; 当处于部分重叠或者包含关系, 则可能会引起数据联合接收、接收资源抢占的情况, 因此, 地面站天线调度在为每一个接收任务分配接收天线的同时, 需要避免这两种情况。

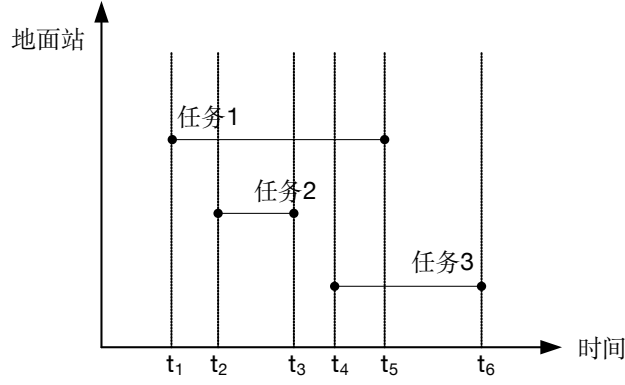


图 3.3 接收任务时间关系

Figure 3.3 The relationship of receiving time among tasks

(1) 数据联合接收

当卫星在同一时间发射的信号位于多个地面站接收范围间的重叠区域时，每个地面站均可接收到该卫星数据，这时就会出现部分数据联合接收的情况。如图 3.3 所示，若任务 1~3 属于同一颗卫星在不同地面站的数据接收任务，则任务 1 和任务 2、任务 1 和任务 3 的接收时间均有重叠，故属于数据联合接收。其中，任务 1 的接收时间包含任务 2 的接收时间，由定义 3.1 可知两者属于完全重叠；任务 1 和任务 3 在时间上属于部分重叠关系，由定义 3.2 可知，两者属于部分重叠。数据联合接收的时间越长，则接收资源不必要的浪费越严重，相应的会加剧各个地面站资源选择冲突，因此，在接收任务调度中要尽量避免联合接收的情况。

定义 3.1 任务时间完全重叠(cot, completely overlap tasks): 对于不同地面站而言，当任务 t_i 和任务 t_j 属于同一卫星的接收任务，且两者接收时间处于包含关系，如公式(3.1)所示，则两者属于任务时间完全重叠。

$$cot_{<i,j>} = \begin{cases} 1, & \left((st_i \leq st_j) \text{ and } (et_j \leq et_i) \right) \text{ or } \left((st_j \leq st_i) \text{ and } (et_i \leq et_j) \right), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \dots (3.1)$$

式中， $cot_{<i,j>}$ 代表任务 t_i 和任务 t_j 是否完全重叠，若完全重叠，其值为 1，否则为 0； st_i 、 et_i 分别为任务 t_i 接收开始时间和结束时间； st_j 、 et_j 分别为任务 t_j 接收开始时间和结束时间。

定义 3.2 任务时间部分重叠(pot, partly overlap tasks): 对于不同地面站而言，当任务 t_i 和任务 t_j 属于同一卫星的接收任务，且两者接收时间处于部分重叠关

系, 重叠时间大于最小重叠时间 $OTMin$ (中国遥感地面站规定的最小重叠时间为 60 秒), 如公式(3.3)所示, 则两者属于任务时间部分重叠。

$$time_{<i,j>} = \max \{st_{t_i}, st_{t_j}\} - \min \{et_{t_i}, et_{t_j}\} \quad \dots(3.2)$$

$$pot_{<i,j>} = \begin{cases} 1, & time_{<i,j>} \leq -OTMin; \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad \dots(3.3)$$

式中, $time_{<i,j>}$ 为任务 t_i 和任务 t_j 的重叠时长, $pot_{<i,j>}$ 代表任务 t_i 和任务 t_j 是否部分重叠, 若部分重叠, 其值为 1, 否则为 0。

定义 3.3 可能冲突度(pcd, possible conflict degree): 若同一地面站的任务 t_i 和任务 t_j 接收时间间隔时间 $time_{<i,j>}$ 小于最小冲突时间 $CTMin$ (中国遥感卫星地面站规定的时间间隔是 270 秒, 此时间为天线姿态调整所需时间), 则任务 t_i 和任务 t_j 可能冲突, 每个地面站可能冲突个数与该地面接收天线个数比值之和, 即为该接收任务集的可能冲突度, 如公式(3.5)所示。

$$pc_{<i,j>} = \begin{cases} 1, & time_{<i,j>} \leq CTMin; \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad \dots(3.4)$$

$$pcd = \sum_{k=1}^{n_g} \frac{\sum_{i=1}^{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} pc_{<i,j>}}{|A_{g_k}|} \quad \dots(3.5)$$

式中, n_g 为地面站的个数, n_t 为地面站 g_k 中任务个数, A_{g_k} 为地面站 g_k 的天线集合, $pc_{<i,j>}$ 值为 1 时, 代表任务 t_i 和任务 t_j 可能冲突, 为 0 时代表不冲突。pcd 的值越小, 任务集可能冲突程度越小, 处理联合接收时以降低任务集可能冲突度为目标。

(2) 资源选择冲突

当多个卫星同时经过时同一地面站时, 由于该地面站资源紧缺, 天线资源调度时分配接收天线相同, 导致数据不能完全接收, 即资源选择冲突, 具体定义由定义 3.4 给出。当资源选择冲突时, 需从接收天线性能、接收任务优先级等角度来消解冲突, 使数据完整接收。

定义 3.4 资源选择冲突(rcc, resource selection conflict): 对于单个地面站而言, 当任务 t_i 和任务 t_j 属于不同卫星的接收任务, 两者接收时间间隔时间 $time_{<i,j>}$ 小

于最小冲突时间 $CTMin$ ，且两者分配的接收天线相同，如公式(3.6)所示，则两者属于资源选择冲突。

$$rcc_{<i,j>} = \begin{cases} 1, & (time_{<i,j>} \leq CTMin) \text{ and } (a_{t_i} = a_{t_j}); \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad \dots(3.6)$$

式中， $rcc_{<i,j>}$ 表示任务 t_i 和任务 t_j 是否资源选择冲突，若是其值为 1，否则为 0； a_{t_i} 、 a_{t_j} 分别代表调度算法给任务 t_i 、 t_j 分配的接收天线。

定义 3.5 资源选择冲突度(rccd, resource selection conflict degree): 单个地面站资源选择冲突程度，使用公式(3.7)来表示，即为地面站处于资源选择冲突任务个数的总和，当 $rccd=0$ 是冲突消解完成，则调度结果是一个可行的方案。

$$rccd = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} rcc_{<i,j>} \quad \dots(3.7)$$

3.3.3 调度方案表示及成本

(1) 调度方案表示

调度方案用集合 $SCHEME$ 表示，集合中的 $scheme_{t_i}$ 为数据接收任务 t_i 的调度结果：

$$SCHEME = \{scheme_{t_i} \mid 1 \leq i \leq n_t\}$$

$$scheme_{t_i} = \{id_{t_i}, s_{t_i}, g_{t_i}, st_{t_i}, et_{t_i}, p_{t_i}, p_{s_{t_i}}, st_{t_i}^a, et_{t_i}^a, a_{t_i}\}$$

式中， $st_{t_i}^a$ 、 $et_{t_i}^a$ 分别为任务 t_i 实际接收开始时间和实际接收结束时间， a_{t_i} 代表任务 t_i 使用的接收天线。

(2) 调度方案成本

在地面站资源调度领域，对调度方案的优劣尚没有统一的评价标准，因此，本文从天线使用成本、任务因天线资源选择冲突未完整接收的成本两个方面制定了公式(3.8)所示的调度方案成本函数，该接收成本函数值越低，则说明接收方案越优。

$$Cost = \sum_i \left(P(i) \sum_j W(i,j) * ant(i,j) + P(i) * pnc(i) \right) \quad \dots(3.8)$$

$\sum_i \sum_j P(i) W(i,j) * ant(i,j)$ 表示天线使用成本， $P(i)$ 表示任务 i 的重要程度，

接收任务的重要程度与任务优先级在数值上成正比(任务优先级分为 5 个等级, 等级越高数值越大), 数值越大, 该接收任务越重要; $W(i, j)$ 表示任务 i 使用天线 j 来接收时的成本, 此接收成本与天线使用优先级在数值上成正比, 优先级越高, 数值越小, 使用天线 j 接收任务 i 的成本越低; $ant(i, j)$ 为二值变量, 表示天线分配情况, 如果分配天线 j 接收任务 i , 则其值为 1, 否则为 0。一个任务越重要, 使用接收天线级别越低, 则天线使用成本越大。

$\sum_i P(i) * pnc(i)$ 表示任务未完全接收的惩罚, $P(i)$ 表示任务 i 的重要程度; $pnc(i)$ 表示任务 i 因为接收资源选择冲突未接收的任务时间长度。一个任务越重要, 未接收的时间越长, 则所受到的惩罚越大。

3.4 本章小结

本章, 首先, 介绍了地面站卫星数据接收过程; 其次, 从任务约束、时间窗口约束、地面站天线约束三个角度, 分析和总结了地面站天线资源调度约束条件; 然后, 使用数学语言描述了地面站天线调度问题的输入输出, 详细描述和定义了数据联合接收和资源选择冲突; 最后, 分析并定义了接收方案成本, 用以评价接收方案优劣。

第 4 章 遥感卫星地面站天线智能调度

4.1 调度方法流程设计

为提高地面站资源使用效率和求解效率，论文设计了如图 4.1 所示的调度方法流程。首先，使用一般启发式搜索处理接收任务中数据联合接收的情况，从而避免地面站接收资源的浪费；其次，对于经过联合接收处理后的接收任务，使用长短期记忆神经网络，提取天线使用优先级特征，与地面站现有天线使用优先级规则相结合，给出一种新的天线使用优先级规则；最后，使用新的天线使用优先级特征，给出初始调度方案，并使用基于集束搜索思想的启发式搜索，消解初始方案中可能存在的资源选择冲突，得到实际可行的调度方案。

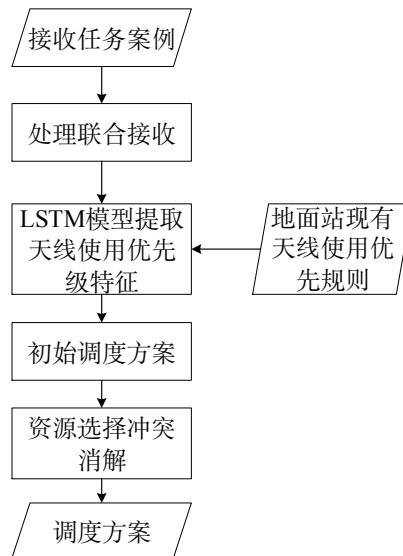


图 4.1 调度方法流程

Figure 4.1 The flow of the scheduling method

4.2 LSTM 模型

将数据接收任务按接收开始时间从早到晚排序，并把排序后的任务集看成是一个时间序列，因此论文以专门用来处理时间序列的长短期记忆网络(long short-term memory network ,LSTM)^[56]为基础，制定图 4.2 所示的 LSTM 模型训练流程。首先，对输入的历史调度数据进行预处理，即处理成可输入 LSTM 模型进行数学运算的实数；其次，把处理后的数据集分成训练集和验证集，其中训练

集用来调整 LSTM 模型参数，验证集用来选择效果最佳的模型；最后使用沿时间的误差反向传播算法 (BPTT, back-propagation through time) 训练 LSTM 模型，并保存训练好的模型供后期使用。其中，历史调度数据可以看作是具有时间序列性质的数据。在给接收任务集中的数据选择唯一地面接收站之后，按照可能任务冲突集的定义，把接收任务划分为多个可能任务冲突集，可能冲突集之间的接收资源调度互不影响，可能冲突集内部资源选择会相互影响。在实际中，每个任务冲突集内的任务数量也可能不相同，故本文选择使用变长的长短期记忆神经网络，该网络还具有参数共享的性质，减少了模型需要学习的参数量。

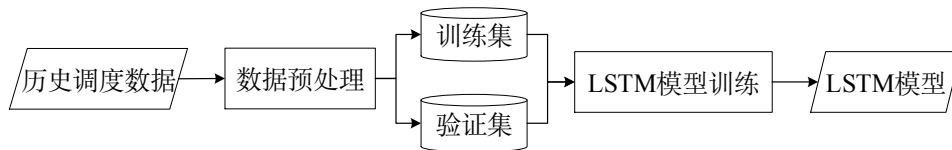


图 4.2 LSTM 模型训练

Figure 4.2 The training of LSTM

4.2.1 历史调度数据

中国遥感卫星地面站自建站三十多年以来，积累了大量的地面站资源调度数据，论文选取 2016 年至 2019 年近十六万条历史调度数据作为 LSTM 模型的训练和验证数据集。这些调度数据，首先由结合启发式规则的遗传算法（简称为“原算法”）给出，后期再经过地面站工作人员根据当天的接收资源实际可用情况进行调整得到，因此数据中隐含着地面站天线调度环境和天线使用优先级规则。每条数据接收任务的接收方案如表 4.1 所示，该方案由卫星名称、地面接收站、接收开始时间、接收结束时间、任务紧急程度、任务优先级六个属性组成，此外，还包含分配的接收天线。因此在 LSTM 模型网络设计时，把接收任务的属性数据作为网络的输入，所选天线作为网络的输出。

其中，中国遥感卫星地面站历史上累计服务的卫星超过七十多颗，因此，输入数据中卫星属性值有七十多个；地面站是中国遥感卫星地面站所属的密云站、喀什站、三亚站共三个站点；数据接收时间为卫星与地面站的可见时间段，由于卫星按照设计的轨道在太空中运行，因此只有在卫星进入地面站接收圈后（即地面站与卫星是可见的），地面站天线才可进行卫星数据接收工作，不同卫星数据接收时间不同；任务的紧急程度由对数据的需求迫切程度来决定，分为“紧急”和“一般”两种；任务优先级与卫星优先级成正比，分为 5 个等级，数值

越大，卫星优先级等级越高。目前，中国遥感卫星地面站在密云站共 8 部天线，喀什站共有 6 部天线，三亚站共有 5 部天线，因此，该问题是一个多分类问题。

表 4.1 数据样例

Table 4.1 Data sample

数据项	含义	值
1	卫星名称	GF-5
2	地面接收站	SYC
3	接收开始时间	2019-09-13 14:56:51
4	接收结束时间	2019-09-13 15:04:53
5	任务紧急程度	一般
6	任务优先级	0.5
7	天线	SY12_4

4.2.2 数据预处理

深度学习模型训练过程中，数据集的大小和质量直接影响模型的训练以及模型效果，因此在模型训练之前，做好数据预处理工作至关重要。论文中主要使用了三个数据预处理技术，分别为数据缺失处理、词嵌入技术、训练集和验证集的划分方法，数据预处理流程如图 4.3 所示。

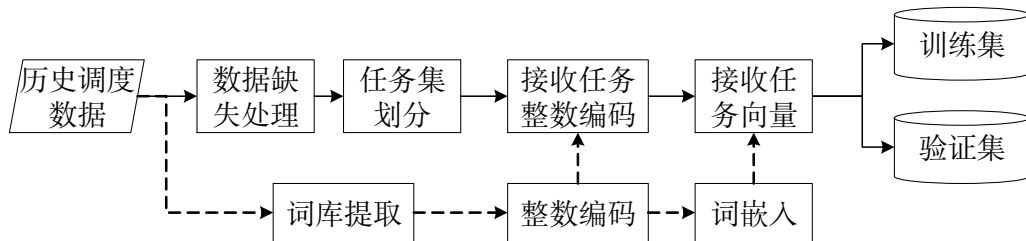


图 4.3 数据预处理的流程图

Figure 4.3 The process of data preprocessing

(1) 数据缺失处理：由于地面站天线资源相对不足，有些卫星数据接收任务分配不到接收天线而被迫取消，在调度数据里该接收任务的接收开始时间和接收结束时间均被删除，但这条数据也会影响模型训练，此时需要参考原始任务接收文件，将缺失数据补齐。

(2) 任务集划分：地面站天线调度主要解决数据联合接收和资源使用冲突问题，这两个问题是由于任务接收时间过于集中，造成接收天线在某个时间段内资源短缺。因此，在进行调度之前通常把数据接收任务按时间划分为不同的

任务集，不同任务集里的数据接收任务互不影响，从而着重解决同一任务集里的数据联合接收和资源选择冲突的情况，这种分而治之的思想，降低了问题的复杂度。具体的，把数据接收任务按接收开始时间从早到晚进行排序，计算相邻两个任务 t_i 和 t_{i+1} 中，前一个任务的结束时间 et_i 和后一个任务的开始时间 st_{i+1} 的时间间隔 $t = st_{i+1} - et_i$ ，如果 t 小于约定的任务集间隔时间 $TMin$ (中国遥感卫星地面站规定的时间间隔是 270 秒，此时间为天线姿态调整所需时间)，那么任务 t_i 和 t_{i+1} 就可能存在数据联合接收或资源选择冲突的情况，把这两个任务划分到同一任务集；否则，从 t_{i+1} 开始一个新的任务集。

(3) 词嵌入技术：词嵌入(word embedding)是一种把词映射为实数域向量的技术，它将词汇表中的每一个词，表示成一个定长的向量，通过对特定任务的学习，使得这些向量能较好地表达相似词之间的相似和类比关系。原始的文本数据需要经过预处理成可以参与运算的数值数据才能输入网络，而词向量为文本数据提供了一种数值化的表示方法，这是文本数据能够被计算机处理的基础，也是深度学习技术能够应用于文本数据处理的重要前提基础。此外，使用词向量技术还避免了独热编码在词库中词的数量较多时带来的数据冗余、运算效率低，无法准确表达不同词之间的相似度等问题。图 4.4 是词汇数量为 n ，词向量维度为 K 的表示。在数据预处理时，由于时间是不断变化的，很难用固定的量来表示，因此把接收开始时间和接收结束时间属性分别拆成年、月、日、时、分、秒、一年中的第几天、一周中的第几天八个属性列，除此之外数据接收任务中还有卫星、地面站、任务优先级、任务紧急程度这四个属性，一共二十个属性，每个属性均有若干个属性值，统计所有不重复出现的属性值，作为训练数据集的词库。对词库中的词从 0 开始进行整数编码，再使用词嵌入技术，把每个编码映射为实数域特定维度的词向量，相应的每个数据接收任务映射成特定维度的任务向量，此向量作为 LSTM 网络每个时间步的输入。每个词对应的词向量，在 LSTM 模型训练过程中会不断调整，当 LSTM 模型训练稳定时，词向量也趋于稳定。

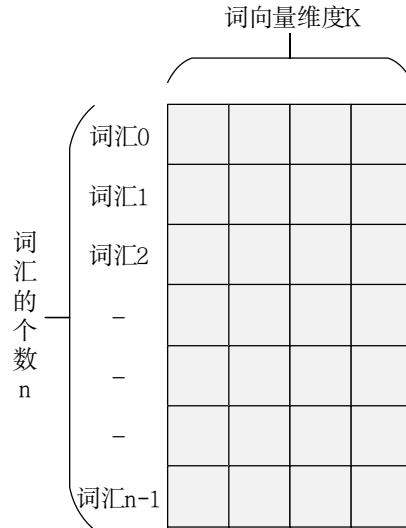


图 4.4 词汇个数为 n ，词向量维度为 K 的词汇表

Figure 4.4 Vocabulary with n words and K dimensions

(4) 训练集和验证集的划分：因为不同时期天线的使用规则略有变化，而且同一时期同一颗卫星会有多个候选天线，这导致数据集标签不稳定。因此，采用按时间分层抽样的方法将数据集划分成训练集和验证集，来减少数据分布不均匀性给模型训练造成的影响。首先，把数据按时间顺序等分为四个部分；其次，每个部分中分别取 80% 的数据作为训练数据，20% 的数据作为验证数据；最后，把四个部分 80% 的训练数据合并组成训练集，把四个部分 20% 的验证数据合并起来组成验证集。

4.2.3 模型结构

4.2.3.1 长短记忆单元

(1) 循环神经网络

循环神经网络(RNN, Recurrent Neural Network)通常用于处理具有序列特征的数据。传统前馈神经网络的输入只能是上一层（隐藏层或输入层）的输出，而循环神经网络将隐藏层之间结点互相连接，并引入状态变量来存储过去的信息，使得隐含层的输入不仅仅是当前时刻输入层的输入，还包括了上一时刻隐藏层的输出，这样循环神经网络就能有效的处理具有时间序列特征的问题了。循环神经网络每个时间步对应相同位置的连接权值相同，即循环神经网络模型参数的数量不随时间序列长度的增加而增长，这在很大程度上降低了网络所要学习的参数。图 4.5 为循环神经网络结构图，图中 x 代表输入， h 代表隐藏层单

元, o 为网络输出, L 代表损失函数, y 代表训练集标签。其中, 右下角的 t 代表 t 时刻的状态, 从图中可以看出 t 时刻的隐藏层的状态, 由 t 时刻的输入和 t 时刻前一时刻隐藏层输出共同决定。

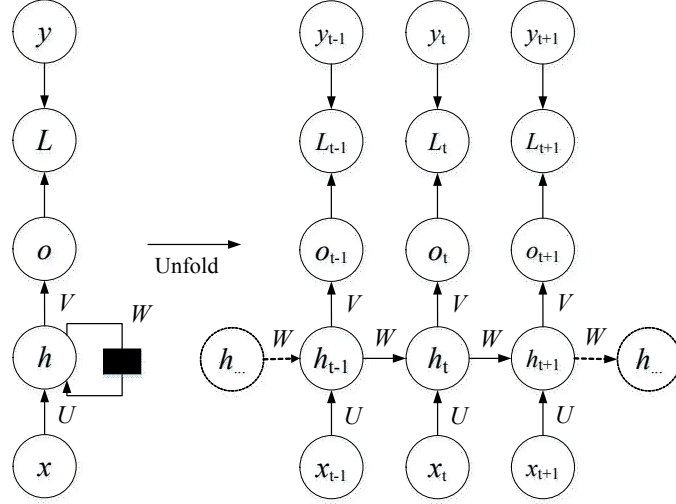


图 4.5 循环神经网络结构图

Figure 4.5 The structure diagram of RNN

对于 t 时刻, 隐藏层 h_t 接收 t 时刻的输入 x_t 和 $t-1$ 时刻的隐藏层输出 h_{t-1} , 如公式(4.1)所示, 其中, ϕ 为激活函数, 一般为 \tanh 函数, b 为偏置; t 时刻的输出由公式(4.2)给出; t 时刻最终模型的预测输出 \hat{y}_t 由公式(4.3)给出, 其中, σ 为激活函数, RNN 用于分类问题时, σ 一般为 Softmax 函数。 U 代表输入层与隐藏层之间的连接权重, W 代表两个隐藏层之间的连接权重, V 代表隐藏层与输出层之间的连接权重, 由于 RNN 具有权值共享的特点, 所以网络的每个时间步中 W 、 U 、 V 连接权值相同。

$$h_t = \phi(Ux_t + Wh_{t-1} + b) \quad \dots(4.1)$$

$$o_t = Vh_t + c \quad \dots(4.2)$$

$$\hat{y}_t = \sigma(o_t) \quad \dots(4.3)$$

(2) 长短期记忆单元

在传统 RNN 模型中, 随着时间序列的延长, 误差梯度在沿时间反向传播的过程中会出现梯度消失和梯度爆炸的问题。LSTM 是在传统的 RNN 基础上, 在隐藏层各单元间传递时通过“遗忘门”、“输入门”、“输出门”三个门控单元, 控

制之前信息和当前信息的记忆和遗忘程度,有效的改进了 RNN 在时间序列过长时产生梯度消失和梯度爆炸等问题。目前, LSTM 已经广泛应用在语音识别^[57]、图片描述^[58]、自然语言处理^[59]等许多领域。

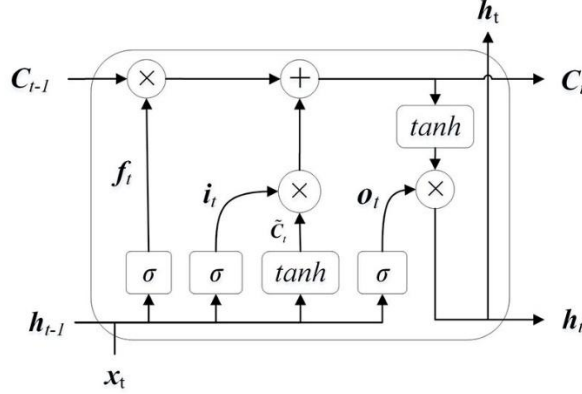


图 4.6 LSTM 神经元结构

Figure 4.6 The neuron structure of LSTM

图 4.6 为 LSTM 神经元结构图,当前神经元接收前一时刻隐藏层的输出 h_{t-1} 和当前时刻的输入 x_t , LSTM 第一步决定上一时刻学到的信息通过或部分通过神经元,这一步通过公式(4.4)所表示的“遗忘门” f_t 来控制。公式中, W_f 和 b_f 为“遗忘门”的网络参数, σ 代表 sigmoid 激活函数。

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad \dots(4.4)$$

第二步产生该神经元需要更新的新信息,这一步通过公式(4.5)所表示的“输入门” i_t 来决定哪些值用来更新,通过公式(4.6)来生成新的候选细胞状态 \tilde{C}_t^o (cell state)。LSTM 通过公式(4.7)把第一步和第二步结合起来,即丢掉不需要的信息,添加新的信息,得到当前时刻的细胞状态 C_t 。公式中, W_i 和 b_i 为“输入门”的网络参数, W_c 和 b_c 为生成候选细胞状态的参数, \tanh 为激活函数。

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad \dots(4.5)$$

$$\tilde{C}_t^o = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad \dots(4.6)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * C_t^o \quad \dots(4.7)$$

最后一步决定模型的输出，公式(4.8)表示的“输出门” o_t 决定细胞状态需要输出的部分，细胞状态通过公式(4.9)的处理，得到一个(-1,1)之间的值，与 o_t 逐对相乘后，输出当前时刻细胞隐藏层的值 h_t 。公式中， W_o 和 b_o 为“输出门”的网络参数。

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad \dots(4.8)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad \dots(4.9)$$

由于 RNN 在整个时间序列中相同位置的参数是共享,所以在网络训练的过程中每个时间步中 W_f 、 b_f 、 W_i 、 b_i 、 W_c 、 b_c 、 W_o 、 b_o 这些参数对应相同,这大大减少了网络所要学习的参数。

4.2.3.2 LSTM 模型结构

地面站天线调度是一个多任务、多天线的问题，因此可以把该问题看成是一个多分类问题，即为每个接收任务分配一个合理的接收天线。每一个任务集的长度即为其所对应的时间序列的长度，由于每个任务集的任务个数不同，所以选择多对多的变长 LSTM 模型框架。综合考虑地面站历史调度数据量和分类模型复杂度，本论文选择了两层单向 LSTM 模型结构，以地面站接收天线分类为下游任务训练模型，从而提取词向量和地面站天线使用优先级特征。图 4.7 描述了含有 T 个任务的任務集模型架构，首先，任务输入层输入数据接收任务集，每个时间步输入一个数据接收任务；其次，经过词嵌入层把每个数据接收任务映射成能够参与网络计算的浮点型向量；最后，经过两个 LSTM 隐藏层、线性(Linear)层以及归一化指数函数(Softmax)层，得到该任务候选天线的概率分布。概率值越大则天线使用优先级越高，概率值越小则天线使用优先级越低，概率值为 0 则说明该天线不具备接收当前卫星数据的能力，输出概率分布值，作为 LSTM 提取的天线使用优先级特征。

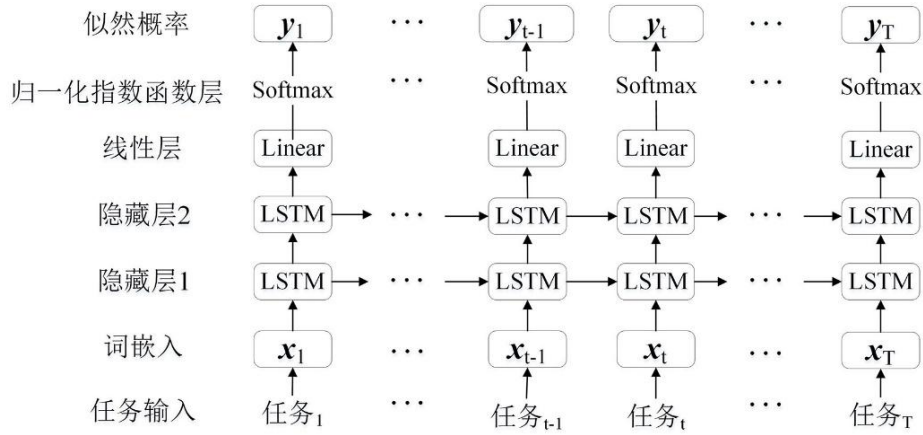


图 4.7 LSTM 模型结构图

Figure 4.7 The structure of LSTM classification model

4.2.4. 模型训练

论文中 LSTM 模型运行环境为 Python3.6, 深度学习框架 Pytorch0.4。模型训练过程采用 BPTT 算法, 该算法分为 4 个步骤: ①在时间序列上正向计算每个时间步的输出值; ②使用交叉熵损失函数计算每个时间步的误差函数值, 并沿着时间和网络层级两个方向进行误差反向传播; ③根据每个时间步的误差函数值, 计算每个权重的梯度值; ④应用带动量的随机梯度下降法来优化损失函数, 更新权重。

实验表明, 此带动量的随机梯度下降法相比于其他优化算法, 在模型收敛的过程中表现更加平稳, 且在模型训练的过程中不易出现过拟合。随机梯度下降法的初始学习率为 0.01, 动量参数为 0.9。除此之外, 训练模型时使用 dropout^[60] 正则化技术避免过拟合, 且 dropout 的概率设为 0.2。在模型训练时, 随机初始化模型参数, 使用固定的迭次数来训练模型, 并在每次迭代中使用验证集来监视模型性能。一旦训练结束, 选择验证集上 F1 得分最高的模型作为最终模型, 并在测试集中评估其性能。模型训练过程中, 每个数据接收任务在 LSTM 模型中维度变化情况如图 4.8 所示, 并对各层维度变化做如下解释:

- ① 任务输入层: 小批量的输入中每个任务集可以看成是一个输入序列, 由于每个任务集中任务个数可能不同, 导致序列长度不同, 此时利用填充 (Padding) 技术使所有的序列具有相同的长度。每个任务有 20 个特征 (Feature), 这些特征值已经由字符型映射为整数型; 每次更新模型参数是

使用小批量更新，批量大小 (BATCH_SIZE) 设为 10，即每次从训练集中选择 10 个任务集用来计算损失更新网络参数。

- ② 词嵌入层：词嵌入层把每个任务的 20 个特征分别嵌入大小为 10 的词向量 (Embedding_size) 中，并把这 20 个特征的词向量连接起来，这样每个数据接收任务变成一个维度为 200 维的向量。
- ③ 隐藏层 1：隐藏层 1 的维度设置为 300 维，即把每个任务在词嵌入层的 200 维映射为隐藏层 1 中的 300 维；
- ④ 隐藏层 2：隐藏层 2 的维度也设置 300 维，即由隐藏层 1 的输出的 300 维映射到隐藏层 2 的 300 维；
- ⑤ 线性层：由隐藏层 2 输出的 300 维映射线性层的 20 维。其中，19 维代表天线，分别是密云站的 8 部天线，喀什站的 6 部天线，三亚站的 5 部天线；还有 1 维是“NULL”，即未分配。
- ⑥ 归一化指数函数层：把 Linear 层输出的数据映射为[0,1]之间的实数。即得到天线使用概率分布，该层也是 20 维。

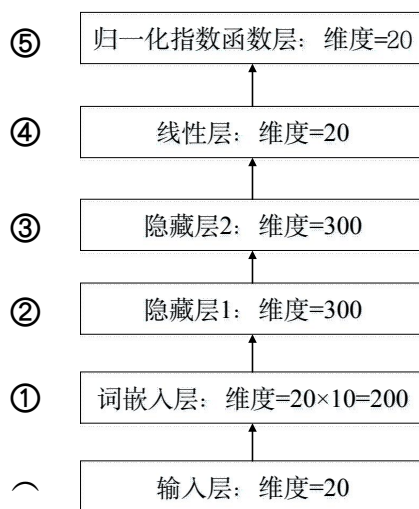


图 4.8 单个数据接收任务在网络中的维度变化

Figure 4.8 The dimension change of a data receiving task in LSTM

4.2.4.1 交叉熵损失函数

交叉熵是信息论中的一个重要概念，能够衡量同一个随机变量中的两个不同概率分布的差异程度，在机器学习中就表示为真实概率分布与预测概率分布

之间的差异。交叉熵的值越小，表示两个概率分布越靠近，模型预测效果就越好，因此模型训练过程就是通过不断的迭代，调整模型权重，从而降低损失函数值，使得模型预测的概率分布和实际概率分布尽可能的一致。在二分类情况下，模型对每个类别预测得到的概率为 p 和 $1-p$ ，此时交叉熵损失函数表达式如公式(4.10)所示，式中， y_i 代表样本 i 的标签，正类为 1，负类为 0； p_i 表示样本 i 预测为正类的概率。

$$L = \frac{1}{N} \sum_i L_i = \frac{1}{N} \sum_i \{-[y_i \cdot \log(p_i) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - p_i)]\} \quad \dots(4.10)$$

论文中 LSTM 模型是多分类模型，使用的交叉熵损失函数实际上是对二分类情况的扩展，计算公式如公式(4.11)所示，式中， M 代表分类的类别数，即天线的个数； y_{ic} 代表指示变量(0 或 1)，如果该类别和样本 i 的类别相同取 1，否则取 0； p_{ic} 代表对于预测样本 i 属于类别 c 的预测概率值，该值是归一化指数函数(Softmax)层的输出。归一化指数函数应用在多分类时，通常把输入值映射到 $[0,1]$ 之间，并保证和为 1，再计算交叉熵损失函数值。假设我们有一个数组 V ， V_i 表示 V 中的第 i 个元素，那么该元素的归一化指数函数值 S_i ，就是该元素的指数与所有元素指数和的比值，如公式(4.12)所示。

$$L = \frac{1}{N} \sum_i L_i = \frac{1}{N} \sum_i \left[-\sum_{c=1}^M y_{ic} \cdot \log(p_{ic}) \right] \quad \dots(4.11)$$

$$S_i = \frac{e^i}{\sum_j e^j} \quad \dots(4.12)$$

4.2.4.2 带动量的梯度下降法

论文中 LSTM 模型在模型误差反向传播过程中，使用带动量的随机梯度下降法(SGD, stochastic gradient descent)来优化模型参数。随机梯度下降法是一种非常经典的优化算法，首先从训练集中随机选择 m 个样本，然后计算这 m 个样本的梯度均值，每次都沿着当前的梯度下降方向往前走一小步。论文中 LSTM 模型训练时设置批量大小为 10，即每次从训练集中选则 10 个任务集来更新参数，由于每个任务集中任务数量不定，因此每次用于参数更新的样本量 m 是不

定的。SGD 中的超参数是学习率，在实际训练中，通常采用指数衰减的策略逐步的降低学习率，这给传统的 SGD 带来了几个问题，其一，学习率和学习率衰减方案对结果影响非常大，调整起来麻烦；其二，由于梯度方向往往不是指向最优解的，而且每个方向学习率是一样的，所以下降方向容易震荡，导致收敛慢；其三，容易陷入局部最优和鞍点。为了解决传统 SGD 存在的问题，在 SGD 方法中引入动量(momentum)。带动量的 SGD，把每次参数的更新量 v 考虑为本次的梯度下降 $-\eta\hat{g}$ 与上次参数更新量 v 乘上一个介于 $[0,1]$ 的动量因子 α 的和，

即 $v = \alpha v - \eta\hat{g}$ ，其中 η 为学习率， \hat{g} 为梯度估计。因此，带动量的随机梯度下降法不仅会利用当前时刻的梯度，同时会用到历史梯度信息，相当于把历史梯度信息按指数衰减进行加权平均，最后的效果就是加了“惯性”，让梯度较大但是来回震荡的方向会互相抵消，梯度较小但是一直保持一致方向的会不断累积，这样可以避免下降方向来回震荡从而加速收敛，也有利于逃出鞍点，其算法过程如算法 1 所示。本论文 LSTM 模型训练中学习率 η 设为 0.01，动量参数 α 设为 0.9，模型初始参数 θ 和初始速度 v 均采用随机初始化。

算法 1: 引入动量的随机梯度下降法

输入: 初始参数 θ ，初始速度 v

输入: 学习率 η ，动量参数 α

While 未满足停止条件 do

 从训练集中随机选择 m 个样本 $\{x_1, \dots, x_m\}$ 的小批量，其中数据 x_i 对应目标 y_i

 计算梯度估计: $\hat{g} \leftarrow \frac{1}{m} \nabla_{\theta} \sum_i L(f(x_i, \theta), y_i)$

 计算速度更新: $v \leftarrow \alpha v - \eta\hat{g}$

 参数更新: $\theta \leftarrow \theta + v$

End while

4.2.4.3 训练精度评价方法

本文使用准确率来评价 LSTM 模型的优劣，使用 F1 分数选择最佳模型。

(1) 准确率(Accuracy): 准确率是评价模型正确分类的能力，准确率越高，则模型越好。本文使用 TOP1 准确率和 TOP5 准确率来评价 LSTM 分类模型。TOP1 准确率计算公式如公式(4.13)所示，当 LSTM 分类模型在 Softmax 层输出概率值

最大的天线和实际使用天线相同时视为正确分类，TP1 代表正确分类的个数，P 代表样本的总个数。TOP5 准确率计算公式如公式(4.14)所示，当 LSTM 分类模型在 Softmax 层输出概率值较大的前 5 部天线中任意一部与实际使用天线相同时视为正确分类，TP5 代表正确分类的个数，P 代表样本总个数。

$$TOP1 = \frac{TP1}{P} \quad \dots(4.13)$$

$$TOP5 = \frac{TP5}{P} \quad \dots(4.14)$$

(2) F1 分数(F1 score): 为精确率(precision)与召回率(recall)的调和均值，两者都高的情况下，F1 分数也会很高，F1 分数越高，说明模型越稳健，本文使用 F1 分数来选择模型训练中的最佳模型，其计算公式如公式(4.15)所示。在本文的 LSTM 模型中，精确率代表预测为使用某部天线的所有接收任务中，实际上也使用此天线的任务所占比率；召回率代表实际上使用某部天线的所有接收任务中，预测结果也使用此天线的任务所占比率。

$$F1score = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad \dots(4.15)$$

4.2.4.4 训练结果

把 4.2.3.2 节提出的两层单向长短期记忆神经网络结构与一层单向结构、一层双向结构、两层双向结构进行对比分析。其中，一层单向结构，即隐藏层只有一层，只进行正向误差累积；一层双向结构，即隐藏层只有一层，模型进行正向误差累积，也进行反向误差累积；两层双向结构，即隐藏层有两层，只进行正向误差累积；两层双向结构，即隐藏层有两层，模型进行正向误差累积，也进行反向误差累积。从表 4.2 模型在训练集和测试集上的 F1 分数和 TOP1 准确率来看，一层单向结构和一层双向结构均比两层单向结构的值低，此时由于模型结构相对简单，导致学习不充分；两层双向结构和两层单向结构的值相当，但是两层双向模型结构相对复杂，模型参数量是两层单向模型的 2.5 倍，且从图 4.9 模型训练过程中损失函数变化来看，两层双向模型更易出现过拟合现象，故本文选择两层单向模型结构。图 4.9 中，细线代表训练集上的损失函数变化曲线，粗线代表验证集上的损失函数变化曲线。从图 4.9(c)两层单向长短期记忆神经网络损失函数变化曲线图可以看出，模型在第 3 次迭代已经开始收敛，随

着模型训练迭代次数的继续增加，其在训练集上的损失函数值仍在减少，在验证集上的损失函数值趋于平稳。在训练过程中，两层单向模型在验证集上的 TOP1 准确率最高为 78.0%，此时在训练集上的 TOP1 准确率为 85.7%，TOP5 准确率为 98.5%；模型在验证集上 F1 分数最高为 77.7%，此时在训练集上的 F1 分数 87.7%，保留此模型作为测试的分类模型。TOP5 准确率接近 100%，说明此 LSTM 模型能够提取天线使用优先级特征。

表 4.2 不同长短期记忆神经网络模型结构对比

Table4.2 The comparison among different structural LSTM neural network models

模型结构	参数量	评价标准	训练集	验证集
一层单向结构	61 万	F1 分数	84.0%	76.8%
		TOP1 准确率	84.9%	77.6%
一层双向结构	122 万	F1 分数	82.7%	76.8%
		TOP1 准确率	84.4%	77.7%
两层单向结构	134 万	F1 分数	87.7%	77.7%
		TOP1 准确率	85.7%	78.0%
两层双向结构	338 万	F1 分数	85.8%	77.6%
		TOP1 准确率	86.5%	78.3%

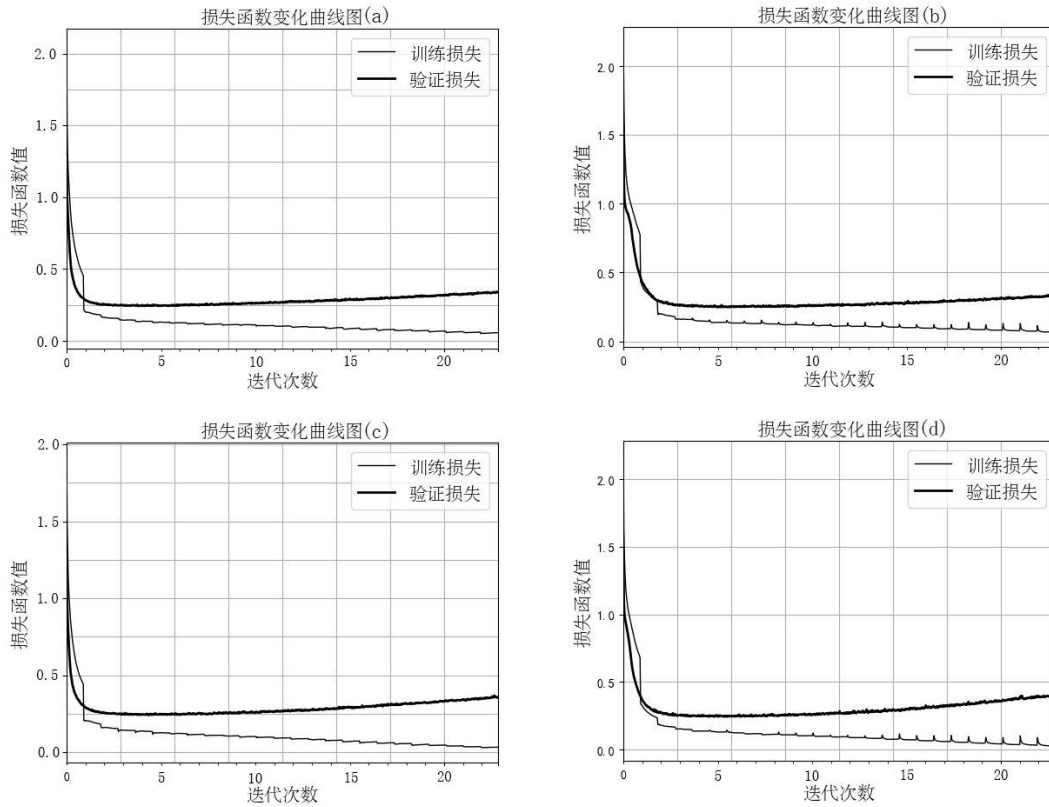


图 4.9 损失函数变化曲线图

(a)一层单向模型;(b)一层双向模型;(c)两层单向模型;(d)两层双向模型

Figure 4.9 The curve of loss function

4.3 地面站天线调度

4.3.1 调度流程

当对数据接收任务进行调度时，首先，使用一般启发式方法处理接收任务中联合接收的情况；其次，按照 4.2.2 节数据预处理流程，把接收任务处理成可输入模型的向量，再输入 LSTM 模型，从数据中提取相应的天线使用优先级特征；然后，结合 LSTM 提取的天线使用优先级特征、地面站现有天线使用优先级规则，得到新的地面站天线使用优先级规则，并生成初始调度方案；最后，对于初始方案中可能存在的资源选择冲突，使用基于集束思想的启发式搜索消解冲突，得到实际可行的接收任务调度方案，具体流程如图 4.10 所示。

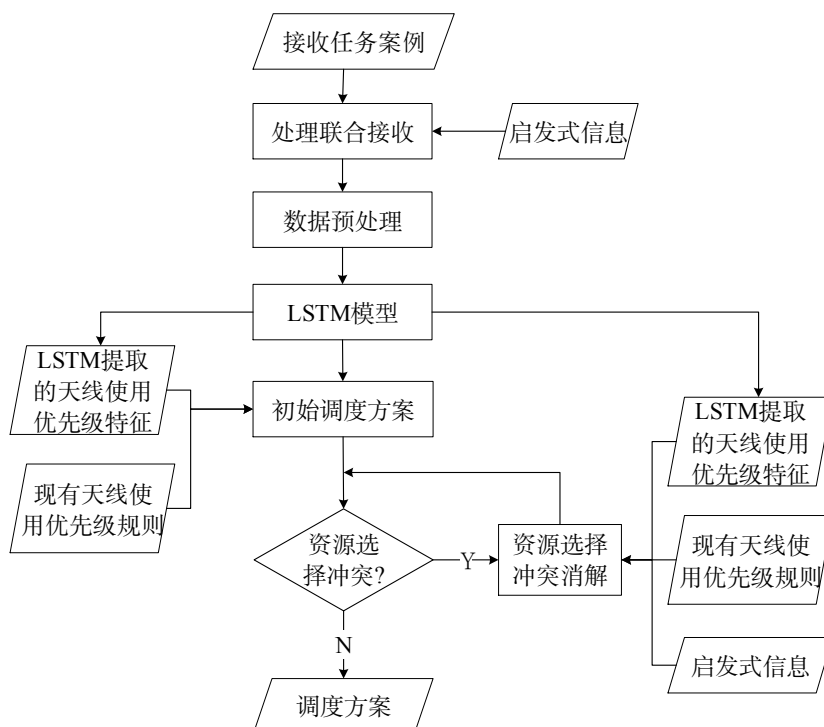


图 4.10 地面站天线调度方法流程

Figure 4.10 The flow of the ground station antenna scheduling method

4.3.2 数据联合接收处理

(1) 启发信息

地面站处理联合接收常用启发式信息总结如下：

启发信息 1： 优先级裁剪使任务集冲突度降低的任务。

启发信息 2： 优先裁剪可选地面资源最少的任务。

启发信息 3： 优先裁剪任务持续时间短的任务。

启发信息 4： 优先裁剪任务开始时间较晚的任务。

(2) 处理流程

处理联合接收的过程也是为数据接收选择地面接收站的过程。当两个任务属于联合接收时，为了节省地面站接收资源的切换成本和提高接收天线利用效率，需要取消或裁减部分接收任务。图 4.11 为基于一般启发式搜索的联合接收处理流程。首先，根据 3.3.2 节任务时间完全重叠的定义，找出完全重叠任务集合 COT ，若 COT 不为空，则直接取消被包含的任务。其次，根据任务时间部分重叠的定义，找出部分重叠任务集合 POT ，若 POT 不为空，则根据启发式信息 1，使用公式(3.5)计算裁剪后的可能冲突度，优先选择裁剪后的任务集冲突

度最小的方式对任务进行裁剪；若引起的冲突度相同，则根据启发式信息 2，裁剪地面站接收资源少的任务；若地面站接收资源一样多，则根据启发式信息 3，裁剪持续时间短的任务；如果任务持续时间相同，根据启发式信息 4，裁剪开始时间较晚的任务。在地面站实际运行系统中，为了保证数据接收的完整性，任务时间重叠超过一定的时间 t ，才视为是任务时间重叠，所以任务时间裁剪时需要保留时间 t 的重叠时间。

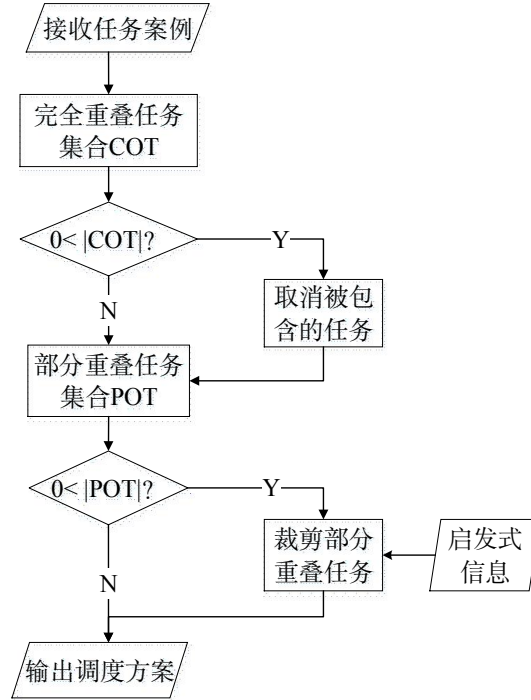


图 4.11 数据联合接收处理流程图

Figure 4.11 The processing of data repeated reception

4.3.3 资源选择冲突消解

使用 LSTM 提取的天线使用优先级特征和地面站站现有天线使用优先级规则，为每个接收任务都分配了接收天线，得到了初始调度方案。如果同一地面站的两个任务在时间上处于包含或部分重叠关系，所分配的接收天线相同，则会出现资源选择冲突的情况，3.2.3 节地面站天线约束中明确要求同一时刻一部天线只能接收一个任务，此时会导致接收任务不能完全接收。因此，在得到初始调度方案后，论文使用基于集束搜索思想的启发式搜索方法依次处理各地面站天线选择冲突的情况，得到实际可用的地面站天线调度方案。

(1) 启发信息

地面站资源选择冲突消解常用的启发式信息总结如下：

启发信息 1: 优先调度资源选择冲突度大的冲突集。

启发信息 2: 优先调度任务优先级高的数据接收任务。

启发信息 3: 优先调度可用天线数量少的数据接收任务。

启发信息 4: 优先调度任务持续时间长的任务。

启发信息 5: 优先调度任务开始时间早的任务。

(2) 集束搜索

集束搜索(Beam Search)是一种近似搜索算法(approximate search algorithm), 也被称为启发式搜索算法(heuristic search algorithm), 其使用广度优先搜索来构建搜索树, 可降低内存需求 (without consuming too much memory), 但不一定得到全局最优解。集束搜索每次输出的并不是可能性最大的解, 而是可能性较大的前几种情况, 即集束宽 (beam size), 通常用 k 表示, 不同集束宽的大小, 代表一次性会考虑不同的候选解。如果集束宽太小, 解的范围设置的太窄, 难以寻求到较优的解, 如果集束宽太大, 将会使解空间太大, 内存占用和计算量都很大, 影响计算效率。因此, 在实际应用中需要综合搜索效率和解的质量, 根据具体情况设置束宽大小。

图 4.12 演示了一个集束搜索过程, 假设输出序列的词典中包含 5 个元素, 即 $y = \{A, B, C, D, E\}$, 设束宽为 2。在时间步 1 时, 选择概率值最大的 2 个词 A、C, 作为该时间步的候选输出序列; 在时间步 2, 结合时间步 1 的 2 个候选序列, 从 $2*|y|$ 个序列中选择概率值最大的 2 个序列 AB、CE, 作为该时间步的候选输出序列; 在时间步 3, 基于时间步 2 的 2 个候选序列, 从 $2*|y|$ 个序列中选择概率值最大的 2 个序列 ABD、CED, 作为该时间步的候选输出序列。当遍历完序列的 3 个时间步后, 便可以得到 2 个候选序列, 即为最有可能的 2 个候选解 ABD、CED。

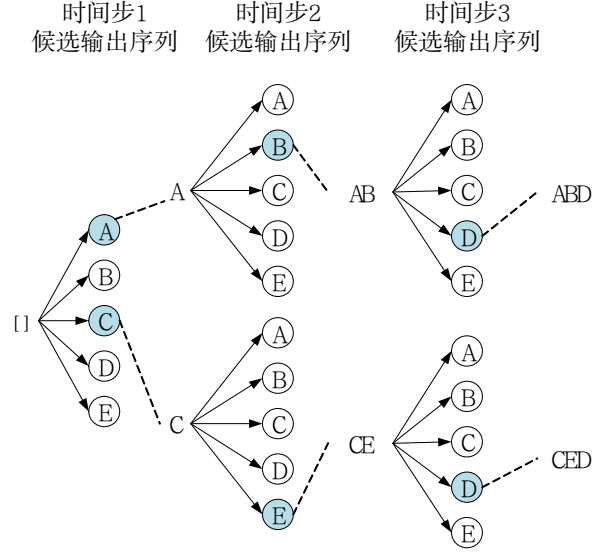


图 4.12 束搜索过程

Figure 4.12 The process of Beam Search

(3) 冲突消解流程

论文使用基于集束搜索的启发式搜索方法，依次消解每个地面站的资源选择冲突，且集束搜索的集束宽大小为各地面站当前可用天线个数，消解流程如图 4.13 所示。首先，根据定义 3.4 找出当前任务集 T 中资源选择冲突任务集合 $RCCT$ ，若集合 $RCCT$ 为空集说明不存在资源选择冲突，输出调度方案，否则需进行冲突消解；然后，选择集合 $RCCT$ 中冲突度最大的冲突集 $RCCT_m$ ，为 $RCCT_m$ 中的任务重新分配天线。假设冲突集 $RCCT_m$ 中有 m 个相互冲突的任务，并且这 m 个任务已经按照启发式信息 2、3、4、5 排好序了，综合 LSTM 提取的天线使用优先级特征和现有地面站天线使用优先级规则，为第一个任务重新分配天线，并使用公式(3.7)和公式(3.8)计算当前任务集 T 的冲突度和接收成本，使用集束搜索的思想，保留冲突度小且接收成本较低的前几个方案，依次处理该任务冲突集中的每一个接收任务(循环 n 次)，直到任务集 T 的冲突集合 $RCCT$ 为空集；如果循环 1000 次之后，还没有跳出循环，则可以适当裁剪接收任务。

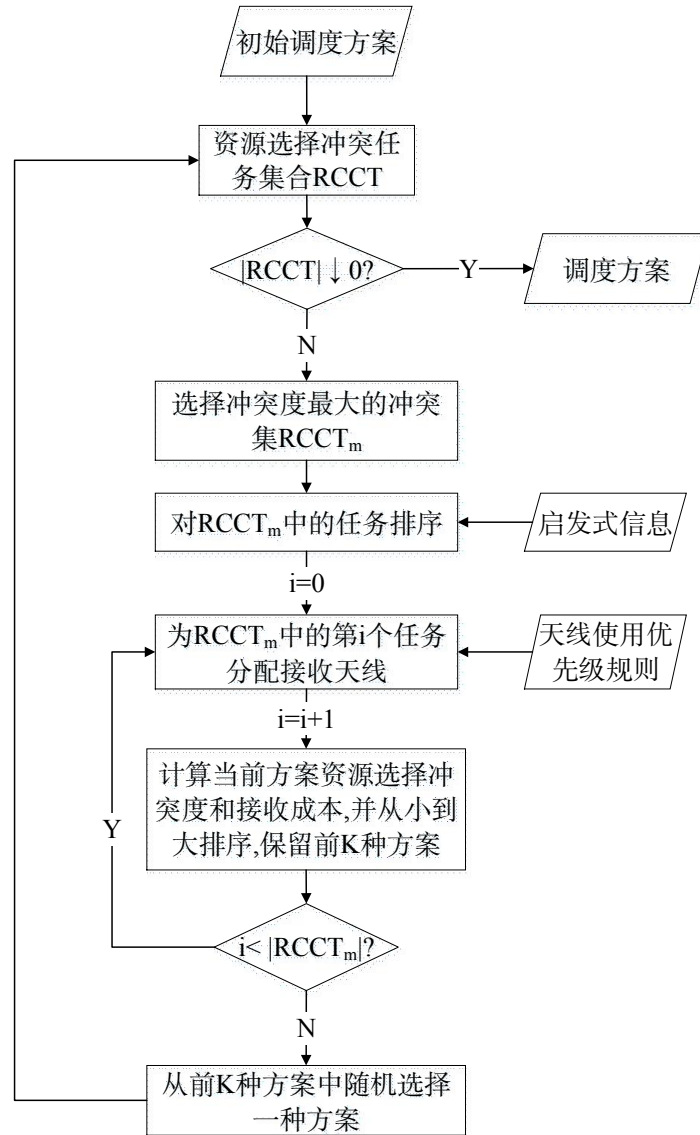


图 4.13 资源选择冲突处理流程图

Figure 4.13 The processing of antenna selection conflict

4.4 本章小结

本章，首先，设计了天线调度方法流程；其次，详细介绍了历史调度数据来源、数据预处理流程；然后详细介绍了 LSTM 模型结构、训练方法和选择策略；最后，详细介绍了数据联合接收和资源选择冲突处理流程。

第 5 章 实验结果与分析

为验证调度方法的正确性和有效性, 本论文采用了中国遥感卫星地面站实际调度场景下的卫星数据接收任务和地面站资源配置, 对多个案例进行地面站天线调度, 并结合 3.3.3 节中的接收成本函数, 对比分析了本论文算法、原算法和原算法+人工调整这三种方法得到的调度方案优劣。目前, 中国遥感卫星地面站主要对密云站、喀什站、三亚站共三个地面站接收天线进行调度, 各地面站的天线资源编号、数量如表 5.1 所示。其中, 密云站现有 8 部接收天线, 喀什站现有 6 部接收天线, 三亚站现有 5 部接收天线。本论文的调度算法采用 Python 语言实现, 运行的硬件环境为 CPU 处理器: Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz 2.00GHz, 内存: 16G。

表 5.1 地面站天线资源

Table 5.1 The antenna resources of each ground station

地面站名 称	地面站 编号	天线编号	数 量
密云站	MYC	MY12_1、MY12_2、MY12_3、MY12_4、MY12_5、MY06_1、 MY10_1、MY11_1	8
喀什站	KSC	KS12_1、KS12_2、KS12_3、KS12_4、KS12_5、KS73_1	6
三亚站	SYC	SY12_1、SY12_2、SY12_3、SY12_4、SY12_5	5

5.1 案例规模

论文从遥感卫星地面站实际运行业务中选取了 15 组不同规模的案例, 表 5.2 为每个案例的接收任务数量和接收任务总时长, 从案例 1 到案例 15 接收任务数量和接收任务总时长逐渐增加。

表 5.2 案例规模

Table 5.2 The scale of cases

案例	任务数量/个	任务总时长/秒	案例编号	任务数量/个	任务总时长/秒
1	14	6692	9	57	27541
2	19	8687	10	60	30548
3	21	10711	11	60	30364
4	29	14892	12	64	31427
5	31	15352	13	78	38479
6	34	16890	14	122	59740
7	35	16738	15	134	66034
8	43	21413			

5.2 LSTM 特征提取与分析

在数据接收任务输入 LSTM 模型之前, 采用 4.2.2 节数据预处理方法, 对接收任务进行任务集划分、整数编码和词嵌入操作。表 5.3 给出了使用 LSTM 模型在每个案例的 TOP1 准确率和 TOP5 准确率(具体定义见 4.2.4.3 节), 由表可知, TOP1 准确率平均值为 67.8%, TOP5 准确率平均值为 97.71%, LSTM 模型在验证集上的 TOP1 准确率为 77.7%, 测试案例平均 TOP1 准确率为 67.8%, 比验证集上准确率低了 9.9%, 这是由于不同时期天线使用优先级规则略有变化, 而且同一时期同一颗卫星会有多个候选天线, 导致模型泛化能力较差。但是, TOP5 准确率接近于 1, 这表明 LSTM 模型能够从历史调度数据中提取天线使用特征。

表 5.3 LSTM 模型准确率

Table 5.3 Accuracy of the LSTM model in each case

案例	TOP1 准确率	TOP5 准确率	案例	TOP1 准确率	TOP5 准确率
1	71.43%	92.14%	9	58.93%	100.00%
2	36.84%	100.00%	10	71.67%	95.00%
3	80.00%	100.00%	11	73.33%	98.33%
4	65.00%	92.86%	12	81.25%	98.44%
5	83.87%	100.00%	13	72.56%	98.72%
6	69.70%	96.97%	14	66.94%	99.17%
7	55.88%	100.00%	15	69.17%	93.98%
8	60.47%	100.00%	平均值	67.80%	97.71%

论文结合 15 组测试案例，分别对密云站、喀什站、三亚站三个地面站，由 LSTM 提取的天线使用优先级特征进行了归纳总结，并与地面站现有天线使用优先级规则进行了对比分析，对比结果如附录中附表 1、附表 2、附表 3 所示，总体统计情况如表 5.4 所示。从表 5.4 中可见，LSTM 模型提取的天线使用优先级特征和现有天线使用优先级规则有 88%是一致的，12%是不一致的。其中，不一致中的“基本一致”代表最优选天线和次优选天线两者的优先级区分度不明确；“规则变更导致”是由于随着时间的推移天线使用规则有些微变化导致；“数据量不足导致”是由于某颗卫星训练数据不足导致，例如地面站刚开始接收 KX-09、ZY1E 这两颗卫星，数据累积较少，所以 LSTM 提取的特征与现有规则出入较大。

(1) 密云站：共统计了 23 颗卫星的天线使用优先级特征，见附表 1。其中，有 21 颗卫星的天线使用优先级特征和现有天线使用优先级规则一致，且 LSTM 提取的特征给出了更为精细的优先级顺序，较典型的有 HJ-1A、ZY-02C、SJ-9A；不一致的有 2 颗，KX-09 和 ZY1E，这两颗卫星是由于数据量不足导致差别较大。

(2) 喀什站：共统计了 34 颗卫星的天线使用优先级规则，见附表 2。其中，有 28 颗卫星的天线使用优先级特征和现有天线使用优先级规则一致，且 LSTM 提取的特征给出了更为精细的优先级顺序，较典型的有 JL101C、JL102C、

TY-12、ZY-02C; 不一致的有 6 颗, 其中 GF-1 与现有规则差别较小, CBERS-04、PLEIADES-1A、PLEIADES-1B 三颗卫星是由于现有天线使用规则变化导致差别较大, KX-09、ZY1E 两颗卫星是由于数据量不足导致的差别较大。

(3) 三亚站: 共统计了 26 颗卫星的天线使用优先级特征, 见附表 3。其中有 24 颗卫星的一致, 且 LSTM 提取的特征给出了更为精细的优先级顺序, 较典型的有 JL101C、JL102C、KX-09、LANDSAT-8; GF-1 和 SJ-9A2 颗卫星的基本一致, 在 LSTM 提取的特征里, 首选天线是现有规则里的次优选天线, 次优选天线是现有规则里的首选天线, 且在 LSTM 提取的特征里两者概率值上相差小于 0.05。

表 5.4 天线使用优先级规则对比 (单位:颗)

Table 5.4 The comparison of antennas use priority rules

结果	密云站	喀什站	三亚站
一致	21	28	24
基本一致	0	1 (GF-1)	2 (GF-1、SJ-9A)
不一致		3 (CBERS-04、	
	规则变更导致	PLEIADES-1A、	0
		PLEIADES-1B)	
数据量不足导致	2 (KX-09、ZY1E)	2 (KX-09、ZY1E)	0
总计	23	34	26

综上, 三个地面站中 LSTM 提取的天线使用优先级规则和地面站现有天线使用优先级规则, 两者各有优缺点, 总结如下:

(1) LSTM 提取的天线使用优先级特征更为精确, 地面站现有天线使用优先级规则且较为粗略。LSTM 模型使用 Softmax 函数将天线使用优先级特征以概率分布的形式给出, 概率值越大则天线使用优先级越高, 概率值越小则天线使用优先级越低, 概率值为 0 则说明该天线不是这条数据接收任务的候选天线, 因此优先级更为精确; 而现有规则里的优先级是人为制定的, “1”代表优先级最高, “2”次之, 依次类推, “-1”代表天线不可用, 这种划分方式带有一定的主观性, 且划分较为粗略, 区分度低。

(2) LSTM 提取的天线使用优先级规则, 相比于地面站现有天线使用优先级规则时效性较差。地面站天线使用优先级规则会受到地面站资源情况、新增

卫星等影响，因此优先级规则会有些微变化；而 LSTM 是从历史调度数据中提取的优先级特征，虽然融合了地面站天线调度的实际环境和调度知识，例如地面站人为制定的天线使用优先级规则、卫星优先级、任务的紧急程度及其他难以用数学语言描述的规则等，但是具有一定的延迟性。

因此，在调度方案资源选择冲突消解时，综合使用两种优先级规则，具体策略如公式(5.1)所示，使用 1 减去 LSTM 提取的天线使用概率值，并与地面站现有优先级规则在数值上对应相乘，得出新的天线使用优先级规则，见附表 1、2、3。表中，P1 行为 LSTM 提取的天线使用优先级特征，与公式(5.1)的自变量 P_1 相对应，数值越大，优先级越高。P2 行为地面站现有天线使用优先级规则，与公式(5.1)的自变量 P_2 相对应，数值为-1 时，天线不可用；数值大于 0 时，值越小天线使用优先级越高，即 1 为最优选，2 为次优选，以此类推；P3 行为新的天线使用优先级规则，与公式(5.1)的因变量 P_3 相对应，数值小于 0 时，天线不可用；数值大于 0 时，值越小天线使用优先级越高。

$$P_3 = (1 - P_1) * P_2 \quad \dots(5.1)$$

式中， P_1 代表 LSTM 在 Softmax 层输出的概率值，即 LSTM 从数据中提取的地面站天线使用优先级特征； P_2 代表地面站现有天线优先级使用规则； P_3 代表 LSTM 提取的天线使用特征和地面站现有优先级规则综合得到的天线使用优先级规则。

新的天线使用优先级规则相当于给地面站现有优先级规则添加了权重因子，有以下几点优势：

(1) 地面站现有天线使用优先级规则中，不可用天线的优先级在数值上取-1，而负数乘以任何数依然为负数，故可以保证在新的天线使用规则中不可用天线依然是不可用。

(2) LSTM 提取的天线使用特征在数值上越大，则天线使用优先级越高；而地面站现有天线使用优先级规则在数值上越低，天线使用优先级越高，两者相反。故 $(1 - P_1)$ 的值越小，对应的天线使用优先级越高， $(1 - P_1) * P_2$ 即给现有天线使用优先级 P_2 添加了权重因子，既保证了现有天线使用优先级规则的时效性，

又使得新的优先级规则有更精细的区分度。

(3) 更细粒度的天线使用优先级规则, 使得不同的接收方案成本更具区分度, 也更有利于获取最优解。

例如, 附表 1 中 CBERS-04 卫星在密云站的天线使用优先级规则, 从 P1 行可见 MY12_1 为最优选天线, MY06_1、MY10_1、MY11_1、MY12_2、MY12_3、MY12_4、MY12_5 均为可用天线, 且有一定的区分度; 从 P2 行可见 MY12_1 在现有规则里也为最优选, MY11_1、MY12_2、MY12_3、MY12_4、MY12_5 为次优选天线, 但是 MY06_1、MY10_1 不可用, 因此 LSTM 提取的特征与地面站现有规则在整体一致的前提下, 仍有一定的出入。P3 代表经公式(5.1)处理之后的天线使用优先级规则, 优先级从高到低依次为 MY12_1、MY11_1、MY12_4、MY12_3、MY12_5、MY12_2, MY06_1、MY10_1 不可用, 与现有优先级规则一致, 且区分度更加精细。

5.3 求解时间和接收成本

论文从算法求解时间和接收方案成本两个角度来比较本文算法、原算法和原算法+人工调整这三种方式的调度方案优劣。15 组案例每个案例的接收成本和算法求解时间如表 5.5 所示(数据均为每组案例运行 20 次取平均得到), 本文算法接收成本和求解时间的平均值分别是原算法的 91.25%和 41.76%。

图 5.1 为接收成本折线统计图 (图中数据为接收成本归一化后的值), 整体来看本文算法的接收成本曲线均位于原算法的接收成本曲线下方, 且在 15 个案例中有 86.67%的案例, 本文算法接收方案成本低于原算法接收成本; 本文算法接收成本方差为 272.39, 低于原算法 284.83, 说明本文算法求解结果更稳定, 图 5.1 也表明原算法的接收成本曲线波动比本文算法更明显。图 5.2 为求解时间折线统计图, 从图中可直观看出本文算法求解时间效率高于原算法, 且本论文算法求解时间相比于原算法更稳定, 经计算得出, 本文算法求解时间方差为 4.09, 原算法求解时间方差为 30.15, 仅为原算法的 13.57%。

案例任务数量、案例冲突度与本文算法求解时间的相关系数分别为 0.97、0.96, 与原算法的相关系数分别为 0.50、0.60, 说明本文算法和原算法的求解时间均与案例任务数量和任务冲突度相关, 且本文算法求解效率受案例任务数量

和案例冲突度的影响大于原算法。在本论文算法结果中，对比案例 2 和案例 3、案例 5 和案例 6、案例 9 和案例 10、案例 10 和案例 11，说明当案例的任务数量相当，任务冲突度越大，计算消耗的时间就越多；对比案例 4 和案例 12、案例 14 和案例 15，说明当任务集的冲突度接近时，算法的求解时间会随着案例任务数量的增加而变长。

综上，整体来看本文算法在调度精度和求解效率两方面均优于原算法，且本论文使用的是启发式搜索来消解冲突，相比于遗传算法求解更为简单，求解结果和求解时间更加稳定。

表 5.5 结果对比

Table 5.5 The comparison of scheduling solutions between different algorithm

案 例	任务数量/ 个	冲突度	接收成本			求解时间/秒	
			本文算法	原算法	原算法+人工调 整	本文算法	原算法
1	14	1.00	7.00	34.35	7.00	0.73	2.00
2	19	3.83	15.80	16.80	17.30	1.12	5.50
3	21	3.10	10.00	9.70	9.70	0.77	2.30
4	29	4.53	10.00	10.40	10.20	1.65	3.00
5	31	3.70	13.80	13.80	13.80	1.21	1.20
6	34	5.79	21.10	20.30	20.30	1.67	21.47
7	35	6.18	22.20	23.40	23.90	1.63	6.60
8	43	6.04	29.50	30.70	30.70	2.18	7.30
9	57	8.22	34.50	36.90	36.90	2.74	8.00
10	60	5.94	27.00	29.20	27.30	2.31	7.10
11	60	6.70	25.20	27.60	27.10	2.51	3.80
12	64	4.83	27.70	27.10	27.10	2.41	8.00
13	78	7.37	33.70	36.56	35.90	3.22	6.00
14	122	13.94	62.30	67.90	67.40	6.06	14.70
15	134	14.63	60.50	62.50	66.60	8.16	13.55

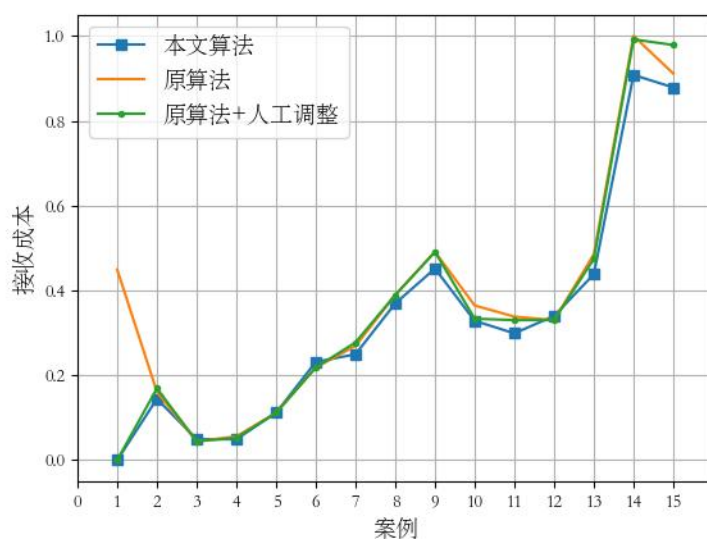


图 5.1 接收成本折线图

Figure 5.1 The Receiving cost of every case

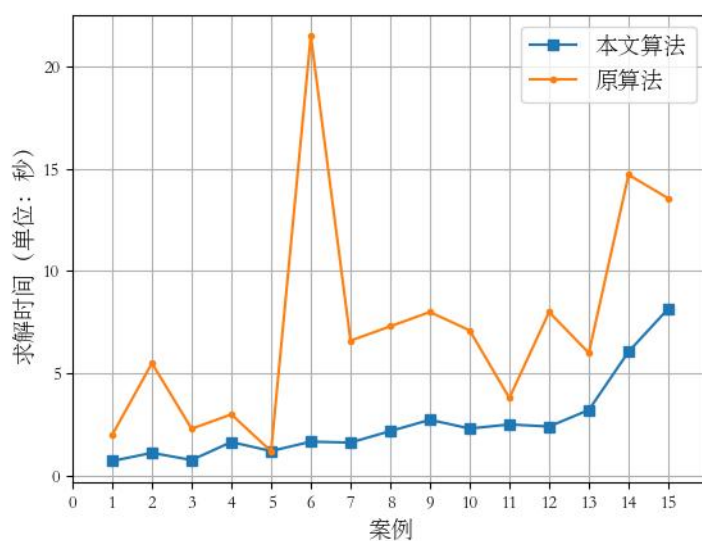


图 5.2 案例求解时间折线图

Figure 5.2 The solve time of every case

5.4 典型案例分析

5.4.1 联合接收处理

从节省接收资源情况来评价联合接收处理结果，接收资源节省越多，则联合接收处理结果越好。表 5.6 列举了案例 14 中 LANDSAT-8、CBERS-04 数据联合接收处理结果。从计划接收开始时间和接收结束时间来看，LANDSAT-8

在密云站、喀什站、三亚站这 3 个地面站中存在数据联合接收，CBERS-04 在密云站、三亚站这 2 个地面站存在数据联合接收，需要对联合接收部分做处理。LANDSAT-8 在密云站和三亚站计划接收时间重叠 175 秒，根据中国遥感卫星地面站规定的联合接收重叠时间最多为 60 秒，因此本论文对可用接收资源相对较少的三亚站接收任务开始时间进行裁剪，并截掉 115 秒，原算法未做处理；密云站和三亚站的联合接收时间包含了喀什站的接收时间，本论文取消了喀什站接收任务。CBERS-04 在密云站、三亚站接收任务重叠 213 秒，本论文把可用接收资源相对较少的三亚站接收任务开始时间裁掉了 153 秒；原算法把密云站接收结束时间裁掉了 153 秒，考虑到地面资源相对于接收任务量的紧缺性，本文算法处理结果更合理。

表 5.6 案例 14:任务 1~16 卫星数据联合接收处理结果
Table 5.6 Case14: the joint receiving processing result of task 1~16

任务序号	卫星编号	地面站	计划			本算法			原算法		
			接收开始时间	接收结束时间	接收时长/秒	接收开始时间	接收结束时间	接收时长/秒	接收开始时间	接收结束时间	接收时长/秒
1	GF-2	MYC	11:31:39	11:40:01	502	11:31:39	11:40:01	502	11:31:39	11:40:01	502
2	GF-1D	MYC	11:32:22	11:42:52	630	11:32:22	11:42:52	630	11:32:22	11:42:52	630
3	GF-2	SYC	11:42:21	11:48:30	369	11:42:21	11:48:30	369	11:42:21	11:48:30	369
4	GF-6	MYC	11:47:53	11:58:20	627	11:47:53	11:58:20	627	11:47:53	11:58:20	627
5	SJ-9A	KSC	11:49:02	11:58:54	592	11:49:02	11:58:54	592	11:49:02	11:58:54	592
6	ZY-02C	KSC	11:52:05	12:03:40	695	11:52:05	12:03:40	695	11:52:05	12:03:40	695
7	CBERS-04	MYC	11:54:14	12:04:35	621	11:54:14	12:04:35	621	11:54:14	12:02:02	468
8	LANDSAT-8	MYC	11:55:34	12:05:32	598	11:55:34	12:05:32	598	11:55:34	12:05:32	598
9	LANDSAT-8	KSC	11:58:57	12:06:06	429	00:00:00	00:00:00	0	11:58:57	12:06:06	429
10	NPP	MYC	12:00:01	12:11:15	674	12:00:01	12:11:15	674	12:00:01	12:11:15	674
11	GF-6	SYC	12:02:19	12:04:30	131	12:02:19	12:04:30	131	12:02:19	12:04:30	131
12	CBERS-04	SYC	12:01:02	12:07:14	372	12:03:35	12:07:14	219	12:01:02	12:07:14	372
13	HJ-1B	KSC	12:03:56	12:06:56	180	12:03:56	12:06:56	180	12:03:56	12:06:56	180
14	GF-1C	MYC	12:04:31	12:14:23	592	12:04:31	12:14:23	592	12:04:31	12:14:23	592
15	LANDSAT-8	SYC	12:02:37	12:11:05	508	12:04:32	12:11:05	393	12:02:37	12:11:05	508
16	SPOT-6	KSC	12:08:40	12:17:31	531	12:08:40	12:17:31	531	12:08:40	12:17:31	531

5.4.2 资源选择冲突

表 5.7 至表 5.12 为接收任务调度方案, 表 5.7、5.8 分别为案例 10 和案例 15 在密云站的部分接收任务调度结果, 表 5.9、5.10 分别为案例 1 和案例 6 在喀什站的部分接收任务调度结果, 表 5.11、5.12 分别为案例 14 和案例 15 在三亚站的部分接收任务调度结果。每个表中包括计划接收任务的卫星编号、任务优先级、任务接收时长, 并分别给出了本文算法、原算法、原算法+人工调整三种方式得到的接收时长和天线调度结果, 其中, 任务优先级分为 5 级, 由高到低依次用 P1~P5 来表示。

表 5.7 为密云站所属的四个卫星数据接收任务调度结果, 这四个任务在时间上可能存在资源选择冲突。其中, 本文算法、原算法和原算法+人工调整三者给出的任务 2、任务 3 调度结果一致; 任务 1、任务 4 的不一致。查看附表 1, GF-2 卫星在密云站的最优先天线 MY12_3, CBERS-04 卫星在密云站的最优选天线为 MY12_1, 故本文算法相比与原算法的调度结果更优, 且本文算法和原算法+人工调整后的调度结果一致。

表 5.7 案例 10:2019 年 9 月 10 日密云站部分接收任务调度结果

Table 5.7 Case10: Some tasks scheduling results in MYC on September 10, 2019

任务序号	卫星编号	任务		本文算法		原算法		原算法+人工调整	
		任务	任务	接收		接收		接收	
		优先	时长	接收	天线	接收	天线	接收	天线
		级	/秒	时长/秒		时长/秒		时长/秒	
1	GF-2	P3	637	637	MY12_3	637	MY12_5	637	MY12_3
2	ZY-03	P3	523	523	MY12_2	523	MY12_2	523	MY12_2
3	GF-1C	P3	644	644	MY12_4	644	MY12_4	644	MY12_4
4	CBERS-04	P4	517	222	MY12_1	222	MY12_3	222	MY12_1

表 5.8 为密云站所属的六个卫星数据接收任务调度结果，这六个任务在时间上可能存在资源选择冲突。ZY-03、GF-1C 相比于其他任务优先级较高，查附表 1 可知，ZY-03 卫星在密云站的最优先天线为 MY12_2，GF-1C 卫星在密云站的最优选天线为 MY12_3，本文算法和原算法均保证了优先级高的接收任务优先调度，而原算法+人工调整后的方案未能保证优先级高的任务优先调度。ZY-02C 在密云站里 MY12_5 和 MY12_3 的天线使用优先级相同，SJ-9A 在密云站里 MY12_5 和 MY12_3 优先级相同，故此本文算法和原算法结果相当。(表中接收时长减少均为数据联合接收处理结果)

表 5.8 案例 15:2019 年 9 月 15 日密云站部分接收任务调度结果

Table 5.8 Case15: Some tasks scheduling results in MYC on September 15, 2019

任务序号	卫星编号	任务		本文算法		原算法		原算法+人工调整	
		任务	任务	接收		接收		接收	
		优先级	时长/秒	接收时长/秒	天线	接收时长/秒	天线	接收时长/秒	天线
1	ZY-02C	P5	586	586	MY12_5	381	MY12_3	381	MY12_2
2	SJ-9A	P5	399	196	MY12_3	196	MY12_5	196	MY12_5
3	ZY-03	P3	420	420	MY12_2	420	MY12_2	420	MY12_3
4	CBERS-04	P4	563	563	MY12_1	563	MY12_1	563	MY12_1
5	LANDSAT-8	P5	700	700	MY12_4	700	MY12_4	700	MY12_4
6	GF-1C	P3	580	580	MY12_3	580	MY12_3	580	MY12_3

表 5.9 为喀什站所属的九个卫星数据接收任务调度结果。其中本文算法完整接收任务 3，而原算法因任务时间冲突而取消任务 3，导致任务 3 的数据未能成功接收；原算法给出的调度方案经人工调整后，任务 3 被成功安排接收天线。查看附表 2 可知，GF-1B、GF-5、GF-1 在喀什站的最优选天线均为 KS12_4，GF-1B 在喀什站有 5 部可用天线，GF-5、GF-1 均有 6 部可用天线，故优先调度任务 1 卫星数据；其次任务 3 比任务 2 持续时间更长，故优先调度任务 3，最后调度任务 2，故依次给任务 1、任务 3、任务 2 分配 KS12_4、KS12_3、KS12_5 接收天线，该方案相比于原算法更优。

表 5.9 案例 1:2019 年 9 月 13 日喀什站接收任务调度结果

Table 5.9 Case1: Some tasks scheduling results in KSC on September 13, 2019

任务序号	卫星编号	任务优先级	任务时长/秒	本文算法		原算法		原算法+人工调整	
				接收时长/秒	天线	接收时长/秒	天线	接收时长/秒	天线
1	GF-1B	P3	532	532	KS12_4	532	KS73_1	532	KS73_1
2	GF-5	P3	364	364	KS12_5	364	KS12_3	364	KS12_3
3	GF-1	P3	548	548	KS12_3	0	NULL	548	KS12_4
4	LANDSAT-8	P5	267	267	KS12_4	267	KS12_4	267	KS12_4
5	JL106B	P4	543	543	KS12_5	543	KS12_5	543	KS12_5
6	GF-1D	P3	338	338	KS12_4	338	KS12_4	338	KS12_4
7	HXMT	P3	606	606	KS12_5	606	KS12_5	606	KS12_5
8	GF-5	P3	615	615	KS12_4	615	KS12_4	615	KS12_4
9	CSES	P3	544	544	KS12_3	544	KS12_3	544	KS12_3

表 5.10 为喀什站所属的十个数据接收任务调度结果，且这十个任务在时间上可能存在资源选择冲突。本文算法和原算法相比，任务 3、4、6、8 四个接收任务分配的接收天线不同。四个接收任务本文算法分配的接收天线依次为 KS12_5、KS12_3、KS12_5、KS12_4，原算法依次为 KS12_3、KS12_1、KS12_3、KS12_5，查表后计算本文算法的方案所需接收成本低于原算法，故本文算法更优。

表 5.10 案例 6:2019 年 9 月 13 日喀什站部分接收任务调度结果

Table 5.10 Case6: Some tasks scheduling results in KSC on September 13, 2019

任务 序 号	卫星编号	任 务 优 先 级	任 务 时 长 /秒	本文算法		原算法		原算法+人工调 整	
				接收	天线	接收	天线	接收	天线
				时长/ 秒		时长 /秒		时长 /秒	
1	SPOT-6	P1	597	597	KS12_3	597	KS12_3	597	KS12_3
2	GF-2	P3	213	213	KS12_4	213	KS12_4	213	KS12_4
3	GF-6	P3	380	380	KS12_5	380	KS12_3	380	KS12_3
4	SJ-9A	P5	574	574	KS12_3	574	KS12_1	574	KS12_1
5	PLEIADES-1B	P1	278	278	KS12_4	278	KS12_4	278	KS12_4
6	GF-1C	P3	515	515	KS12_5	515	KS12_3	515	KS12_3
7	HJ-1B	P5	180	180	KS12_2	180	KS12_2	180	KS12_2
8	ZY-02C	P5	634	634	KS12_4	634	KS12_5	634	KS12_5
9	CBERS-04	P4	727	727	KS12_2	727	KS12_2	727	KS12_2
10	SPOT-7	P1	542	542	KS12_3	542	KS12_3	542	KS12_3

表 5.11 为三亚站所属的七个数据接收任务。其中，本文算法和原算法给出接收方案中，任务 1、任务 5 接收天线不同。查看附表 3 可知，JL102C、KX-09 两颗卫星数据接收的候选天下均为 SY12_3、SY12_4、SY12_5，且地面站站现有天线使用优先级规则中这三部后选天线的优先级相同，在综合了 LSTM 提取的优先规则和地面现有优先级规则得到的新的天线使用优先级规则中，三者有一定的区分度。故本文算法，使用新的天线使用优先级规则分别为任务 1 和任务 5 分配了 SY12_5 和 SY12_4 接收天线。

表 5.11 案例 14:2019 年 9 月 16 日三亚站部分接收任务调度结果

Table 5.11 Case15: Some tasks scheduling results in SYC on September 16, 2019

任务 序号	卫星编号	任务 优先 级	任务 时长/ 秒	本文算法		原算法		原算法+人工调 整	
				接收	天线	接收	天线	接收	天线
				时长/ 秒		时长/ 秒		时长/ 秒	
1	JL102C	0.1	550	550	SY12_5	550	SY12_3	550	SY12_3
2	CSES	0.5	526	526	SY12_3	526	SY12_3	526	SY12_3
3	KX-03	0.6	358	358	SY12_5	358	SY12_5	358	SY12_5
4	GF-3	0.5	507	507	SY12_4	507	SY12_4	507	SY12_4
5	KX-09	0.1	394	394	SY12_4	394	SY12_5	394	SY12_5
6	GF-3	0.5	297	297	SY12_4	297	SY12_4	297	SY12_4
7	HXMT	0.5	505	505	SY12_5	505	SY12_5	505	SY12_5

表 5.12 为三亚站所属的三个数据接收任务，且在时间上这三个数据接收任务有可能存在资源选择冲突。其中，本文算法和原算法给出的调度方案中，任务 2、任务 3 的接收天线不同。查看附表 3 可知，CBERS-04 在三亚站的最优选天线为 SY12_2，因此本文算法给任务 2 分配的接收天线比原算法的更优；LANDSAT-8 在三亚站共有四部可用天线，且在地面站现有天线使用优先级规则中这四部天线的优先级相同，在新的优先级规则中，SY12_3 天线为 LANDSAT-8 在三亚站的最优选天线，故本文算法使用 SY12_3 接收任务 3 的数据。

表 5.12 案例 15:2019 年 9 月 15 日三亚站部分接收任务调度结果

Table 5.12 Case15: Some tasks scheduling results in SYC on September 15, 2019

任务 序号	卫星编号	任务 优先 级	任务 时长 /秒	本文算法		原算法		原算法+人工调 整	
				接收	天线	接收	天线	接收	天线
				时长/		时长/		时长/	
				秒		秒		秒	
1	GF-6	P3	131	131	SY12_4	131	SY12_4	131	SY12_4
2	CBERS-04	P4	372	219	SY12_2	219	SY12_1	372	SY12_1
3	LANDSAT-8	P5	508	393	SY12_3	508	SY12_5	508	SY12_5

综合以上 6 个典型案例来看，LSTM 提取的天线使用优先级特征和地面站有天线使用优先级规则相结合使用更有助于决策，且本文算法在大部分情况下调度结果优于原算法。

5.5 本章小结

本章，首先，介绍了中国遥感卫星地面站的三亚站、密云站和喀什站三个接收站的天线资源情况；其次，从中国遥感卫星地面站实际调度运行环境选取了 15 组不同规模的测试案例，并使用本论文调度方法给出调度结果，证明了论文提出的地面站天线调度方法的正确性和有效性；然后，对比分析了 LSTM 提取的天线使用优先级特征和现有地面站天线使用优先级规则，综合两者，给出了一种新的天线使用优先级规则，并从调度精度和时间效率两个方面，对比分析了本论文算法和结合启发式规则的遗传算法，结果表明本论文的调度方法

提高了调度精度和时间效率，并且本论文方法运行时间更稳定；最后，给出了部分典型的调度案例，再次证明了本文算法的正确性和有效性。

第 6 章 总结与展望

6.1 研究成果总结

论文的主要研究成果包括以下几个方面:

(1) 调研了国内外地面站资源调度研究现状, 深入了解了中国遥感卫星地面站实际运行管理流程, 结合地面站的历史调度数据, 建立了长短期记忆神经网络和启发式搜索相结合的地面站天线调度模型。

(2) 使用长短期记忆神经网络, 从历史调度数据中提取了地面站天线使用优先级特征, 并和地面站现有天线使用优先级规则进行了对比分析。长短期记忆神经网络从历史调度数据中提取的天线使用优先级特征, 以概率分布的形式给出, 等级划分更加精细, 有效克服了地面站现有调度规则主观性、等级划分不明确等缺点。

(3) 综合长短期记忆神经网络提取的天线使用优先级特征的精细性和地面站现有优先级规则的时效性, 制定了新的优先规则。使用基于集束搜索思想的启发式搜索方法处理调度方案中的资源选择冲突问题, 得到实际可用的地面站天线调度方案。

(4) 使用长短期记忆神经网络和启发式搜索相结合的方法成功地解决了地面站天线调度问题, 实验证明相比于中国遥感卫星地面站目前使用的结合启发式规则的遗传算法, 该方法在任务调度精度、计算效率和稳定性方面均有一定的提升。在任务调度精度方面, 本文算法给出接收方案的接收成本为原算法的 91.25%; 在计算效率方面, 本论文算法避免了构造复杂的数学模型, 运算简单, 计算所需时间仅为遗传算法的 41.76%; 在算法稳定性方面, 本论文算法的求解结果和求解时间都比原算法稳定。

6.2 论文创新点

论文的创新点包括:

(1) 论文使用长短期记忆神经网络, 从历史调度数据中提取天线使用优先级特征, 该特征融合了实际调度环境和调度知识。把长短期记忆神经网络提取

的优先级特征和地面站现有优先级规则相结合,给出了一种新的天线使用优先级规则,该规则更加精确,有效克服了地面站现有优先级规则的主观性和区分度不明显的缺点。

(2) 论文提出了一种长短期记忆神经网络和启发式搜索相结合的地面站天线调度方法有效解决了地面站天线调度问题。即使用基于集束搜索的启发式搜索法,结合新的调度规则,解决了地面站天线资源选择冲突问题。该方法与结合启发式规则的遗传算法相比在调度精度、计算效率、稳定性方面均有提升。

6.3 存在的问题及工作展望

论文使用长短期记忆神经网络和启发式搜索相结合的方法,已能够成功解决地面站天线调度问题,提高资源使用效率和问题求解效率。但从长远来看,还需要对以下几个方面进行改进和完善:

(1) 改进深度学习模型,以改善从数据中提取的地面站天线使用特征的时效性和全面性。由于不同时期天线使用优先级规则略有变化,这导致论文中长短期记忆神经网络提取的天线使用优先级特征相对于地面站现有天线使用优先级规则具有一定的滞后性;由于数据量的限制,论文中的深度学习模型较为简单,提取的天线使用特征不全面,随着数据量的增多,可以使用较为复杂的深度学习模型,从而提高特征提取的时效性和全面性。

(2) 地面站资源全流程调度模型研究。本论文主要解决了地面站天线调度,在论文方法调度方法的基础上,可进一步实现对信道、记录器等资源的调度,从而实现地面站资源智能调度的完整闭环。

参考文献

- [1] 金光,武小悦,高卫斌.卫星地面站资源调度优化模型及启发式算法[J].系统工程与电子技术,2004(12):1839-1841+1875.
- [2] 金光,武小悦,高卫斌.基于冲突的卫星地面站系统资源调度与能力分析[J].小型微型计算机系统,2007(02):310-312.
- [3] 王远振,高卫斌,聂成.多星地面站系统资源配置优化研究综述[J].系统工程与电子技术,2004(04):437-439+333.
- [4] 刘民.基于数据的生产过程调度方法研究综述[J].自动化学报,2009,35(06):785-806.
- [5] 吴启迪,乔非,李莉,吴莹.基于数据的复杂制造过程调度[J].自动化学报,2009,35(06):807-813.
- [6] D. Gooley, Timothy. (1993). Automating the Satellite Range Scheduling Process. 233.
- [7] Gooley, T.D. & Borsi, J.J. & Moore, J.T.. (1996). Automating Air Force Satellite control Network (AFSCN) scheduling. Mathematical and Computer Modelling. 24. 91-101. 10.1016/0895-7177(96)00093-3.
- [8] M. Schalck, S. (1993). Automating Satellite Range Scheduling. 166.
- [9] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究[D].国防科学技术大学,2004.
- [10] 刘洋,陈英武,谭跃进.卫星地面站系统任务调度的动态规划方法[J].中国空间科学技术,2005(01):47-50.
- [11] Pemberton, Joseph & Galiber, Flavius. (2000). A constraint-based approach to satellite scheduling. 57.
- [12] mberton J C. Towards scheduling over-constrained remote sensing satellites[C]//Proceedings of the 2d International Workshop on Planning and Scheduling for Space. 2000.
- [13] 贺仁杰,谭跃进.调度问题中两类分离约束传播算法的比较及一种改进算法[J].运筹与管理,2004(02):25-29.
- [14] 贺仁杰,谭跃进.基于约束满足的卫星地面站资源优化分配问题研究[J].计算机工程与应用,2004(18):229-232.

- [15] Zhang J, Chen C, Chen Y G, et al. A Large-scale Multiobjective Satellite Data Transmission Scheduling Technology Based on SVM+ NSGA-II[J]. COPLAS 2018, 2018: 53.
- [16] 王红飞,李绪志,陈立军.基于 Multi-agent 的卫星计划调度系统智能机制[J].计算机工程,2006(22):194-196+242.
- [17] 王远振,赵坚,聂成.多卫星—地面站系统的 Petri 网模型研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2003(02):7-11.
- [18] 王远振,赵坚,聂成.多星地面站设备优化调度方法研究[J].计算机仿真,2003(07):17-19+54.
- [19] 王远振,高卫斌,聂成.多星地面站系统资源配置优化研究综述[J].系统工程与电子技术,2004(04):437-439+453.
- [20] 王远振,赵坚,聂成.任务优先级调度策略性能分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2003(03):31-35.
- [21] 王远振,赵坚,聂成,高卫斌.卫星地面站设备配置效能评价指标体系研究[J].军事运筹与系统工程,2003(01):59-64.
- [22] 张帆,王钧,李军,景宁.基于时间序无圈有向图的多准则优化成像调度[J].国防科技大学学报,2005(06):61-66.
- [23] 陈慧中,王钧,李军,郭玉华.卫星成像规划调度系统中的可视化决策支持研究与实现[J].计算机工程与科学,2007(07):58-61.
- [24] Burrowbridge S E. Optimal allocation of satellite network resources[D]. Virginia Tech, 1999.
- [25] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to algorithms[M]. MIT press, 2009.
- [26] Barbulescu L, Watson J P, Whitley L D, et al. Scheduling space-ground communications for the air force satellite control network[J]. Journal of Scheduling, 2004, 7(1): 7-34.
- [27] Dautère-Pères S. Minimizing late jobs in the general one machine scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 81(1): 134-142.
- [28] 金光,武小悦,高卫斌.卫星地面站资源配置仿真研究[J].系统仿真学报,2004(11):2401-2403+2408.

- [29] 王军民,谭跃进.多星联合动态调度问题的启发式算法研究[J].计算机工程与应用,2007(21):21-25.
- [30] Lemaître M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. How to manage the new generation of agile earth observation satellites[C]//Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Citeseer, 2000: 1-10.
- [31] Lemaître M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. Aerospace Science and Technology, 2002, 6(5): 367-381.
- [32] Bianchessi N, Cordeau J F, Desrosiers J, et al. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of earth observation satellites[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(2): 750-762.
- [33] Vasquez M, Hao J K. A “logic-constrained” knapsack formulation and a tabu algorithm for the daily photograph scheduling of an earth observation satellite[J]. Computational optimization and applications, 2001, 20(2): 137-157.
- [34] Parish D A. A genetic algorithm approach to automating satellite range scheduling[R]. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING, 1994.
- [35] Wolfe W J, Sorensen S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain[J]. Management Science, 2000, 46(1): 148-166.
- [36] Abbott R J, Campbell M L, Krenz W C. A sustainable genetic algorithm for satellite resource allocation[J]. Telematics and Informatics, 1995, 12(3-4): 141-159.
- [37] 阎志伟, 牛轶峰, 李汉铃. 基于并行禁忌遗传算法 (PTGA) 的预警卫星传感器调度研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 598-603.
- [38] 张帆, 邹经湘, 曹喜滨, 等. 小卫星星务规划的 Hopfield 神经网络算法[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5): 579-581.
- [39] Koonce D A, Tsai S C. Using data mining to find patterns in genetic algorithm solutions to a job shop schedule[J]. Computers & Industrial Engineering, 2000, 38(3): 361-374.
- [40] Youssef H, Brigitte M, Noureddine Z. A genetic algorithm and data mining to resolve a job shop schedule[C]//ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 01TH8597). IEEE, 2001, 2: 727-728.
- [41] Harrath Y, Chebel-Morello B, Zerhouni N. A genetic algorithm and data mining based

- meta-heuristic for job shop scheduling problem[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2002, 7: 6 pp. vol. 7.
- [42] Feng S, Li L, Cen L, et al. Using MLP networks to design a production scheduling system[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(6): 821-832.
- [43] Weckman G R, Ganduri C V, Koonce D A. A neural network job-shop scheduler[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, 19(2): 191-201.
- [44] Kumar S, Rao C S P. Application of ant colony, genetic algorithm and data mining-based techniques for scheduling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 901-908.
- [45] Shahzad A, Mebarki N. Data mining based job dispatching using hybrid simulation-optimization approach for shop scheduling problem[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(6): 1173-1181.
- [46] Vinyals O, Fortunato M, Jaitly N. Pointer networks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. 2015: 2692-2700.
- [47] Bello I, Pham H, Le Q V, et al. Neural combinatorial optimization with reinforcement learning[J]. arXiv preprint arXiv:1611.09940, 2016.
- [48] Sutskever I, Vinyals O, Le Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]//Advances in neural information processing systems. 2014: 3104-3112.
- [49] 董明宇,刘民,吴澄.带并行机调度问题中基于 ANFIS 的自适应算法[J].控制工程,2005(03):203-206.
- [50] Li L, Zijin S, Jiacheng N, et al. Data-based scheduling framework and adaptive dispatching rule of complex manufacturing systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1891-1905.
- [51] 王成龙,李诚,冯毅萍,荣冈.作业车间调度规则的挖掘方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(03):421-429+438.
- [52] 王振江. 作业车间调度属性选择及调度规则挖掘方法研究[D].北京化工大学,2016.
- [53] 丁建立,王曼.基于关联规则挖掘的航班协同保障数据知识发现研究[J].计算机应用与软件,2016,33(11):21-23+61.
- [54] 王家海,陈煜.数据驱动的 Job Shop 生产调度知识挖掘及优化[J].计算机工程与应

用,2018,54(01):264-270.

- [55] Lin K, Zhao R, Xu Z, et al. Efficient large-scale fleet management via multi-agent deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. ACM, 2018: 1774-1783.
- [56] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. Neural computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [57] Sak H, Senior A, Beaufays F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling[C]//Fifteenth annual conference of the international speech communication association. 2014.
- [58] Donahue J, Anne Hendricks L, Guadarrama S, et al. Long-term recurrent convolutional networks for visual recognition and description[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015: 2625-2634.
- [59] Sutskever I, Vinyals O, Le Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]//Advances in neural information processing systems. 2014: 3104-3112.
- [60] Srivastava N, Hinton G, Krizhevsky A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting[J]. The journal of machine learning research, 2014, 15(1): 1929-1958.

附 录

附表 1、2、3，三张表分别密云站、喀什站、三亚站三个站点的天线使用优先级规则。其中，“P1”代表“LSTM 提取的天线使用优先级特征”，“P2”代表“地面站现有天线使用优先级规则”，“P3”代表“P1”和“P2”综合后生成的新的天线使用优先级规则。P1 中天线使用优先级特征以概率分布的形式给出，概率值越大则天线使用优先级越高，概率值越小天线使用优先级越低，概率值为 0 则说明该天线不可用于接收该卫星数据。P2 中天线使用优先级以等级的形式给出，“1”代表等级最高，“2”次之，依次类推，“-1”代表天线不可用于接收该卫星数据。P3 中天线使用优先级规则以等级的形式给出，数值小于等于 0 代表该天线不可用于接收该卫星数据；数值大于 0 时，数值越小代表在接收该卫星数据时，该天线使用优先级别越高。

附表 1 密云站天线使用优先级规则对比

Attached Table 1 The comparison of antennas use priority rules between A and B of Miyun station

序号	卫星编号	类别	天线编号							
			MY06	MY10	MY11	MY12	MY12	MY12	MY12	MY12
			_1	_1	_1	_1	_2	_3	_4	_5
1	CBERS-04	P1	0.14	0.00	0.00	0.71	0.05	0.03	0.01	0.05
		P2	-1	-1	2	1	2	2	2	2
		P3	-0.86	-1.00	1.99	0.29	1.89	1.95	1.98	1.91
2	CSES	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.02	0.01	0.01
		P2	-1	-1	2	-1	1	2	2	2
		P3	-1.00	-1.00	2.00	-1.00	0.04	1.97	1.99	1.97
3	GF-1	P1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.68	0.10	0.14
		P2	3	-1	-1	3	2	1	3	3
		P3	2.98	-1.00	-1.00	2.99	1.85	0.32	2.71	2.59
4	GF-1B	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.84	0.07	0.05
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	2	2
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.94	0.16	1.85	1.90
5	GF-1C	P1	0.08	0.00	0.00	0.00	0.07	0.58	0.13	0.14
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	2	2
		P3	-0.92	-1.00	-1.00	-1.00	1.87	0.42	1.75	1.72
6	GF-1D	P1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.65	0.12	0.17
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	2	2
		P3	-0.99	-1.00	-1.00	-1.00	1.88	0.35	1.77	1.67

7	GF-2	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.92	0.02	0.02
		P2	3	-1	-1	3	2	1	3	3
		P3	3.00	-1.00	-1.00	3.00	1.94	0.08	2.93	2.93
8	GF-3	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	2	2
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.98	0.01	1.99	1.99
9	GF-5	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.89	0.03	0.04
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	3	3
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.93	0.11	2.90	2.88
10	GF-6	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.90	0.01	0.03
		P2	-1	-1	-1	-1	2	1	3	3
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.90	0.10	2.96	2.91
11	HJ-1A	P1	0.16	0.01	0.00	0.50	0.11	0.14	0.01	0.07
		P2	2	2	2	1	2	2	2	2
		P3	1.68	1.99	2.00	0.50	1.77	1.72	1.98	1.87
12	HXMT	P1	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.83	0.02
		P2	-1	-1	3	-1	3	2	1	3
		P3	-0.97	-1.00	3.00	-1.00	2.99	1.79	0.17	2.93
13	KX-02	P1	0.10	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.66	0.19
		P2	-1	-1	-1	-1	3	2	1	-1
		P3	-0.90	-1.00	-1.00	-1.00	2.95	1.95	0.34	-0.81
14	KX-03	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.87	0.01
		P2	-1	-1	-1	-1	3	2	1	4
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	3.00	1.77	0.13	3.97
15	KX-09	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.92	0.02	0.03
		P2	-1	-1	-1	-1	2	2	1	2
		P3	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.94	0.15	0.98	1.95
16	LANDSA T-8	P1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.83	0.02	0.06	0.07
		P2	-1	-1	-1	-1	1	3	2	4
		P3	-0.99	-1.00	-1.00	-1.00	0.17	2.95	1.87	3.71
17	NPP	P1	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		P2	1	-1	2	-1	-1	-1	-1	-1
		P3	0.01	-1.00	1.99	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
18	RADARS AT-2	P1	0.97	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		P2	1	2	2	-1	-1	-1	-1	-1
		P3	0.03	1.99	1.98	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
19	SJ-9A	P1	0.06	0.00	0.00	0.26	0.26	0.23	0.05	0.14
		P2	1	-1	1	1	1	1	1	1
		P3	0.94	-1.00	1.00	0.74	0.74	0.77	0.95	0.86
20	ZY-02C	P1	0.02	0.00	0.00	0.01	0.34	0.31	0.13	0.20
		P2	-1	1	1	1	1	1	1	1
		P3	-0.98	1.00	1.00	0.99	0.66	0.69	0.87	0.80
21	ZY-03	P1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.73	0.10	0.08	0.09

		P2	4	-1	-1	4	1	2	3	4
		P3	3.98	-1.00	-1.00	3.99	0.27	1.80	2.76	3.64
22	ZY1E	P1	0.34	0.01	0.00	0.15	0.07	0.03	0.17	0.23
		P2	-1	-1	-1	-1	1	2	3	4
		P3	-0.66	-0.99	-1.00	-0.85	0.93	1.93	2.50	3.09
23	ZY302	P1	0.02	0.00	0.00	0.01	0.65	0.12	0.07	0.12
		P2	4	-1	-1	4	1	2	3	4
		P3	3.92	-1.00	-1.00	3.94	0.35	1.75	2.79	3.52

附表2 喀什站天线使用优先级规则对比

Attached Table 2 The comparison of antennas use priority rules between A and B of Kashi station

序号	satellite	类别	天线编号					
			KS12_1	KS12_2	KS12_3	KS12_4	KS12_5	KS73_1
1	CBERS-04	P1	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
		P2	-1	1	-1	-1	-1	-1
		P3	-0.05	0.95	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
2	CSES	P1	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00
		P2	2	-1	1	2	2	2
		P3	2.00	-1.00	0.01	1.99	2.00	2.00
3	GF-1	P1	0.00	0.22	0.45	0.31	0.03	0.00
		P2	4	3	2	1	4	4
		P3	4.00	2.35	1.10	0.69	3.89	4.00
4	GF-1B	P1	0.00	0.00	0.04	0.86	0.11	0.00
		P2	2	-1	2	1	2	2
		P3	2.00	-1.00	1.93	0.14	1.78	2.00
5	GF-1C	P1	0.00	0.02	0.25	0.54	0.19	0.00
		P2	2	-1	2	1	2	2
		P3	2.00	-0.98	1.50	0.46	1.61	2.00
6	GF-1D	P1	0.00	0.03	0.17	0.57	0.23	0.00
		P2	2	-1	2	1	2	2
		P3	2.00	-0.97	1.65	0.43	1.54	2.00
7	GF-2	P1	0.00	0.13	0.25	0.62	0.01	0.00
		P2	4	3	2	1	4	4
		P3	4.00	2.62	1.51	0.38	3.97	4.00
8	GF-3	P1	0.00	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00
		P2	2	-1	2	1	2	2
		P3	2.00	-1.00	1.98	0.01	2.00	2.00
9	GF-5	P1	0.00	0.01	0.04	0.86	0.10	0.00
		P2	3	3	2	1	3	3
		P3	3.00	2.98	1.92	0.14	2.71	3.00
10	GF-6	P1	0.01	0.18	0.26	0.46	0.09	0.00
		P2	3	3	2	1	3	3

		P3	2.98	2.46	1.47	0.54	2.72	3.00
11	HJ-1A	P1	0.78	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00
		P2	1	2	3	4	4	-1
		P3	0.22	1.62	2.94	3.99	3.99	-1.00
12	HJ-1B	P1	0.13	0.74	0.05	0.06	0.02	0.00
		P2	2	1	3	4	4	-1
		P3	1.73	0.26	2.85	3.76	3.94	-1.00
13	HXMT	P1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.98	0.00
		P2	2	-1	2	2	1	-1
		P3	2.00	-1.00	1.99	1.97	0.02	-1.00
14	JL101C	P1	0.00	0.01	0.05	0.66	0.29	0.00
		P2	1	-1	1	1	1	-1
		P3	1.00	-0.99	0.95	0.34	0.71	-1.00
15	JL102C	P1	0.00	0.01	0.07	0.11	0.81	0.00
		P2	1	-1	1	1	1	-1
		P3	1.00	-0.99	0.93	0.89	0.19	-1.00
16	JL103B	P1	0.00	0.00	0.01	0.05	0.94	0.00
		P2	3	-1	3	2	1	-1
		P3	3.00	-1.00	2.97	1.91	0.06	-1.00
17	JL105B	P1	0.00	0.00	0.03	0.09	0.87	0.00
		P2	2	-1	2	2	1	-1
		P3	2.00	-1.00	1.93	1.81	0.13	-1.00
18	JL106B	P1	0.00	0.00	0.05	0.06	0.89	0.00
		P2	2	-1	2	2	1	2
		P3	2.00	-1.00	1.89	1.88	0.11	2.00
19	JL107B	P1	0.00	0.00	0.01	0.04	0.95	0.00
		P2	2	-1	2	2	1	2
		P3	2.00	-1.00	1.99	1.92	0.05	2.00
20	KX-02	P1	0.00	0.00	0.01	0.06	0.92	0.00
		P2	-1	-1	3	2	1	-1
		P3	-1.00	-1.00	2.96	1.88	0.08	-1.00
21	KX-03	P1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	0.00
		P2	-1	-1	3	2	1	-1
		P3	-1.00	-1.00	3.00	1.98	0.01	-1.00
22	KX-09	P1	0.41	0.06	0.05	0.02	0.44	0.00
		P2	-1	-1	2	2	1	-1
		P3	-0.59	-0.94	1.90	1.95	0.56	-1.00
23	LANDSAT-8	P1	0.00	0.00	0.02	0.95	0.02	0.00
		P2	3	-1	-1	1	2	3
		P3	3.00	-1.00	-0.98	0.05	1.95	3.00
24	PLEIADES-1A	P1	0.00	0.03	0.86	0.07	0.03	0.00
		P2	-1	-1	-1	2	-1	-1
		P3	-1.00	-0.97	-0.14	1.86	-0.97	-1.00

25	PLEIADES-1B	P1	0.00	0.03	0.90	0.05	0.01	0.00
		P2	-1	-1	-1	2	-1	-1
		P3	-1.00	-0.97	-0.10	1.90	-0.99	-1.00
26	SJ-9A	P1	0.02	0.13	0.57	0.18	0.11	0.00
		P2	3	-1	1	2	3	-1
		P3	2.95	-0.87	0.43	1.63	2.68	-1.00
27	SPOT-6	P1	0.00	0.05	0.83	0.09	0.03	0.00
		P2	-1	-1	1	2	-1	-1
		P3	-1.00	-0.95	0.17	1.82	-0.97	-1.00
28	SPOT-7	P1	0.00	0.03	0.93	0.02	0.01	0.00
		P2	-1	-1	1	2	-1	-1
		P3	-1.00	-0.97	0.07	1.95	-0.99	-1.00
29	TY-12	P1	0.02	0.16	0.48	0.24	0.09	0.00
		P2	1	1	1	1	1	-1
		P3	0.98	0.84	0.52	0.76	0.91	-1.00
30	TY-9	P1	0.58	0.07	0.01	0.01	0.34	0.00
		P2	1	1	1	1	1	-1
		P3	0.42	0.93	0.99	0.99	0.66	-1.00
31	ZY-02C	P1	0.01	0.06	0.36	0.23	0.34	0.00
		P2	1	1	1	1	1	1
		P3	0.99	0.94	0.64	0.77	0.66	1.00
32	ZY-03	P1	0.01	0.13	0.63	0.15	0.08	0.00
		P2	4	4	1	2	3	4
		P3	3.96	3.50	0.37	1.69	2.77	4.00
33	ZY1E	P1	0.77	0.10	0.00	0.00	0.13	0.00
		P2	4	-1	2	1	3	-1
		P3	0.92	-0.90	1.99	1.00	2.62	-1.00
34	ZY302	P1	0.01	0.16	0.59	0.14	0.10	0.00
		P2	4	4	1	2	3	4
		P3	3.97	3.34	0.41	1.72	2.71	4.00

附表3 三亚站天线使用优先级规则对比

Attached Table 3 The comparison of antennas use priority rules between A and B of Sanya station

序号	卫星编号	类别	天线编号				
			SY12_1	SY12_2	SY12_3	SY12_4	SY12_5
1	CBERS-04	P1	0.25	0.73	0.01	0.01	0.00
		P2	3	1	3	2	3
		P3	2.24	0.27	2.97	1.99	3.00
2	CSES	P1	0.00	0.01	0.98	0.00	0.01
		P2	-1	-1	1	2	2
		P3	-1.00	-0.99	0.02	1.99	1.98
3	GF-1	P1	0.00	0.08	0.46	0.43	0.03

		P2	-1	3	2	1	3
		P3	-1.00	2.75	1.08	0.57	2.92
4	GF-1B	P1	0.00	0.00	0.09	0.50	0.41
		P2	-1	-1	2	1	2
		P3	-1.00	-1.00	1.81	0.50	1.18
5	GF-1C	P1	0.00	0.01	0.09	0.67	0.24
		P2	-1	-1	2	1	2
		P3	-1.00	-0.99	1.83	0.33	1.52
6	GF-1D	P1	0.00	0.01	0.15	0.73	0.11
		P2	-1	-1	2	1	2
		P3	-1.00	-0.99	1.70	0.27	1.79
7	GF-2	P1	0.00	0.02	0.09	0.86	0.03
		P2	-1	2	2	1	2
		P3	-1.00	1.96	1.83	0.14	1.94
8	GF-3	P1	0.00	0.00	0.05	0.93	0.01
		P2	-1	2	2	1	2
		P3	-1.00	2.00	1.89	0.07	1.98
9	GF-5	P1	0.00	0.00	0.01	0.96	0.03
		P2	-1	3	2	1	3
		P3	-1.00	3.00	1.98	0.04	2.92
10	GF-6	P1	0.00	0.03	0.43	0.46	0.08
		P2	-1	3	2	1	3
		P3	-1.00	2.91	1.14	0.54	2.77
11	HXMT	P1	0.00	0.00	0.00	0.06	0.93
		P2	-1	-1	3	2	1
		P3	-1.00	-1.00	2.99	1.87	0.07
12	JL101C	P1	0.00	0.00	0.01	0.35	0.64
		P2	-1	-1	1	1	1
		P3	-1.00	-1.00	0.99	0.65	0.36
13	JL102C	P1	0.00	0.00	0.02	0.18	0.80
		P2	-1	-1	1	1	1
		P3	-1.00	-1.00	0.98	0.82	0.20
14	JL103B	P1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.98
		P2	-1	3	3	2	1
		P3	-1.00	3.00	3.00	1.97	0.02
15	JL104B	P1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99
		P2	-1	-1	2	2	1
		P3	-1.00	-1.00	2.00	1.98	0.01
16	JL105B	P1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.97
		P2	-1	-1	2	2	1
		P3	-1.00	-1.00	1.99	1.95	0.03
17	JL106B	P1	0.00	0.00	0.01	0.02	0.97
		P2	-1	-1	2	2	1

		P3	-1.00	-1.00	1.99	1.95	0.03
18	JL107B	P1	0.00	0.00	0.00	0.04	0.96
		P2	-1	-1	2	2	1
		P3	-1.00	-1.00	1.99	1.92	0.04
19	JL108B	P1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98
		P2	-1	-1	2	2	1
		P3	-1.00	-1.00	2.00	1.95	0.02
20	KX-02	P1	0.00	0.00	0.01	0.08	0.91
		P2	-1	-1	3	2	1
		P3	-1.00	-1.00	2.98	1.84	0.09
21	KX-03	P1	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97
		P2	-1	-1	3	2	1
		P3	-1.00	-1.00	3.00	1.95	0.03
22	KX-09	P1	0.00	0.04	0.33	0.44	0.19
		P2	-1	-1	1	1	1
		P3	-1.00	-0.96	0.67	0.56	0.81
23	LANDSAT-8	P1	0.00	0.00	0.87	0.03	0.10
		P2	-1	1	1	1	1
		P3	-1.00	1.00	0.13	0.97	0.90
24	SJ-9A	P1	0.44	0.46	0.09	0.02	0.00
		P2	1	2	3	3	3
		P3	0.56	1.09	2.73	2.95	3.00
25	ZY-02C	P1	0.00	0.66	0.20	0.11	0.02
		P2	2	1	3	3	3
		P3	2.00	0.34	2.39	2.66	2.93
26	ZY302	P1	0.00	0.04	0.80	0.10	0.06
		P2	-1	4	1	2	3
		P3	-1.00	3.82	0.20	1.80	2.83

致 谢

很荣幸进入中国科学院空天信息研究院攻读硕士学位，在这三年的科研生活中，我感受到了自己思维方式、为人处世上的成长和成熟，这些都得益于老师们循循善诱的教导和同学朋友的包容与帮助。

本科毕业，我选择了工作，两年后参加了研究生考试，收到中国科学院大学录取通知书的那一刻，我对校园生活充满着回忆和期盼。在这里我要特别感谢我的导师林友明老师、黄鹏老师以及马广彬老师给予我这次难得的读研机会。从踏进怀柔校区的大门，到坐着大巴车离开那片土地，整整一年的时间我都异常兴奋，能够再次坐在教室里和同学们一起听老师讲课，我觉得是一件很幸福的事。在怀柔国科大的校园里，从白发苍苍的教授到脸庞稚嫩的学生，从食堂的阿姨到校园的清洁工，从西区的图书馆到东区的礼堂、体育馆，从塞纳左岸的杨柳到雨后石阶上的蜗牛……处处洋溢着青春的气息，我觉得那是一个滋生理想、智慧、科研精神以及家国情怀的地方。在这里，我要感谢国科大的每一位老师、同学以及工作人员，谢谢你们传授我知识，给我一段美好的回忆。

一年的集中教学之后，回到了中国遥感卫星地面站，开始了我真正的科研生活。从研究方向的选题、中期考核到毕业论文撰写，每一个环节，林老师、黄老师、马老师、田妙苗老师一直给予我悉心的指导和鞭策。林老师为了督促我的科研进展，制定了每月一次的小组例会。例会上，首先由我汇报最近一个月的科研状况，然后由课题组的各位老师总结目前取得的成果和存在的问题，最后共同制定下个月的工作方向。这种方式让导师能够及时掌握我的研究进度，也让自己少走弯路。黄老师是地面站运行管理部最忙碌的那个身影，在百忙之中仍然关心我的科研，每次例会上总能一针见血的指出问题所在，他严谨的逻辑思维，让我深深受益。马老师是我在科研上交流最多人，科研中的遇到的大大小小的难题，论文的大修小修都是在马老师的悉心指导下克服和完成的。田老师总是给予我灵感的那个人，有些问题我总是想不明白，有些想法我总是表达不清楚，但是每次那些混乱不清的思维，经她一撷，顿时就清晰明朗了。谢谢这四位老师，在我的科研和生活中给予的指导和关心，从而促进我的研究顺

利完成。

同时，也感谢实验室的朱政霖师兄、刘静怡师姐、明卫鹏师兄、张曼利同学和曹州同学，谢谢他们给予我学术、工作和生活上的建议和帮助。感谢地面站运行管理部的各位职工，感谢孙老师和李老师对我的生活上的照顾，感谢樊兵老师，感谢冯柯师姐、厉为师姐、王峥师姐、王伟星师兄和许殊师兄带着我熟悉地面站调度业务流程和日常工作。感谢常驻地面站的工作人员孔筱雪、刘彬儿、李莎和高宇，感谢他们帮助我了解地面站资源调度的很多细节和注意事项，这些对我的科研也至关重要。

此外，还要感谢我的同学张军军，在很多问题上的共同见解，让我们每次交谈起来总是“酒逢知己千杯少”，很开心和你一起过的每一个生日，让我在没有什么娱乐活动的新技术园区里也过的充满阳光，谢谢你的鼓励，让我变得更加自信和健谈。感谢孙玉燕同学，对我生活上的照料和帮助，从你身上我看到了一种对生活的热情和仪式感，学习到了如何关心他人，认识到亲情的可贵、平凡的难得。感谢王芬、沙苗苗、陈毛毛三位同学，在生活中给予我的帮助。

感谢我的父母和亲人，在我对未来的不确定性充满恐惧的时候，给予我最大的鼓励和支持，你们永远是我坚强的理由，祝你们身体健康。

最后，还要感谢我自己，感谢自己的努力和坚持，勤奋和踏实。在以后的工作、生活中，我想对自己说事事遵从内心，认真负责、全力以赴。

2020 年 3 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

孙文军, 女, 1991 年 01 月出生于河南省信阳市, 主要研究方向为遥感卫星地面站资源调度。

2011 年 09 月-2015 年 07 月, 在上海师范大学地理系获得学士学位。

2015 年 12 月-2016 年 09 月, 就职于上海飞未信息技术有限公司, 担任 WebGIS 开发工程师。

2017 年 09 月-2020 年 07 月, 在中国科学院空天信息创新研究院攻读硕士学位。

正式接受的学术论文:

《基于 LSTM 和启发式方法的遥感卫星地面站天线智能调度》, 2020 国科大学报。

参加的学术交流:

2019 年中国仿真大会, 2019 年 10 月 11 日-13 日, 四川成都。

参加的研究项目:

参加课题组遥感卫星信息采集三维仿真系统的设计与开发。主要负责软件界面设计、功能设计、功能实现、部署工作。