

## 天基信息网络资源调度与协同管理

王睿<sup>1</sup>, 韩笑冬<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 周晞<sup>1</sup>, 龙军<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 随着天基信息网络范围和空间的不断拓展, 网络感知能力的不断增强, 对传输的实时性、可靠性和安全性提出更高的要求。天基信息网络的设计需求涉及随时随遇接入、异构网络体系、不同类型资源协同管理等情况; 天基信息网络业务具有高动态、多类型、大数据的特点。主要针对如何实现资源的高效管理, 对天基资源网络的管理对象进行细粒度、多维度分析, 进一步提出动态天基资源虚拟化、调度方法与协同管理的设计。

**关键词:** 天地一体化信息网络; 对象分析; 资源调度; 协同管理

**中图分类号:** TN91

**文献标识码:** A

## Resources scheduling and cooperative management of space-based information networks

WANG Rui<sup>1</sup>, HAN Xiao-dong<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, ZHOU Xi<sup>1</sup>, LONG Jun<sup>2</sup>

(1. Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Along with the expansion of the range and space of space-based information networks, and the enhancement of network cognitive ability, real-time, reliability and safety were needed to satisfy higher requirements. The demands of space-based information network designing referred to different platforms and users, random access in anytime, heterogeneous network architecture, cooperative management of different type of resource, and so on. Space-based network operation had the characteristic of high-dynamic, multi-type and big data. The realization of efficient resource management was discussed, and the analysis of multiple dimensions to objects in space-based information networks was realized, the design of dynamic space-based resource virtualization was further mentioned, scheduling and cooperative management was mentioned.

**Key words:** space-ground integrated information networks, object analysis, resource scheduling, cooperative management

### 1 引言

天地一体化网络的建立, 将网络从地面系统扩展到空间系统, 将原有二维网络拓展为三维网络, 构建了天基网络, 星间、星地及终端间链路数目大幅增长。在未来的空间信息系统中, 航天器数量众多, 种类复杂, 除了构成空间骨干网络体系的大规模的混合星座组网天基网络外, 大量的应用类航天器都作为空间信息系统的基本单元。对这些基本单

元的管理远远超出了设备监控的范畴。随着未来天基信息系统的发展和规模的扩大, 对天基网络的管理也越来越复杂, 需要针对多种航天任务需求进行针对性的网络资源调度和网络业务管理。从航天任务的指挥控制以及应用角度来看, 更关注的是天基网络为用户提供的业务的服务质量, 而不是局限于通信设备的工作参数, 空间信息系统需要的是系统级的面向航天任务的综合网络管理<sup>[1-3]</sup>。

基于以上的特点分析, 本文主要着眼于以下三

收稿日期: 2017-07-20

通信作者: 韩笑冬, 13426461933@163.com

基金项目: 装备预研基金资助项目 (No.30501050403); 国家自然科学基金资助项目 (No.61471360)

**Foundation Items:** The Foundation of Preview of Equipment (No.30501050403), The National Natural Science Foundation of China (No. 61471360)

个方面：对天基信息资源网络的管理对象进行分析，根据其特点进行分类；根据天基资源网络环境中不同粒度层的资源共享策略，基于不同关注点设计虚拟资源生成算法；提出面向任务的天基网络资源动态管理的体系结构，设计基于任务约束和时间约束的资源调度方法。

## 2 天基资源网络管理对象分析

天基信息网络的典型工作模式，要求能够实现信息获取类卫星的自主接入，满足任务保障服务；能够完成任务需求对多用户航天器的信息进行天基搜索，并完成对目标航天器的信息回传和分发，提供多类型、多源头的信息支援服务；能够完成多任务协同和信息推送，为特定区域的各类型单元，按照需求提供导航、通信等多任务协同保障服务。可见，动态、分层和分域的设计对天基信息网络工作模式的需求具有明确的指向性。基于以上的需求，天基资源网络管理首先基于网络的架构特点，对网络的管理对象及其特点进行分析；然后，根据管理对象需要建立网络管理框架，并在其中分别对应了网络管理的动态性、智能性和可扩展性的设计。

从网络架构上看，天基资源网络的设计需求涉及多平台、不同用户、随时随遇接入、异构网络体系、多任务协同服务、不同类型资源协同管理等情况；从网络需求上看，天基资源网络业务具有高动态、多类型、大数据的特点。针对网络管理框架的设计，首先，需要对天基资源网络的管理对象进行细粒度、多维度的分析。

天基信息资源网络的管理对象即表示为网络中的资源，也即存在多维度、多标准的资源表示方式，目标即为优化网络的局部或整体性能。从管理

的角度，天基信息资源网络的所有有用信息都可以视为网络中的资源，对其进行统一/局部或单一的规划，可以提升网络的局部或整体性能，这些资源又可以统一分为实体性和功能性 2 类，即按照其是否有可定义的实体进行分类。

1) 实体性资源主要包括重量、能量（功率）、时间、温度、时延、链路负荷（吞吐量）、存储空间、计算能力（设备能力）、移动速度、拓扑结构、网络密度等。

2) 功能性资源主要作为对资源性能的描述，主要包括连通性、拥塞度、稳定性、可靠度、敏感度、安全性、可兼容性、优先级(处理/传输)、复杂度(计算/网络)、可扩展性(处理能力/网络规模)等。

可见，为实现对天基信息资源网络的高效数据管理，提高其 QoS 性能，对其管理资源进行多维和综合的规划管理有其必要性，也同时保证了性能的整体提升，而非单一提升某一性能参数而对其他性能产生不利的影响。

从使用的角度，可以将以上总结的资源进行功能归类如表 1 所示。

由此可知，由于天基网络需要具备独立工作的能力，星载分管中心和天基网络需要承担极大比例的资源管理功能，亦即网络资源管理的实现主体为天基网络。因此，根据资源管理的对象特点，针对天基资源网络管控的功能实现，天基资源网络应具有以下的特点：任务驱动、服务于信息流程、简单高效、功能完备、支持扩展、安全的管理机制、自主管理能力、融合能力、兼容能力。

## 3 动态天基资源虚拟化

天基信息资源所指代的内容不仅包括信息获

表 1 资源管理对象分类

管理对象	对象内容（实体性）	对象内容（功能性）	对应实体	对象特点
计算资源	计算能力	稳定性、可靠度、分布性、复杂度、可扩展性、自主性、可融合性、优先级	星载管理中心	高运算处理速度，多线程、分布式处理能力，高容错、重配置能力
通信资源	链路负荷、频段、时隙、时延	稳定性、可靠度、连通性、拥塞度、安全性、优先级	天基网络	高信道带宽，可靠数据传输
存储资源	存储空间	稳定性、可靠度、安全性、可扩展性	星载管理中心、地面管控中心	大容量存储
测控资源	频段、时隙、精度	可靠度、覆盖率、同步率	星载管理中心、地面管控中心	高覆盖率、高数据率、多目标、精确外测定轨
导航资源	精度、位置、移动速度、时间	敏感度、同步率	星载管理中心、导航卫星	持续高精度的定位、测距和授时能力
规划资源	链路负荷、存储空间、计算能力、拓扑结构、网络密度	拥塞度、分布性、稳定性、安全性、可融合性、可兼容性、覆盖率、在网率、复杂度、可扩展性	星载管理中心	工作状态获取和网络性能优化，高效的管理框架、分析逻辑和优化算法

取、计算、存储和传输过程中所必备的设备（信息获取设备、控制设备、计算设备、存储设备、传输设备）和能力，还涵盖了以上过程中所需要的不可见的功能性（安全性、可靠性、稳定性等）实现。网络中存在需求多样的约束以及各信息资源主体所设计的资源模型的相互独立性，导致了资源在建模、描述和应用等方面的异构性；个体间缺乏统一、完整的资源定义与表达，进而导致网络中不同个体进行资源信息交换时产生信息缺失，进行资源信息共享时产生资源语义冲突，进行信息处理时产生处理方法不兼容<sup>[4-6]</sup>。将分布式、异构、多样的天基网络资源进行协同管理，是在天基信息资源网络中实现信息资源主体间的资源高效共享与有序协同的前提条件。

资源虚拟化是解决这一问题的有效途径，其本质是采用某种机制将底层的实体性资源和功能性资源转换为抽象的逻辑功能单元，以实现个体间资源有效的共享、分配和互操作。同时，资源虚拟化

技术在消除了资源实体和资源内涵间隔离的同时，也为资源调度和协同管理提供了有效的实现方式。天基网络资源管理是基于任务的资源调度，这是由其天基数据中心管理和通信需求的特征决定的，其要求就在于独立自主性和实时高效性，要求实现对任务目标的快速定位、实时响应和独立运行。因此，基于单一资源模型的资源管理和任务调度是不可取的，在协同性、兼容性和信息的处理和反馈速度上都不能达到现有目标的要求。

天基资源虚拟化体系结构可以分为 4 层：资源层、监控层、虚拟层、应用层，其包含内容和处理过程，如图 1 所示。

为展示多粒度、多视角的资源的功能特性并将这些特性有机地关联起来，多粒度虚拟资源空间需要从 3 个层次（过程、活动、属性）考虑各层次中的关注点，设计合适的资源聚合函数。分别对应影响复杂任务分解过程中的 3 个关键因素，也就是资源协同与组合、资源功能特性与活动需求功能特性

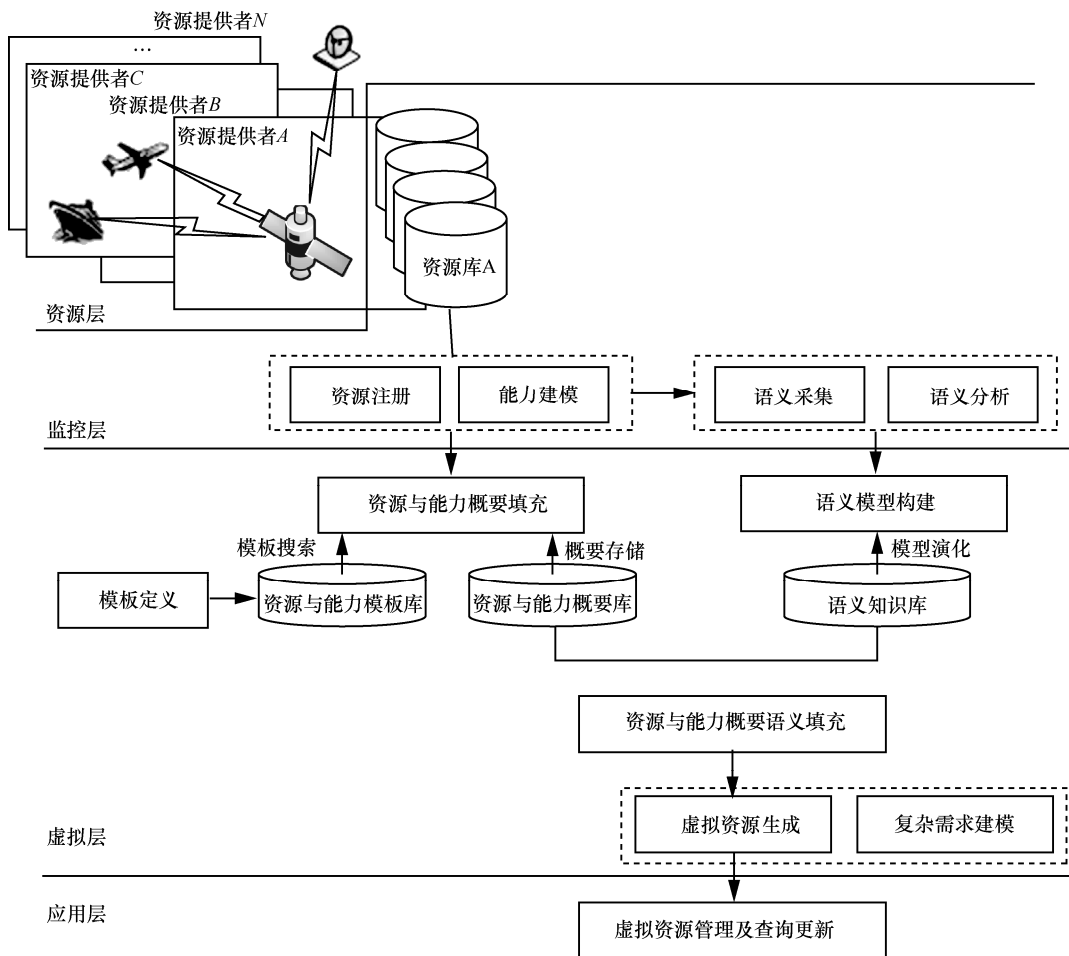


图 1 资源虚拟化功能结构

粒度差、资源功能相似性<sup>[7,8]</sup>。

根据天基资源网络环境中不同粒度层的资源共享策略，资源虚拟化方法大致可分为 3 类：面向属性的、面向活动的、面向过程的。

### 4 天基资源的调度与协同管理

虚拟资源调度是基于天基资源网络对虚拟资源的约束，主要为在时间约束和任务约束下，对虚拟化资源进行管理的过程。针对天基资源网络星上自主的特性，实时高效的资源调度方法能够有效节约星上计算和存储的开销，提高数据交换的效率<sup>[9,10]</sup>。

对于传统的卫星通信系统，地面同卫星间的通信链路属于长时延链路且受到很多自然因素的影响；同时，在地面构造命令序列需要极高的精确性，这对卫星通信系统提出了十分苛刻的条件，如任务开销、任务的可靠性、通信实时性的要求等。天基信息网络可以通过天地协同组网的方式工作，同时也存在以星上数据中心为基础独立组网和工作的能力，从而实现星上自主控制和资源调度。这使天基资源网络具有较强的自主生存能力，不仅降低了数据获取的操作开销，也增加了任务的可靠性。但是空间中的一些复杂情况给星上资源调度技术提出了新的挑战。这些特殊情况包括以下 4 种。

1) 任务目标及优先级的约束。任务的完成目标需要多资源实体间的协同工作；具有任务优先级的

需求，使用同一资源应对需求该资源的任务进行优先级排序，并应当保证特殊任务的完成度。

2) 时间方面的约束。任务的活动都有一定持续时间，而且该持续时间可能也是变化的。

3) 天基资源特性的约束。对于离散资源，在同一个时间不能有 2 个任务同时使用；对于连续资源，总和不能超过任务相关系统所能提供的总量；某些特殊资源不可被所有任务所调用。

4) 信息传输机制的约束。天基信息系统长期存在多目标协同工作的情况，资源调度需要在不同资源实体和异构网络间进行，对如何保证调度的实时和高效性提出了要求。

这些特殊的情况要求在进行资源调度时，不仅需要考虑任务的选择和排序，同时，还需要对资源和时间等进行分配和优化，这与传统的调度技术有很大的区别，常规的调度知识表示方式和问题求解方法都不能够直接应用到这样的领域，设计新的知识表示方法和规划算法是必需的。

面向任务的天基网络资源动态管理的体系结构分为 4 个模块，如图 2 所示。

1) 任务初步分析模块。负责接收来自应用层任务请求，并对收到的任务请求进行初步分析，完成任务要素的提取并将需要多次执行的任务请求划分成具体的子任务。

2) 任务需求映射模块。接受任务要素提取模块获得的任务要素和来自资源层的网络资源状态，将任务要素映射成对网络现有资源的需求。

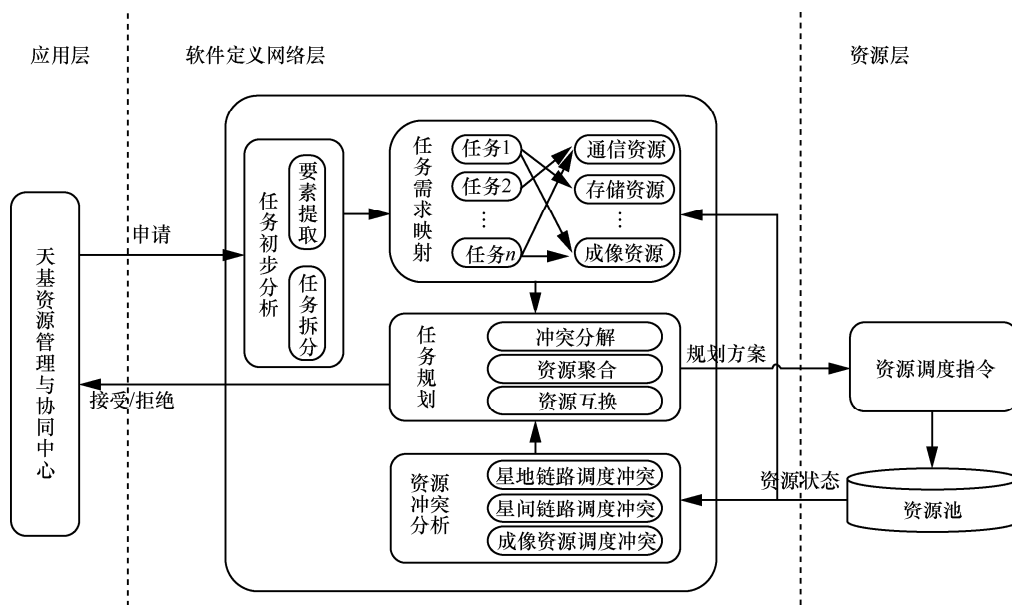


图 2 面向任务的天基网络资源动态管理体系结构

3) 资源冲突分析模块。从资源层获得网络中现有资源的状态，分析网络中现有资源的冲突情况，并利用时变冲突图完成对网络中现有资源的冲突情况的表征。

4) 任务规划模块。分别从任务需求映射模块和资源冲突分析模块获得任务对资源的需求和网络中现有资源的冲突模型，通过冲突分解以及资源聚合、转移、互换等方法得到一个任务规划方案。

为完成天基网络资源调度任务，需先建立应用文件，文件中包括资源虚拟化模型文件和资源调度任务定义文件，应用文件作为规划器输入，而规划器的输出则为解决该问题的规划解。

将整个调度过程进行分解，即列出调度过程中涉及的每个资源实体，并分别将细节信息加入到领域中。采用此方法能够使建模过程着眼于要解决的问题。方案采用基于时间线的建模方法，对每个部件都建立相应时间线，时间线上利用变量和谓词对信息进行表示。最后充实谓词特性，建立它们之间的约束关系。对于天基资源网络的资源调度问题，其主要约束就是任务约束和时间约束。下面通过简单卫星动作举例讨论资源调度执行中时间约束问题的建模：假设卫星姿态的状态为由方向 A 转向为方向 B，并对 B 进行预定动作。则通过有向图表示规划包含的动作，姿态系统的动作为转向，由 A 转向目标状态 B，相关系统对 B 进行预定动作，动作持续期间姿态系统保持定向。根据规划结果中的时间约束，卫星的姿态系统将于起始时刻后[0,10]执行转向动作，动作时长为 5；相关系统将于起始时刻后[0,10]执行预定动作，[0,20]结束动作，动作时长为 10；为了满足动作执行的条件，在转向动作完成[8,8]后，才能开始执行预定动作。由简单时间网络的定义，卫星中的时间约束可表示如图 3 所示。其中， $t_0$  为规划执行的初始时刻， $t_1$  和  $t_2$  为转向动作的开始与

结束时刻， $t_3$  和  $t_4$  为预定动作的开始与结束时刻。

将规划中时间约束表示为简单时间网络后，需要将其转化为可调度形式，能够在执行规划时实时计算动作的执行时间。这需要网络具有可分解性，即能够由局部一致的部分解，扩展得到全局一致的完全解。采用顶点间最短路径算法得到的距离图具有可分解性，同时由于距离图包括每对动作间的时间约束，计算每个动作的时间时都要考虑在它之前的所有动作。使用三角法则利用约束的传递性过滤可以被其他约束表示的冗余的时间约束，可以得到用于规划执行的最小可调度简单时间网络。规划后的最小可调度简单时间网络如图 3 所示。

### 5 结束语

天基信息网络是未来三维立体空间网络的实现方案，涵盖了天基信息网络和地面网络。从网络需求上看，天基资源网络业务具有高动态、多类型、大数据的特点；对网络资源进行实时高效的管理，是提升网络传输性能，实现有效通信保障的重要内容。本文主要针对天基信息网络的资源调度，对网络管理对象进行细粒度、多维度分析；根据天基资源网络环境中资源的不同特点和关注点，研究了虚拟资源生成算法；进一步，提出了面向任务的天基网络资源动态管理的体系结构，设计了基于不同约束的资源调度方法。

### 参考文献：

[1] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10):19-30.  
SHEN R J. Conception of space and earth integrated space Internet in China[J]. Chinese Engineering Science, 2006, 8(10):19-30.  
[2] 袁孝康. 天基综合信息网络构想[J]. 上海航天, 2001, 18(1):12-15.  
YUAN X K. Architecture of space base synthetic information networks[J]. Aerospace Shanghai, 2001, 18(1):12-15.  
[3] HAN X, LIU J, XIE D, et al. Robust  $h$ -infinity guaranteed cost satis-

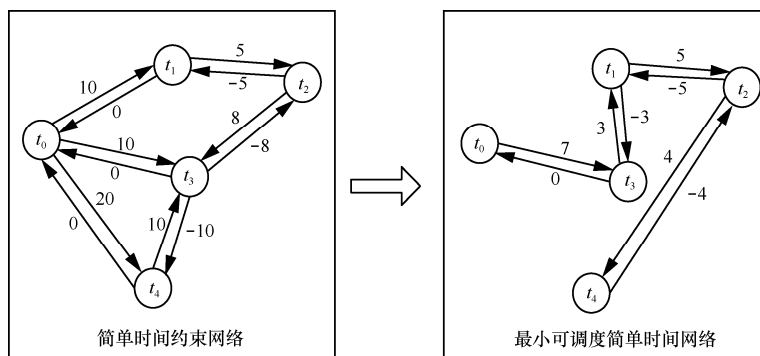


图 3 时间约束问题规划

factory fault-tolerant control for discrete-time systems with quadratic D stabilizability[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(3):496-502.

- [4] WU L, ZHANG Y, LI H. Research on fault detection for satellite attitude control systems based on sliding mode observers[C]// International Conference on Mechatronics & Automation. 2009: 4408-4413.
- [5] 陈成才, 张尧学, 周悦芝, 等. 基于轻量级虚拟机的透明计算系统[J]. 计算机工程, 2010, 36(11): 39-41.  
CHEN C C, ZHANG Y X, ZHOU Y Z, et al. Lightweight virtual machine-based transparent computing system[J]. Computer Engineering, 2010, 36(11): 39-41.
- [6] 刘宁. 云制造资源虚拟化关键技术及应用[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
LIU N. Key technology and application of virtualization of cloud manufacturing resources[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [7] 邓罡, 龚正虎, 王宏, 等. 现代数据中心网络资源管理技术分析与综述[J]. 通信学报, 2014, 35(2):166-181.  
DENG G, GONG Z H, WANG H, et al. Analysis and survey of resource management on modern data center networks [J]. Journal on Communications, 2014, 35(2):166-181.
- [8] JING C, ZHU Y M, LI M L. SEED: solar energy-aware efficient scheduling for on datacenters[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2015, 26(18): 2811-2835.
- [9] FU X, ZHU X X, HAN J Y. QoS-aware replica placement for data intensive applications[J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(3):43-47.
- [10] LIU N, LI X P, SHEN W M. Multi-granularity resource virtualization and sharing strategies in cloud manufacturing[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 46:72-82.

#### 作者简介:



**王睿** (1983-), 男, 山东济南人, 博士, 中国空间技术研究院通信卫星事业部工程师, 主要研究方向为无线网络通信技术、星上综合电子技术。



**韩笑冬** (1983-), 男, 山西太原人, 博士, 中国空间技术研究院通信卫星事业部高级工程师, 主要研究方向为星上综合电子技术。



**王超** (1987-), 男, 陕西西安人, 中国空间技术研究院通信卫星事业部工程师, 主要研究方向为星上综合电子技术。



**周晞** (1981-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 中国空间技术研究院通信卫星事业部高级工程师, 主要研究方向为微波成像技术、星上综合电子技术。



**龙军** (1972-), 男, 安徽安庆人, 博士, 中南大学教授, 主要研究方向为软件工程与信息系统、网络数据资源管理与服务技术。