

基于排队网络的空间信息数据处理系统效能评估

王建江*, 邱涤珊, 彭黎

(国防科学技术大学 信息系统工程重点实验室, 长沙 410073)

(*通信作者电子邮箱 jianjiangwang@nudt.edu.cn)

摘要:为科学评估空间信息数据处理系统(SIDPS)应用效能,提出一种基于排队网络的评估方法。分析归纳了空间信息数据处理模式,构建了系统效能评估核心指标体系,运用有限等待多级排队网络建立了空间信息数据处理系统效能评估模型,对系统效能进行综合评估。实验分析表明,该方法能够有效评估空间信息数据处理系统效能。

关键词:空间信息数据处理系统;效能评估;指标体系;排队网络

中图分类号: TP391.1 **文献标志码:** A

Performance evaluation of space information data processing system based on queuing network

WANG Jian-jiang*, QIU Di-shan, PENG Li

(Key Laboratory of Information System Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the performance of Space Information Data Processing System (SIDPS), this paper presented an evaluation method based on queuing network. The processing patterns of space information data were analyzed. In addition, core index systems of performance evaluation were constructed, and a performance evaluation model of SIDPS with limited waiting queuing network was established. The experimental results confirm the effectiveness of the approach.

Key words: Space Information Data Processing System (SIDPS); performance evaluation; index system; queuing network

0 引言

空间信息数据处理系统(Space Information Data Processing System, SIDPS)主要是将空间下传的原始数据录入、处理后,传输到空间信息数据库或分发共享子系统,是空间信息共享与应用系统的重要组成部分。科学分析评价空间信息数据处理系统的效能是系统设计研制和规划建设的重要依据,对于提高空间信息服务水平、服务质量具有重要意义。随着空间信息共享与应用系统功能日趋强大、应用范围日趋广泛,该问题的重要性、紧迫性也日益突出。

目前,与空间信息数据处理系统效能评估相关的研究还十分有限。文献[1-5]通过建立能力指标体系,分析空间信息服务系统对作战的支持程度,评价系统总体效能,但是由于作战受到大量不确定因素的影响,这种支持程度很难分析清楚,同时这类方法主观性较强,难以准确反映空间信息服务系统对需求的满足程度。文献[6]分析了卫星的平台、载荷、数传等属性,通过仿真计算空间信息服务系统对部分典型任务的完成能力,这种方法主要解决了少数几颗卫星在特定条件下的能力评价问题,对面向多类型任务请求的空间信息数据处理系统效能评价缺乏整体性手段。排队网络作为分析评价系统性能的主要方法之一,具有求解相对简单、费用低等优点,被广泛应用于系统效能评估领域。文献[7-8]建立排队网络模型,分析了空间信息服务系统支持导弹作战、装甲部队

侦察系统的效能。文献[9-13]通过排队网络模型对计算机网络资源性能进行了分析和评估。

本文针对空间信息共享与应用系统实时任务需求,对空间信息数据处理模式进行了归纳分析,构建了包括系统响应时间、服务时间、服务率以及资源利用率的评估指标体系,基于有限等待的多级排队网络建立了系统效能评估模型。

1 问题描述

空间信息数据包括可见光、红外、多光谱、高光谱、超光谱、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、电子侦察等多种类型,各类信息数据具有相应的时空属性,由于不同类型的空间信息数据的特点、作用以及处理流程的差异,信息数据处理模式不尽相同,但是,总体上可以归纳为数据预处理和数据专业处理两个阶段^[14],如图1所示。

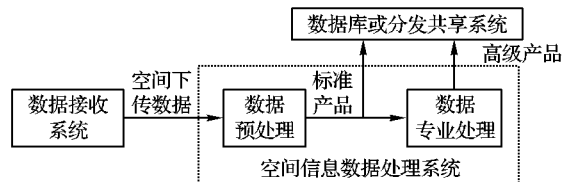


图1 空间信息数据处理系统

用户对空间信息数据的需求既包括高级产品,也包括标准产品,因此经过数据预处理生成的标准产品:一部分接受专业处理服务;另一部分直接进入数据库或者分发共享系统,反

收稿日期:2011-08-15;修回日期:2011-12-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61104180);国家863计划项目(2008AA7070412)。

作者简介:王建江(1986-),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要研究方向:作战模型与模拟、卫星应用效能分析;邱涤珊(1957-),男,湖南南县人,教授,博士生导师,主要研究方向:作战模型与模拟、卫星军事应用、组合优化;彭黎(1985-),女,江苏常州人,博士研究生,主要研究方向:作战模型与模拟、卫星应用效能分析。

馈给用户。同时,由于面向的是实时任务需求,因此数据具有有效期限制,一旦等待处理的数据超过其有效期,将直接被系统删除,不再接受处理^[15]。

2 系统效能指标体系

空间信息数据处理系统核心评价指标体系能够为系统效能综合评价提供一个公共度量空间。本文从满足用户实时任务需求出发,建立了一种简化的数据处理系统核心指标体系,如图2所示。

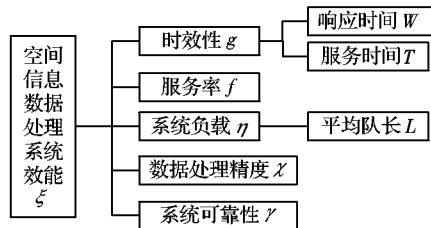


图2 空间信息数据处理系统效能指标体系

图2中:数据处理精度与系统可靠性是空间信息数据处理系统固有指标,可由专家打分等方法得到;时效性等指标可以通过本文建立的多级排队网络评估模型求解得到。

3 排队网络评估模型

为便于对空间信息数据处理系统效能建模评估,本文作如下假设:

- 1) 空间下传的原始数据以兆字节(MB)为单位进入处理系统,并且数据到达服从参数为 λ 的泊松过程,即到达时间间隔服从参数为 λ 的指数分布。
- 2) 系统中存在多个预处理单元和专业处理单元。每个处理单元可看作一个服务台,预处理单元服务时间服从参数为 μ_1 的指数分布,专业处理单元服务时间服从参数为 μ_2 的指数分布^[14]。
- 3) 标准产品以一定概率 p 选择接受专业处理服务,以概率 $1-p$ 选择离开系统。
- 4) 数据存在有效期限制,超过其有效期的数据直接离开系统,不再接受服务^[15]。
- 5) 系统不存在缓冲区限制,所有到达且有效的数据均进入系统。

本文假设的合理性在于:泊松过程作为最简流,在任意服务系统中服务效率最低,可以作为数据服从一般到达过程的系统服务效能下限,具有重要意义^[16]。

3.1 模型描述

本文将每个数据处理单元看作一个服务台,因此,数据预处理和专业处理均可看作一个多服务台排队系统,构成了如图3所示的两级开环排队网络。

该排队网络是一个串联系统,空间下传数据到达服从参数为 λ 的泊松过程,标准产品离开数据预处理系统同样是服从参数为 λf_1 的泊松过程,其中 f_1 为预处理系统服务率。标准产品以概率 P 进入数据专业处理系统,因此,标准产品到达数据专业处理系统是服从参数为 $\lambda f_1 P$ 的泊松过程。因此预处理系统和专业处理系统可以统一描述为 $M/M/k/\infty/\infty$ 排队系统,系统排队规则为有限等待,服务规则为先到先服务,服务机构为多服务台单队列,顾客到达率分别为 λ 和 $\lambda f_1 P$,服务率分别为 μ_1 和 μ_2 。数据在系统内总的滞留时间的平均值为 t ,则在预处理系统中没有得到服务而离开系统的平均数据量为

$\nu_1 = 1/t$,在专业处理系统中没有得到服务而离开系统的平均数据量为 $\nu_2 = 1/(t - W_1 - T_1)$,其中 W_1 为预处理系统平均响应时间,即数据平均等待时间, T_1 为预处理系统数据平均服务时间。

设预处理服务系统平均数据量为 L_1 ,专业处理系统平均数据量为 L_2 ,平均响应时间为 W_2 ,平均服务时间为 T_2 。由串联系统的独立性可知, L_1 与 L_2 、 W_1 与 W_2 、 T_1 与 T_2 均相互独立,因此本文对预处理服务系统和专业处理服务系统分别进行求解。

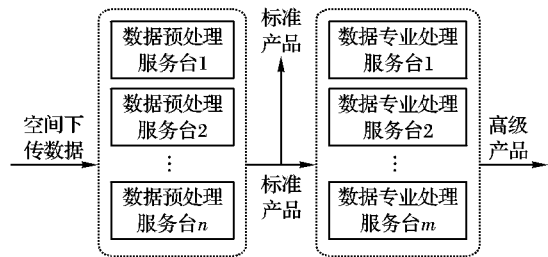


图3 开环多服务器排队网络

3.2 预处理服务系统

系统服务状态转移如图4所示。

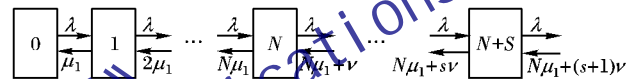


图4 预处理系统服务状态转移

建立稳态平衡方程:

$$\begin{cases} P_0 \lambda = P_1 \mu_1, & K = 0 \\ P_K (\lambda + K \mu_1) = P_{K-1} \lambda + P_{K+1} (K+1) \mu_1, & 0 < K < N \\ P_K (\lambda + N \mu_1 + (K-N) \nu) = P_{K-1} \lambda + P_{K+1} (N \mu_1 + (K-N+1) \nu), & K \geq N \end{cases}$$

求解稳态平衡方程可得:

$$P_K = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu_1)^K}{K!} \cdot \frac{\sum_{m=0}^N \frac{(\lambda/\mu_1)^m}{m!} + \frac{(\lambda/\mu_1)^N}{N!} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(\lambda/\mu_1)^s}{\prod_{m=1}^s (N+m\lambda/\nu_1)}}, & K \leq N \\ \frac{(\lambda/\mu_1)^K}{N! \prod_{m=1}^{K-N} (N+m\lambda/\nu_1)}, & K > N \end{cases} \quad (1)$$

预处理系统平均数据量:

$$L_1 = \sum_{K=0}^{\infty} K P_K \quad (2)$$

数据平均响应时间为:

$$W_1 = L_1 / \lambda \quad (3)$$

数据平均服务时间为:

$$T_1 = 1/\mu_1 \quad (4)$$

预处理系统服务概率:

$$f_1 = 1 - \frac{\nu_1}{\mu_1} \sum_{K=N+1}^{\infty} (K-N)P_K \quad (5)$$

预处理系统负载系数:

$$\eta_1 = \frac{\sum_{K=1}^N KP_K + \sum_{K=N+1}^{\infty} NP_{K-N}}{N} \quad (6)$$

$$Q_K = \begin{cases} \frac{(\lambda f_1 P / \mu_2)^K}{K!} + \frac{(\lambda f_1 P / \mu_2)^M}{M!} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(\lambda f_1 P / \mu_2)^s}{\prod_{m=1}^s (M + m\lambda f_1 P / \nu_2)}, & K \leq M \\ \frac{(\lambda f_1 P / \mu_2)^K}{M! \sum_{m=1}^{K-M} (M + m\lambda f_1 P / \nu_2)}, & K > M \end{cases} \quad (7)$$

专业处理系统平均数据量为:

$$L_2 = \sum_{K=0}^{\infty} KQ_K \quad (8)$$

数据平均响应时间为:

$$W_2 = L_2 / \lambda f_1 P \quad (9)$$

数据平均服务时间为:

$$T_2 = 1/\mu_2 \quad (10)$$

专业处理系统服务概率:

$$f_2 = 1 - \frac{\nu_2}{\mu_2} \sum_{K=M+1}^{\infty} (K-M)Q_K \quad (11)$$

专业处理系统负载系数:

$$\eta_2 = \frac{\sum_{K=1}^M KQ_K + \sum_{K=M+1}^{\infty} MP_{K-M}}{M} \quad (12)$$

3.4 系统效能评估核心指标

1) 时效性 g :

$$W = PW_1 + (1-P)(W_1 + W_2)$$

$$T = PT_1 + (1-P)(T_1 + T_2)$$

$$g = 1 - \frac{W + T}{t} \quad (13)$$

其中: g 越大, 表示数据总处理时间越小, 即时效性越好。

2) 系统服务率:

$$f = Pf_1 + (1-P)f_1 f_2 \quad (14)$$

3) 系统负载系数:

$$\eta = (N\eta_1 + M\eta_2) / (N + M) \quad (15)$$

系统负载系数越大, 表明系统资源利用率越高, 系统效能越高。

3.3 专业处理服务系统

数据专业处理服务系统是一个具有 M 个服务台的排队系统, 其数据到达服从参数为 $\lambda f_1 P$ 的泊松过程, 单服务台服务时间服从参数为 μ_2 的指数分布。与 3.2 节类似, 通过建立系统状态转移图及稳态平衡方程, 可以得到:

4) 系统总体效能:

$$\xi = g \cdot f \cdot \eta \cdot \chi \cdot \gamma \quad (16)$$

由于系统总体效能对于时效性、服务率、负载系数均是递增函数, 所以 ξ 越大, 表明系统效能越高。

4 实验分析

例 1 某个空间信息数据处理系统包含 5 个预处理单元和 3 个专业处理单元, 已知数据到达为泊松过程, 到达率为 3 MB/min, 单个预处理服务单元服务率为 1 MB/min, 单个专业处理服务单元服务率为 0.8 MB/min, 数据平均滞留时间为 2 min。经过预处理后生成的标准产品以 0.6 的概率进入专业处理服务系统, 以 0.4 的概率离开系统。系统数据处理精度评价值为 1, 系统可靠性为 0.8。

解 由题意可知, $N = 5, M = 3, \lambda = 3 \text{ MB/min}, \mu_1 = 1 \text{ MB/min}, \mu_2 = 0.8 \text{ MB/min}, \nu = 0.5, P = 0.6, \chi = 1, \gamma = 0.8$ 。代入模型求解得:

$$L_1 = 0.185 \text{ MB}, W_1 = 0.062 \text{ min}, T_1 = 1 \text{ min}, f_1 = 0.969, \eta_1 = 0.586。$$

$$L_2 = 0.284 \text{ MB}, W_2 = 0.158 \text{ min}, T_2 = 1.25 \text{ min}, f_2 = 0.857, \eta_2 = 0.637。$$

$$g = 0.1874, f = 0.914, \eta = 0.605。$$

因此, 系统总体效能 $\xi = 0.083$ 。

表 1 描述了当处理单元数目发生变化时, 对各项指标的影响。随着数据预处理单元或专业处理单元数目增加, 系统时效性增强, 服务概率增大, 系统负载系数减小, 使得系统整体效能得到提高。

表 1 服务台数目对处理系统效能的影响

服务台数 N	$M = 3$				$M = 4$				$M = 5$			
	g	f	η	ξ	g	f	η	ξ	g	f	η	ξ
4	0.1274	0.887	0.654	0.059	0.1566	0.909	0.622	0.071	0.1722	0.931	0.601	0.077
5	0.1874	0.914	0.605	0.083	0.2104	0.942	0.586	0.093	0.2368	0.972	0.562	0.103
6	0.2136	0.947	0.572	0.093	0.2435	0.965	0.559	0.105	0.2724	0.986	0.543	0.117

5 讨论

本文中空间信息数据处理系统效能评估方法是在数据到达服从泊松过程, 数据处理时间服从指数分布等一系列假设

基础上提出的, 具有一定局限性。下面针对本文假设以外的情况进行初步的探讨:

1) 本文假设数据到达服从泊松过程, 如果到达过程服从一般分布, 则可以建立 $G/M/k/\infty/\infty$ 多级排队网络模型。

2) 本文假设数据处理服务时间服从指数分布,如果服务时间服从一般分布,则可建立 $M/G/k/\infty/\infty$ 排队系统模型。

3) 本文假设数据存在有效期限限制,建立了有限等待的排队网络模型;如果数据有效期不存在,则可建立无限等待的排队网络模型。

4) 本文假设系统不存在缓冲区限制,即队长无限。如果队长有限,则建立 $M/M/k/N/\infty$ 排队网络模型。

6 结语

本文针对空间信息数据处理系统效能评估展开研究,首先分析了系统效能评估的核心指标体系,基于排队网络理论,建立了效能评估模型-两级多服务台排队网络服务模型,提出了模型求解方法,结合算例验证了方法的正确性和有效性。由于方法相对其他方法具有简单、省时、费用低的特点,因此具有很强的实用价值。

参考文献:

- [1] 安雪滢,赵勇,杨乐平,等. 基于模糊理论的卫星系统效能评估仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2334-2337.
- [2] 冯书兴. 卫星系统综合效能分析研究[J]. 控制与决策, 2003, 11(6): 740-743.
- [3] 陈浩光,秦大国,李云芝. 军用卫星系统效能评估的基本原则与方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2001, 12(2): 27-30.
- [4] FEUERSTEIN P, ERIC P H, MATTHEW L G, et al. Generalized representation of space-based platform for various orbit type [C]// Advanced Simulation Technologies Conference — Military, Government, and Aerospace Simulation Symposium (ASTC-MGA). Crystal City, Virginia: The Society for Modeling and Simulation International, 2004.

- [5] 刘华翔,黄俊,朱荣昌. 综合航空武器平台作战效能评估综述[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 55-61.
- [6] 郭玉华. 多类型对地观测卫星联合任务规划关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [7] 丁洪波,张士峰,胡正东. 支持作战的天基信息系统效能分析的排队论模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(4): 79-82.
- [8] 刘亮亮,狄东记,李华. 空间信息支援下装甲部队侦察系统作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(2): 23-27.
- [9] ANDREW L L H, HANLY S V, MUKHTAR R G. Active queue management for fair resource allocation in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 220-247.
- [10] DOVROLIS C, STILIADIS D, RAMANATHAN P. Proportional differentiated services delay differentiation and packet scheduling [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(1): 12-26.
- [11] 张正,刘景泰,王鸿鹏. 基于排队网络的服务器性能分析与优化[J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3148-3152.
- [12] 张英,赵莉茹,谷新亮. 基于排队网络的多业务网络资源分析方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2425-2431.
- [13] 谢广军,刘军,王刚,等. 基于多类顾客排队网络的 Exp-RAID 系统性能评价模型[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(2): 207-211.
- [14] 文江平. 卫星军事应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 12-15.
- [15] HAN S M, BEAK S W, CHO K R, et al. Satellite mission scheduling using gGenetic algorithm [C]// International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 1226-1230.
- [16] 来斌,牛存良,熊友奇. 防空作战模拟与效能评估[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005: 76-78.

(上接第869页)

BCH(31,21)译码过程为20 ns左右。文献[16]采用串行与并行相结合的方式实现 BCH(15,11)译码,纠正一位错,在XC3S400上实现时间为73 ns。

根据第2章的分析可知,译码过程的所有运算都可以由逻辑门用组合逻辑形式实现,表2列出了两种数据长度情况下FPGA的资源使用情况。

表2 两种译码器使用资源

逻辑资源类别	BCH(15,7) 译码器使用量	BCH(31,21) 译码器使用量
4 输入查找表 (LUT; Look-Up Table)	143	333
基本逻辑单元(slice)	77	170
输入输出单元	34	66

4 结语

本设计中完全采用并行结构,数据是并行输入并行输出,不需要时钟进行同步,运算延迟时间仅为少量级数逻辑门的传输时间,运算速度快,适用于工作频率比较高的场合。

结合有限域变换的特性,对有限域的乘法做变换,采用异或门实现乘法运算,减少硬件复杂度。在钱搜索过程中,结合仿射多项式与格雷码,使用并行扩展的钱搜索方法,根据第一步先计算的一部分错误位置多项式,再使用少量异或门得到剩下的大部分错误位置多项式,分两步计算可以减少系统占用资源。仿真结果表明,此种译码方法具有运算速度快、占用资源少等优点。

参考文献:

- [1] 金婕,于敦山. 高速并行 BCH 译码器的 VLSI 设计[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(2): 233-237.
- [2] 孙怡,田上力. BCH 码译码器的 FPGA 实现[J]. 电路与系统, 2000, 5(4): 98-100.
- [3] 沈连丰. 信息论与编码[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 赵华,殷奎喜. (15,7) BCH 编译码器的 VHDL 设计[J]. 现代电子技术, 2004(20): 100-101.
- [5] 张亮,王志功,胡庆生. 并行 BCH 伴随式计算电路的优化[J]. 信号处理, 2010, 26(3): 458-461.
- [6] ZHANG BOTAO, LIU DONGPEI, WANG SHIXIAN, et al. Design and implementation of area-efficient DVB-S2 BCH decoder [C]// Proceedings of the Second International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 179-184.
- [7] KRISTIAN H, WAHYONO H. Ultra - fast - scalable BCH decoder with efficient-extended fast Chien search [C]// Proceedings of the third IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 338-343.
- [8] LIN T C, TRUONG T K, CHEN P D. A fast algorithm for the syndrome calculation in algebraic decoding of Reed-Solomon codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(12): 2240-2244.
- [9] FEDORENKO S V, TRIFONOV P V. Find roots of polynomials over finite field [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(11): 1709-1711.
- [10] GHEORGHE S, CONSTANTIN A. An implementation of BCH codes in a FPGA [C]// 2010 International Conference on Applied Electronics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1-4.