

文章编号: 1001- 2486(2008) 04- 0111- 05

基于 MAS 的 DSS 自主协作运行体系结构模型研究*

高黎, 沙基昌

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对分布式卫星系统(DSS)自主协作运行特征, 分析现有 DSS 体系结构, 利用 MAS 理论与方法, 提出一种适应动态、复杂不确定环境的 DSS 两级系统层次的混合体系结构模型。同时根据多星协作和星内自治的需求, 给出一种较为通用的面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型, 并讨论了该结构中各 Agent 组成、功能及相互联系。

关键词: 卫星; 分布式卫星系统; 体系结构; 自主协作; MAS

中图分类号: V423 文献标识码: A

Research on Architecture Model with Autonomous Cooperation for DSS Based on MAS

GAO Li, SHA Ji-cang

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The qualitative analysis and comparison of commonly-used autonomous control architectures of Distributed Satellite Systems (DSS) are discussed. Based on it, a hybrid systematic hierarchical architectures model with two levels is put forward to fulfill autonomous cooperation demands of DSS under the dynamic and complicated uncertain circumstances. Furthermore, a novel agent model on satellite control architecture is outlined, and the components, functions and relationships of agents in the architecture are analyzed. It is designed for multi-satellites cooperation and satellite self-government, thus it has generality to a certain extent.

Key words: satellite; distributed satellite systems; architecture; autonomous cooperation; multi-agent system

分布式卫星系统(Distributed Satellite Systems, DSS)自主协作运行体系结构模型是面向 DSS 未来自主协作运行模式, 而关于卫星本身结构和功能、卫星之间以及卫星与外部环境之间交互关系的抽象描述。对于它的设计既要考虑到单颗卫星能够灵活自主地完成自身任务, 同时还要考虑到系统本身的开放性以及对环境的自适应性。目前, 现有 DSS 自主协作运行体系结构主要分为完全集中式、集中反馈式、分布式和完全分布式四种^[1]。虽各有优缺点, 但从整体上讲人们的分析工作主要是针对系统的空间几何构型。而事实上, 多个卫星平台及其有效载荷间的物理分布与协作关系, 亦为影响系统自主协作运行的根本性因素。

基于上述原因, 本文面向 DSS 未来自主协作运行模式, 在分析现有 DSS 体系结构的基础之上, 引入 MAS 理论, 从系统通用性、开放性和可扩展性出发, 提出一种适应动态、复杂不确定环境的 DSS 两级系统层次的混合体系结构模型以及面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型。

1 DSS 两级系统层次的混合体系结构模型

DSS 自主协作运行体系结构的设计, 必须基于 DSS 自主协作运行模式的基本特性^[1]。而 DSS 自主协作运行模式的实现, 主要得益于多种计算机技术和人工智能技术的引入。其中, MAS 理论即是当前在轨运行和计划的各类空间系统中运用最多的一项综合性技术。

* 收稿日期: 2008- 01- 12

基金项目: 国防科技大学基金资助项目(51421070304KG01)

作者简介: 高黎(1970-), 男, 博士生。

1.1 组织结构

将DSS视作一个MAS系统,组成DSS的各成员卫星映射为单个Agent,则DSS组织结构是指系统中各卫星Agent的角色关系及相应的职责。

在自主协作运行完成任务过程中,各卫星间存在一定的协作关系。从人类社会的组织中可以看到,为了有效完成任务,在协作关系中一般存在协作负责人和协作配合者两种类型的个体。于是这里将DSS中的卫星分为管理者(Manager)和工作者(Worker)两种角色。管理卫星Agent获得某个任务,由于个体知识或能力有限,难以单独完成,于是发起协作并寻找协作对象,同时对协作进行一定的管理和监督;工作卫星Agent根据自身知识和能力加入协作,以协作任务为目标,完成部分工作,配合管理者完成任务。

由于任务复杂性,以及环境的开放不确定性,在DSS中往往存在多个具体的协作关系。DSS系统的组织结构可用下式表示:

$$Structure = (S_{Agent}, Role, Responsibility, Team)$$

其中:

$S_{Agent} = \{sat_Agent_1, sat_Agent_2, \dots, sat_Agent_N\}$, 表示系统中的卫星Agent集合, 其中 sat_Agent_i ($1 \leq i \leq N$), 表示第 i 颗卫星Agent;

$Role = \{Manager, worker\}$, 表示角色集合;

$Responsibility = \{Resp(Manager), Resp(Worker)\}$, 表示各个角色的职能集合;

$Team$ 表示DSS中存在的所有具有协作关系的卫星团队。

若 $sat_Agent_i^{role} \in Responsibility(sat_Agent_i \in S_{Agent}, role \in Role)$ 表示 sat_Agent_i 所能完成的 $role$ 角色定义的职能。 $S_{Agent_i} \subseteq S_{Agent} (S_{Agent_i} \neq \emptyset)$ 表示卫星Agent的一个非空集合, 则这组卫星Agent的职能可以表示为:

$$Responsibility(S_{Agent_i}) = \{sat_Agent_j^{role} \mid sat_Agent_j \in S_{Agent_i}\}$$

DSS中的一个协作团队 $Team_i$ 可表示为:

$$Team_i = (S_{Agent_i}, Responsibility(S_{Agent_i}))$$

在DSS中的各协作团队表示的基础上, $Team$ 可表示为如下形式:

$$Team = \bigcup_{i=1} Team_i = \bigcup_{i=1} (S_{Agent_i}, Responsibility(S_{Agent_i}))$$

需要注意的是: 单个卫星Agent的角色并不是固定的, 随着任务以及环境的变化, 卫星Agent的角色也会发生变化, 从而造成系统组织结构的 $Team$ 发生变化。这就说明了DSS的组织结构是动态的, 可以更好地适应动态环境和复杂动态任务。

1.2 控制结构

本文所研究DSS中的卫星都是自主运行的小卫星, 即其Agent模型具有一定程度的“智能”。现有的完全集中式结构中只有一个卫星具有完全的智能, 其他卫星则不具智能, 结构的计算能力都集中在主星Agent上, 在问题规模较大, 计算量增大的情况下, 容易产生瓶颈问题。另外, 从可靠性角度分析, 如果主星Agent出现故障, 系统将无法运行, 这对于航天系统尤其不合适。对于完全分布式结构, 所有卫星Agent可以相互通讯, 共享信息和知识, 具有全局协商通信能力。在这种结构中由于具有系统全局知识, 并能进行整体规划的卫星, 即所谓管理者卫星Agent增多, 使得系统冗余大大增加, 可靠性也随之提高。但是当系统规模很大, 卫星Agent数量很多的时候, 系统的通信量将会非常大, 不同卫星Agent之间的协调将变得非常复杂, 增大了开发的难度。同时这种结构虽然局部自治性很好, 但是不易达到全局优化的目标。集中反馈式结构, 同样包含主星和伴星两种卫星Agent, 与完全集中式结构所不同的是伴星具有一定的“智能”, 而不是简单对命令进行反应。它负责卫星层次上的局部规划与决策, 并且伴星可以通过与主星的相互作用共同决策, 使系统的计算能力得到分布, 克服了完全集中式结构的计算瓶颈问题, 同时也保持了全局最优性。但是由于只有一个主星Agent, 系统可靠性不高。分布式结构可以看作

是由若干集中反馈式结构组合而成,其中各个主星 Agent 之间采用分布式协调算法协调各自的任务,然后再由主星 Agent 执行集中反馈式的全局规划与决策,控制属于自己的卫星系统。这种方式类似于联邦式结构,其冗余较多,可靠性高。但是由于没有全局的管理者,无法保证全局最优。

基于以上分析,本文不考虑完全集中式结构和完全分布式结构,而是基于 MAS 系统混合结构的思想,在分布式结构的基础上,根据对地观测 DSS 自主协作模式特征,对分布式结构进行改进,加入集中反馈式结构的优点,同时根据 DSS 组织结构模型,建立包含管理者和工作者角色的 DSS 两级系统层次混合控制结构模型。如图 1 所示。

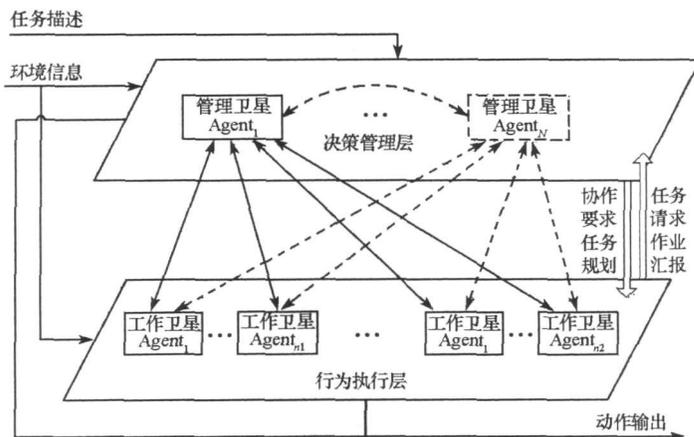


图 1 DSS 两级系统层次混合控制结构

Fig. 1 A hybrid hierarchical architecture with two levels for DSS

该结构包含决策管理层和行为执行层。

(1) 决策管理层为高层组织规划层, DSS 中的管理卫星 Agent 位于此层。决策管理层主要就具体任务发出协作请求,明确协作机制和策略,并生成具体任务指令。与分布式结构不同的是:在任意时刻,整个 DSS 系统只能有一个管理卫星 Agent 发挥作用,通过与所有其他工作卫星 Agent 的相互作用完成整个系统的全局规划与决策(如图中实线所示)。不发挥作用的管理卫星 Agent(如图中虚线所示)作为实际管理 Agent 的备份,仅仅在它失效的情况下启用。在这种结构中,某个时刻的全局规划与决策仅由一个 Agent 做出,可以保证全局最优性。另外,将分布式结构中的分布式协调算法引入到这种混合结构中,通过管理卫星 Agent 与工作卫星 Agent 的协商完成全局规划与决策,可以提高系统的适应性,同时也使系统计算量得到分布,避免出现瓶颈问题。

(2) 行为执行层为底层动作规划和执行层, DSS 中的工作卫星 Agent 位于此层。行为执行层以一定方式与决策管理层形成协作关系,获取所分配的任务,在协作机制指导下进行任务规划,产生动作序列,并在工作中与其他卫星 Agent 协调,从而使多卫星协作完成任务。

需要说明的是:在这样的结构下,任何卫星 Agent 都具有两种候选角色:“管理者”和“工作者”。亦即:由于环境的动态性和任务的复杂不确定性,使得卫星的角色不是一成不变的,任何一颗卫星都应具备“管理”和“工作”的能力。

当系统确定决策管理层和行为执行层后,任务协作过程中只有一个卫星 Agent 承担“管理”职能。此时,系统控制结构蜕化为类似于集中反馈式结构。但由于外部环境动态不确定性,使得决策管理层中的管理卫星 Agent 并非仅仅负责协作的管理和监督,同时根据需要也可执行动作,完成相应的部分协作任务,或直接作用于环境,发挥出“工作者”的职能;这时其各个功能 Agent(参考 2 节)都处于“唤醒”状态,具有相同的智能和自主程度;处于行为执行层工作卫星 Agent,其内部与多星协作相关的 Agent 均处于“睡眠”状态,只有当“管理者 Agent”发生故障或不能完成整体规划任务时才将其唤醒。此时,工作卫星 Agent 则可能转到决策管理层成为“管理者”,并承担起管理的职能。

角色的变化会提高系统的可靠性和灵活性,使 DSS 能更好地适应动态不确定的环境和复杂的动态观测任务,亦使系统更具柔性。可见, DSS 两级系统层次混合控制结构本质上是一种动态自组织结构。

2 面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型

事实上, DSS 要自主协作实现任务目标, 既要求卫星之间具有相互协作的能力, 又要求卫星本身内部具有自治能力。在 MAS 理论中, 根据各种 Agent 的不同智能水平及其行为特征, 将 Agent 结构划分为反应结构、慎思结构和混合结构^[2]。DSS 系统与之对应, 则同态映射为反应型卫星 Agent、慎思型卫星 Agent 和混合型卫星 Agent。它们适于不同的任务与环境, 有着自身的特点。然而, 这些 Agent 模型仅仅涉及卫星 Agent 对自身行为所实施的规划调度, 即卫星本身的自治, 并没有考虑卫星与卫星之间的交互与协作^[3-5]。

所以, 这里将两种思想加以综合, 提出面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型, 使之不仅具备单星自治, 同时也具有多星协作的功能, 如图 2 所示。

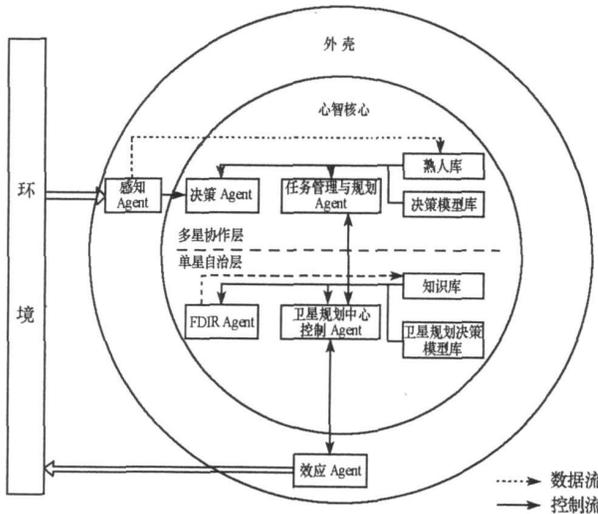


图 2 面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型

Fig.2 Satellite autonomy architecture for DSS cooperation

该结构从逻辑上分为卫星 Agent 心智核心与外壳两层。心智核心本身亦为一种层次结构, 由多星协作层和单星自治层组成, 主要完成协作工作下的任务规划、卫星系统级的任务控制、卫星故障检测与重构, 以及卫星基本动作指令序列生成等功能。而外壳主要包括感知 Agent 和效应 Agent, 负责对外界环境实体和卫星自身状态信息的获取、指令的执行, 并将执行状态或结果反馈给心智核心或外界环境。

2.1 卫星 Agent 心智核心组成与功能

(1) 多星协作层

- 决策 Agent: 针对 DSS 总体空间任务目标, 分为总体任务决策 Agent 和子任务决策 Agent。总体任务决策 Agent 对任务进行解释, 同时基于决策模型库中的模型和熟人库中信息确定完成总体任务目标所需要卫星及有效载荷的类型和数目; 子任务决策 Agent 需要依据卫星自身状态信息在总任务的执行过程中做出系统重构、系统升级、碰撞规避等系统任务决策。

- 任务管理与规划 Agent: 针对 DSS 任务, 完成不同层次上的规划任务。主要包括: 任务分解、任务分配与调度、系统空间构形变换规划、碰撞规避规划等。

- 决策模型库: 采用顶层化的决策模型。所拥有的模型是 DSS 系统全局性的, 其决策是面向 DSS 任务目标总体优化的 DSS 整体行为的顶层规划与调度, 而不是单颗卫星 Agent。它包括总体任务分解模型、任务分配与调度模型、DSS 系统重构及碰撞规避规划模型等。

- 熟人库: DSS 信息保存在熟人数据库中, 包括 DSS 系统中卫星数目、各卫星完成特定任务的能力、卫星之间的相对位置关系等。

(2) 单星自治层

- 卫星规划中心控制 Agent: 卫星内部独立自治的控制中心, 也是多星协作层与结构外壳连接的纽

带。其功能主要包括:系统级任务目标管理;将多星协作层分配的任务分解为具体的飞行计划时间序列,并根据知识库中的卫星状态信息产生一个详细的控制指令序列,传递给效应 Agent;协调卫星内各个分系统,解决各个分系统自主工作引起的资源冲突;监控指令执行状况,并将其反馈给上层 Agent 等。

- FDIR Agent:从整体上对卫星进行状态监测、性能评估和故障诊断,并在出现故障时给出解决方案,并报知上层 Agent。

- 系统级决策模型库:采用基于知识的“智能”决策推理模型,所作的决策不仅仅是面向卫星局部或底层的行为,同时是面向卫星系统级的整体行为的高层规划。具体包括系统级任务分解模型、系统级任务分配调度规划、轨道机动路径调整模型、卫星姿态调整及能源消耗整体规划、故障诊断与恢复、基本反应行为模型等。

- 知识库:反映卫星内部属性和状态。包括卫星 Agent 模型运行所需的当前状态和必要的历史信息序列,如卫星自身的位置、姿态、速度;能源水平;传感器工作模式等软件或硬件工作状态。

2.2 卫星 Agent 外壳组成与功能

(1) 感知 Agent

感知 Agent 的功能主要是获得 DSS 系统内其他卫星 Agent、环境实体、自身的各种属性和状态信息,以及地面运营系统发送来的控制指令和数据信息等,并将其传递给心智核心的决策 Agent,完成对环境刺激的“感知”。

(2) 效应 Agent

效应 Agent 是描述卫星 Agent 对自身和外部实体作用的行为模型。这种作用表现为对外部 Agent 发来的控制或调用信息的响应。可分为内部行为和外部行为两部分:内部行为是将心智核心所产生的控制指令序列,根据当前状态,变成卫星各分系统的响应行为。外部行为则是响应其他卫星 Agent 或地面消息,提供自身状况或发送指令。

面向自主协作的卫星控制结构本质上讲是一种动态自组织结构。它在逻辑上将卫星内部自治与星间协作相分离,既保证了各卫星之间能够互操作并及时交换信息,又保证了各卫星内部的自治性,是“社会型”卫星 Agent。

3 结论

DSS 自主协作运行体系结构是系统内多卫星确保获得自主协作,有效完成空间任务目标的基础。对于它的选择影响着系统一致性、自主性、自适应以及完成任务的程度。考虑到 DSS 系统自主协作运行模式的基本特征,本文引入 MAS 理论来研究 DSS 自主协作运行体系结构。从组织结构模型和控制结构模型两个侧面对 DSS 总体结构进行描述,提出一种适应动态、复杂不确定环境的 DSS 两级系统层次混合体系结构模型。同时又针对多星协作和星内自治的要求,在给出的总体结构模型的基础上,提出一种较为通用的面向自主协作的卫星控制结构 Agent 模型。而 DSS 体系结构的实现、卫星 Agent 自组织机制及其仿真分析等还需要进一步地研究。

参考文献:

- [1] Schetter T, Campbell M, Surka D. Multiple Agent-based Autonomous Control of Multiple Satellite Clusters [D]. Master thesis, University of Washington, 1999.
- [2] 史忠植. 智能主体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] Sarika D M, Brito M C, Harvey C G. The real-time Object Agent Software Architecture for Distributed Satellites systems[C]//Proceeding of 2001 IEEE Aerospace Conference Piscataway, NJ, IEEE Inc, 2001(6): 2731- 2741.
- [4] Schetter T, Campbell M, Surka D. Multiple Agent-based Autonomy for Satellite Constellations [J]. Artificial Intelligence, 2003, 145: 147- 180.
- [5] 张健, 戴金海. 面向多星协同的卫星自组织自主控制体系结构[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 95- 98.