

基于排队网络的卫星应用信息链节点资源配置方法^①

黄学孝, 徐培德

(国防科学技术大学 信息系统工程重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 针对卫星应用信息链的研究, 给出一种基于排队网络理论的卫星应用信息链模型, 确定相关的基本参数. 分析在排队网络理论下卫星应用信息链节点的资源配置问题, 并提出基于排队时间感知的节点资源配置优化算法, 对信息链节点资源进行合理配置.

关键词: 卫星应用信息链; 排队网络; 节点资源配置

Satellite Application Information Chain's Point Resource Disposing Based on Queuing Network

HUANG Xue-Xiao, XU Pei-De

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China.)

Abstract: This paper gives a model about satellite application information chain based on queuing network, and ensure its basic parameters. It analyses the question about satellite application information chain's point resource disposing based on queuing network, and optimal algorithms based on queuing time are presented, to dispose the point resource.

Key words: satellite application information chain; queuing network; point resource disposing

在 20 世纪末的几场高技术局部战争中, 卫星应用技术和装备在战场侦察、通信传输、导航定位、气象监测等方面的应用越来越广泛和深入. 卫星应用能力和水平已成为衡量一个国家综合国力和国防现代化程度的重要标志. 我国经过多年的建设, 卫星资源体系逐步完善, 卫星资源的技术水平紧跟世界先进国家的步伐. 随着卫星资源建设的不断发展, 卫星应用技术也不断提高, 但总的来说, 我国卫星领域仍然是“系统强, 应用弱”的困局. 目前我国拥有数量众多的卫星以及与其相配套的数据处理中心, 对于各个数据处理中心之间的相互协调配合问题以及不同数据处理中心的装备和人员的配置问题, 一直没有一个很好的解决办法, 导致了处理任务效率低下、资源冗余等问题的发生. 因此, 加强卫星应用薄弱环节建设, 提高装备资源的有效利用率, 已成为当前卫星应用研究中亟待解决的问题.

卫星应用信息链是近年来我国卫星应用专家着眼

于解决卫星信息快速高效保障问题而提出的概念, 主要强调从对卫星信息保障全过程的整体考虑出发, 解决提升联合作战过程中卫星信息保障能力的问题. 文献[1-4]重点介绍了有关卫星应用信息链的相关概念以及目前的应用领域和研究现状. 近年来卫星应用信息链的研究认为, 卫星应用信息链节点的资源配置是评估的基本依据, 在卫星信息应用链的设计工作完成之后, 对各节点的装备数量进行合理的配置, 是卫星信息应用链运行之前必须完成的工作, 也是提高各节点工作效率的前提条件. 在节点资源配置研究方面, 金淳^[5]利用分布式仿真方法分析研究了集装箱港口作业资源配置问题, 优化物流网络资源配置. 治学亮^[6]硕士论文中研究了通信网络资源配置方法, 提出联合虚拟节点和虚拟链路的虚拟网络统一资源配置方法. K. Y. K. Ng^[7,8]等人在进行排队网络研究时, 也提出相应的节点资源配置方法. 针对目前存在的问题, 本文对卫星应用信息链节点资源配置问题的研究, 提供了对

^① 收稿时间:2014-03-17;收到修改稿时间:2014-04-23

各个信息链节点的装备和人员进行合理配置的解决方案, 在有效处理任务的情况下, 实现装备资源的最小投入, 改善我国目前存在的资源配置不合理等现象. 因此本文利用排队网络理论, 设计一种合适的应用信息链模型, 并对卫星应用信息链节点资源配置问题进

行分析.

1 问题描述

卫星应用活动包括了对各类卫星获取的信息进行传输、处理和应用以实施和保障日常行动的活动.

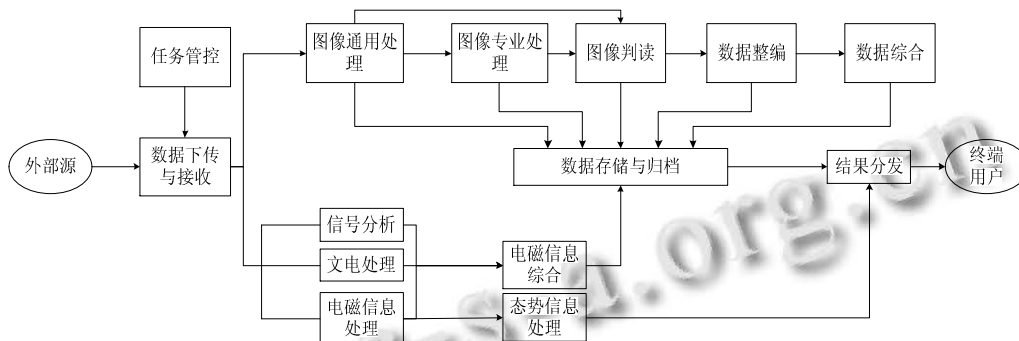


图 1 卫星应用活动图

如图 1 所示, 一次完整的卫星信息应用过程始于卫星信息数据下传至地面, 结束于各级用户单元的卫星信息产品应用. 一个完整的卫星应用信息链包括数

据下传与接收、情报生产任务管控、数据处理等任务, 以及处理这些任务的各个应用节点. 图 2 给出了我国卫星应用节点之间的连接关系.

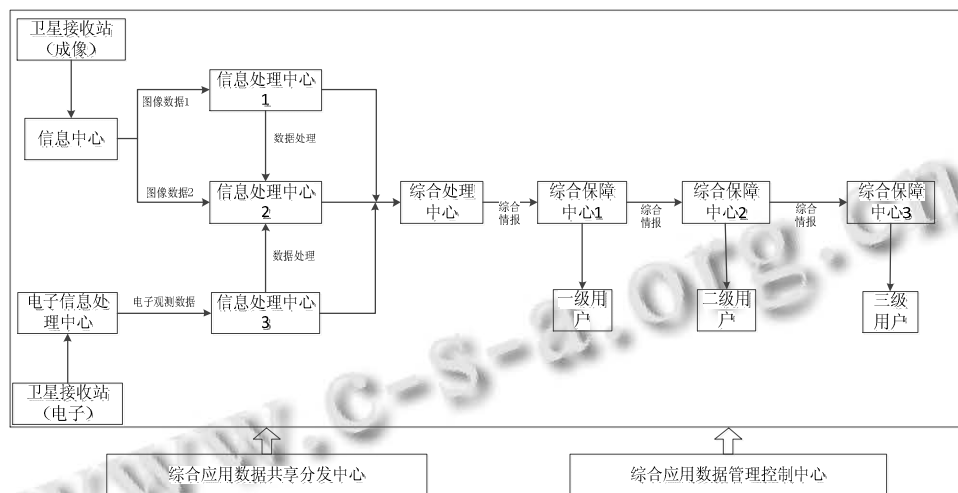


图 2 卫星应用节点连接关系图

其中卫星应用节点是指对卫星信息获取的信息进行处理、传输和应用信息来实施和保障日常行动活动的组织或机构, 是构成卫星应用信息链的重要一环. 整个节点的连接关系构成了一套完整的信息链, 在外部信息源进入的情况下, 各个节点处理进入的数据信息, 并将产生的结果输出到下一个节点进行处理, 最终输出给终端用户.

在整个卫星应用信息链构成一个排队网络的前提

下, 各个节点则可认为是一个单节点排队系统. 现考虑单个节点的工作情况, 对任务流到达情况进行分析, 任务流到达的情况因流量强度和突发情况而产生差异, 通常根据日常和战时卫星应用任务流生成的特点, 可以将任务流的生成分为四种情况: 即低强度低突发性、低强度高突发性、高强度低突发性、高强度高突发性, 因此节点的资源配置应能处理不同流量强度的任务, 对于任务流量、强度大的节点, 应分配较多的资

源; 对于任务单一, 强度小的链节点, 则应避免资源的浪费.

对节点的服务规则进行分析, 这里指任务进入队列后以怎样的一种服务规则接受服务, 一般分为先到先服务, 后到先服务, 随机服务, 按优先权进行服务等情况. 对于队列容量有限的情况, 存在丢弃超出队列容量任务的情况, 所以应采取增加服务台数量以达到减少等待时间, 控制队列长度的目的.

本文在假设一定资源总量的前提下, 合理配置各个节点的装备资源, 使得每个节点的装备数量满足处理该节点任务流的要求, 并达到整个卫星应用信息链中各个节点任务等待时间的均衡.

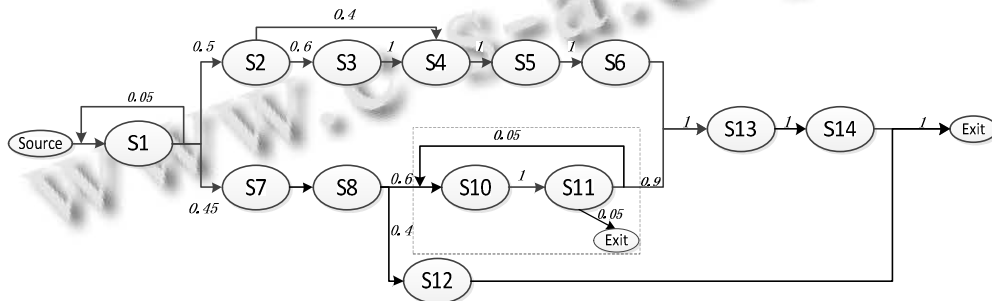


图 3 卫星信息应用链排队网络模型

图中节点(S1、S2...S14)代表卫星信息服务, 每个节点有若干个服务台, 弧代表卫星应用任务的流向, 并有相应的任务转移概率. 在图 3 中有一个外部节点(Source), 它代表卫星应用任务的到达过程, 而非任何卫星信息服务. 卫星应用任务从外部节点进入卫星信息应用链节点, 沿着有向弧依次进入各个节点接受服务, 并最终从外部节点(Exit)离开系统. 对于单个节点而言, 可以根据单队列, 多服务台排队模型对其进行求解.

对于该模型的分析求解, 本文沿用了 Whitt 在文献[10]中的方法, 假设外部到达非泊松分布, 服务时间服从非负指数分布, 对于单个节点, 可以用利用 GI/G/C 模型对其进行描述. 求解该模型, 可以借鉴文献[10]中的参数分解近似方法进行分析. 其各采用两个参数来描述卫星信息应用链的到达过程与服务时间规律, 一个参数用来表示到达时间间隔和服务时间的均值, 另一个参数则表示到达时间间隔和服务时间的变化特点. 对于到达过程, 可通过任务的平均到达率 λ 和到达时间间隔变化系数 ca 来描述; 对于服务过

2 模型建立

本文借鉴 Ghanmi 等人^[7-9]对数据流进行建模的思路, 将整个卫星应用信息链看成一个排队网络, 将各个节点看成单节点排队系统, 服从先到先服务的服务规则, 并考虑其能适应四种典型的卫星信息应用任务流的生成情况. 针对卫星应用信息链的特点, 本文给定一种根据各个节点的连接关系基于排队网络的卫星应用信息链的模型. 其中由于原模型存在分支/合并机制, 会导致网络不具有乘积形式解, 故本文借鉴文献[10]的方法, 对模型进行一定修改, 得到修改后的应用信息链模型如图 3 所示.

程, 可通过平均服务率 μ 和服务时间变化系数 cs 来描述. 定义卫星应用信息链网络模型参数向量, 表示为 $\omega = \langle \lambda, ca, \mu, cs \rangle$.

在卫星信息应用链的求解时, 首先要对每个节点的参数向量 $\langle \lambda, ca, \mu, cs \rangle$ 进行明确. 平均服务率参数 μ 和服务时间变化系数参数 cs 可以通过对历史数据作统计分析得到^[11]. 假设采用的服务时间样本 δ 容量为 N , 则平均服务率 μ 可近似表示为

$$\mu = \frac{N}{\sum_{i=1}^N T_i} \tag{1}$$

服务时间变化系数由可通过下式求得:

$$cs^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N} \tag{2}$$

其中, $\bar{T} = 1/\mu$ 表示平均服务时间.

平均到达率 λ 可由以下公式得到:

$$\lambda_i = \lambda_{0,i} + \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_j P_{ji} \tag{3}$$

其中, γ_i 为倍率因子, 由节点输出的任务数和输入的

任务数比值得到, P_{ij} 为转移概率参数, 表示任务经过节点 i 的处理后, 接受节点 j 服务的概率。

由于卫星信息应用链外部到达过程的平均到达率 λ 与到达时间间隔变化系数 ca 与近似相关, 各节点的内部到达过程需要通过数学方法进行求解。

到达时间间隔变化系数则可以通过求解下面的流量变化方程得到。

$$\begin{aligned} \lambda_i ca_i - \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \rho_j^2) \gamma_j^2 p_{j,i}^2 ca_j = \\ \lambda_{0,i} + \sum_{j=1}^N \{ \lambda_j \gamma_j p_{j,i} (\gamma_j p_{j,i} \rho_j^2 cs_j + 1 - p_{j,i}) \}, \\ i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ρ_j 为节点 j 上的任务流强度或节点利用率参数, 可以通过节点的平均到达率 λ_j 与平均服务率 μ_j 及服务台数量 s_j 计算得到 $\rho_j = \lambda_j / s_j \mu_j$, 当且仅当 $\rho < 1$ 时, 系统最终达到稳态; ca_j 为节点 j 的内部到达率变化系数; $ca_{0,j}$ 为节点 j 的外部到达率变化系数; cs_j 为节点 j 服务时间变化系数。

3 节点资源配置方法

通过对模型的分析求解, 本文得到了卫星信息应用链排队模型及其基本参数, 但是在模型运行之前还必须明确服务台的数量配置情况。通过这种优化配置, 为卫星信息应用链运行提供初始方案, 它也是卫星信息应用链的性能评估的基本对象。

一般来说, 卫星信息服务的功能主要是由安装在计算机上的不同类型的软件来实现的。为了研究的方便, 本文做出如下合理假设:

- 各节点的服务台为专业人员与计算机结合的人机系统。
- 所有服务台均是同质的, 即所有服务台包含人与计算机数量及结合方式无区别。
- 服务台被分配到任一节点后均可被赋予该节点的处理功能。

在这种假设前提下, 卫星侦察应用信息链节点的服务台配置问题可以认为是一定数量的人机系统在不同节点的数量分配问题。

顾客最关心的是在节点的平均等待时间(虽然队长参数也是用户非常关心的方面, 但由于队长与等待时间之间的强相关性, 二者可以相互体现), 那么卫星信息应用链每个节点服务台数量的最优化配置方案可

以通过最小化节点的最大等待时间来获得

$$\min z = \text{Max}_{s_i} \lambda_i W_{q,i}(ca_i, cs_i, s_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

S.J.

$$\rho_i < 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N s_j = S \quad (7)$$

$$s_i \geq 0 \quad (8)$$

其中, 公式(6)为单节点排队系统达到稳态的必要条件; 公式(7)为服务台总量限制, 为服务台总数; 公式(8)为参数取整约束。

针对性上述模型, 本文提出一种排队时间感知的卫星信息应用链节点优化配置算法, 其基本思想是: 以卫星应用信息链各节点的平均等待时间为基础, 选取最大平均等待时间作为基本判据, 通过不断地迭代计算, 直至各节点的最大等待时间改变量没有明显改进时算法结束。

下面, 首先对算法中所涉及的参数的求解方法进行说明:

节点的内部到达率可通过流通率公式来进行求解

$$\lambda_i = \lambda_{0,i} + \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_j P_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

节点的内部到达时间间隔变化系数可通过流量变化方程来求解

$$\begin{aligned} \lambda_i ca_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{14} \{ \lambda_j (1 - \rho_j^2) p_{j,i}^2 ca_j \} \\ = \lambda_{0,i} ca_{0,i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{14} \{ \lambda_j p_{j,i} (\rho_j^2 p_{j,i} cs_j + 1 - p_{j,i}) \} \\ i = 1, \dots, 8, 10, \dots, 14 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\rho_j = \lambda_j / (s_j \mu_j)$ 。

在求解平均等待时间时, 借鉴文献[10]的方法, 在求解 M/M/C 模型平均等待的基础上利用参数分解方法求解一般分布情况下的 GI/G/si 模型的平均等待时间。

首先将节点看成标准的 M/M/C 模型, 通过 little 公式求解标准的 M/M/C 模型的平均等待时间^[12]

$$W_q^{M/M/C} = \frac{(c \cdot \rho)^c \rho \cdot P_0}{c!(1 - \rho)^2 \lambda} \quad (11)$$

再利用 Whitt 近似公式求解得到 GI/G/si 模型的平均等待时间

$$W_{q,i}^{GI/G/s_i} = \frac{ca_i + cs_i}{2} W_{q,i}^{M/M/s_i} = \frac{(ca_i + cs_i)(\rho_i \cdot s_i)^{s_i} \rho_i \cdot P_0^i}{2s_i!(1 - \rho_i)^2 \lambda_i} \quad (12)$$

算法的基本步骤如下:

Step 1: 令 V_i 为最佳配置方案中节点 i 的服务台数量, V_q 为目标函数的最佳值. 通过公式 9 求解所有 λ_i 的值, 给定目标函数改变量阈值 δ_0 .

Step 2: 令 $k \rightarrow 0$, 初始化 $s_i(k)$ (第 k 次迭代时节点 i 的服务台数量 S_i), 对所有节点求解 $W_{q,i}^{(G1/G/s)}(k)$ (第 k 次迭代时节点 i 的平均等待队长) 的值, 令:

$$w(k) = \max_{1 \leq i \leq N} w_{q,i}^{(G1/G/s)}(k) \quad (13)$$

$$s_i(k) \rightarrow v_i;$$

$$w(k) \rightarrow V_q$$

Step 3: 令 $k+1 \rightarrow k$, 将 λ_i 、 $s_i(k-1)$ 的值代入公式 10, 计算 ca 的值.

Step4: 使用 lingo 软件对公式 13 进行求解, 得到所有节点最大排队时间为 $w(k+1)$.

Step5: 根据 Step4 的求解结果计算优化改变量 $\delta = |w(k+1) - w(k)| / w(k)$, 如果 $\delta > \delta_0$, 迭代结束, 否则, 返回第 3 步.

4 算例分析

下面, 以图 3 为例对模型的求解过程进行说明. 可得:

$$\min z = \text{Max}_{s_i} \lambda_i W_{q,i}(ca_i, cs_i, s_i), \quad i = 1, \dots, 8, 10, \dots, 14 \quad (14)$$

S.J.

$$\begin{cases} \rho_i < 1 \\ \sum_{j=1, j \neq 9}^N s_j = S \\ s_9 = s_{10} \\ s_i \geq 0 \end{cases}$$

模型的基本参数设置如表 1 所示.

表 1 模型的基础参数

节点编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S10	S11	S12	S13	S14
节点平均服务时间 μ_i (个/小时)	8	6	4	11	20	20	10	15	24	24	11	3	6
服务时间变化的系数 CS_i (个/小时)	1.2	1.2	0.8	1.6	3.5	3.1	1.8	1.9	2.21	2.07	1.3	0.4	0.2

设 $S = 210$ 外部输入过程为 $\lambda = 100, ca = 0.004$, 则 可得到下表所示的卫星信息应用链服务台配置方案.

表 2 服务台最优化配置模型求解结果示例

节点编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S10	S11	S12	S13	S14
服务台数量 S_i	2	3	4	11	77	20	10	15	24	24	11	3	6
平均等待时间 W_i (小时)	0.05	0.05	0.57	1.62	3.78	3.61	3.58	5.49	2.21	4.07	3.55	4.02	2.01

在该配置方案中, 以最小化节点的最大等待时间为目的, 在服务台总量一定的前提下, 对每一个节点的服务台数量进行合理化分配, 使得满足每个节点的最大等待时间最小, 即满足节点对任务流处理能力的要求.

5 结论

本文分析了基于排队网络理论建立的卫星应用信息链模型的节点资源配置优化问题. 本文根据卫星应用数据链的工作特点, 基于排队论的假设对其进行建模分析. 在此基础上, 利用最小化每一个节点的排队等待时间, 对信息链节点的资源配置进行优化, 并设计出一种优化资源配置算法, 合理分配资源, 对解决

现阶段我国卫星应用方面的资源配置不合理, 处理任务效率不高的问题, 都有一定意义.

今后的研究工作主要包括: 进一步验证算法的可行性以及有效性; 改进算法拓宽其应用范围.

参考文献

- 谈群, 李志猛, 彭黎, 赵滇. 天基信息系统任务流度量方法及其应用. 计算机工程与应用, 2010, 46(32): 212-215.
- 全军军事术语管理委员会. 中国人民解放军军语. 北京: 军事科学出版社, 2011.
- 郭少阳. 基于 QoS 的卫星应用信息链服务调度方法. 计算机系统应用, 2013, 23(11): 99-104.
- 郭少阳, 邱涤珊, 李志猛, 刘刚. 对抗条件下的成像侦察卫星

- 应用信息链仿真方法研究.中国电子学会电子系统工程分会第二十届军队信息化理论学术会议,2013,7:363-368.
- 5 金淳,邓玲丽,高鹏.集装箱港口作业资源配置的分布式仿真优化方法.系统管理学报,2011,20(3):363-369.
- 6 治学亮.通信网络统一资源分配算法研究[硕士学位论文].重庆:重庆大学,2013.
- 7 Ng KYK, Ghanmi A, Lam MN, Mitchell R. Workforce configuration and workflow analysis of an information technology organization: a queuing network approach. IEEE Trans. Syst., Man, Cyber. 2002, 32(6): 724-732.
- 8 Ng KYK, Ghanmi A, Lam MN. Workflow analysis of an information technology organization: The case of the operational mode during a time of crisis. IEEE Trans. Engineering Management, 2005, 52(3): 396-403.
- 9 Ghanmi A. Modeling and analysis of a Canadian Forces geomatics division workflow. European Journal of Operational Research, 2004, 170: 1001-1016.
- 10 Whitt W. The Queuing Network Analyzer. Bell Syst. Tech. J. 1983, 62: 2817-2843.
- 11 郭少阳,刘进.面向服务模式的卫星应用任务流生成框架.军事运筹学学会 2013 年学术会议论文集,2013,10:104-107.
- 12 甘应爱等.运筹学(第 3 版).北京:清华大学出版社,2005.