

星座卫星通信系统资源动态平衡模型的研究

朱李礼^{1,2} 吴礼发³ 端义锋³

(解放军理工大学指挥自动化学院研二队 南京 210007)¹ (重庆通信学院训练部 重庆 400035)²

(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)³

摘要 资源动态平衡在星座卫星通信系统中具有重要的作用。针对目前星座卫星通信系统中影响资源平衡的因素,将宏观经济理论原理应用到资源平衡调配领域。从通信任务满足度出发,提出了基于虚拟工厂的资源动态平衡模型,详细阐述了模型中的3C评估指标体系,并以铱系统为例进行评估,验证了3C评估的可行性和有效性。通过模型的构建与求解,得出了星座卫星通信系统内、外部环境、用户需求及资源使用释放随时间推移和空间转换发生改变的关联关系,以及整个星座卫星通信系统达到帕累托最优的具体条件。资源动态平衡问题的研究,为解决星座卫星通信系统中的资源调配问题奠定了基础。

关键词 星座卫星,资源动态平衡,虚拟工厂,帕累托最优

中图法分类号 TP3-0 **文献标识码** A

Research on Model of Resource Homeostasis in Constellation Satellite Communication System

ZHU Li-li^{1,2} WU Li-fa³ DUAN Yi-feng³

(Postgraduate Team 2 ICA, PLAUST, Nanjing 210007, China)¹

(Department of Education, CQCU, Chongqing 400035, China)²

(Institute of Command Automation, PLAUST, Nanjing 210007, China)³

Abstract Resource homeostasis is very important in constellation satellite communication system. In order to fulfill the communication task efficiently, macroscopical economic theory was applied to resource homeostasis. A resource homeostasis mathematic model based on dummy factory was presented, and capability evaluation system, consummation evaluation system and cost evaluation system were discussed in detail to improve the effectiveness of resource usage evaluation, whose feasibility and validity were proved with the sample of the evaluation of Iridium. By building and solving the resource homeostasis model, relationship between inner and exterior circumstances of the system, users' requirements, resource usage and time and space was obtained, and the requirements to reach pareto optimality were also gained. Research on the resource homeostasis lays the foundation for solving resource allocation problem in constellation satellite communication system.

Keywords Constellation satellite, Resource homeostasis, Dummy factory, Pareto optimality

1 引言

星座卫星通信系统是指利用一组卫星构成的星座作为中继结点来实现通信的一种卫星移动通信系统,从逻辑上可以分为空间段、用户段和地面段3个部分。星座卫星通信具有轨道多样化及抗摧毁性强、发射机动灵活、卫星便于补充、终端多样化及顽存性强、通信时延短、频率利用率高、通信容量大和全球覆盖等特点,在现代信息化战争中能发挥巨大的作用,如铱系统(Iridium)、轨道通信(Orbcomm)系统和全球星(Globalstar)。图1是目前比较典型的一种星座卫星通信系统的体系结构^[1]。

资源动态平衡在星座卫星通信系统中起着重要作用,它是指星座卫星资源的供给总量和通信任务的需求总量在彼此

增减的动态过程中保持平衡。星座卫星资源的每次减少量与部分通信任务完成后释放出的占用资源在总量上与通信需求保持平衡,即星座卫星资源的占用与释放的动态平衡。其实质就是在全球范围内实现星座卫星资源的总供给与通信任务的总需求保持一致,保证供需平衡,实现星座卫星通信系统的协调发展,最终目标就是提供更优质的通信服务。当星座卫星通信系统性能下降、发生故障或突发事件时,系统应及时地、有针对性地调整系统资源平衡,来缓解由此带来的服务质量下降,例如调整转发器的工作状态、频率分配和波束覆盖范围来满足通信需求或精简通信任务,缓解资源压力。与单一轨道卫星通信系统相比,星座卫星通信系统结构和组成复杂,对整个系统中的资源平衡提出了更高的要求。为此,本文提出动态资源平衡模型,使得资源平衡涉及到空间段、地面段及

到稿日期:2011-06-09 返修日期:2011-08-18

朱李礼(1980—),男,博士生,主要研究方向为网络管理,E-mail:zhulili1980@163.com;吴礼发(1968—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络管理、网络安全;端义锋(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、动态规划。

用户段的各个部分,并运用各种已经存在的资源调配工具共同工作,在卫星资源与通信任务之间寻找函数关系,量化实际问题,从中找出符合帕累托最优的评判标准的动态平衡点,并反馈于实际问题,有效地调配卫星资源,满足通信任务;同时将3C评估指标体系应用于动态资源平衡模型中,对模型的合理性进行全面的效能评估。

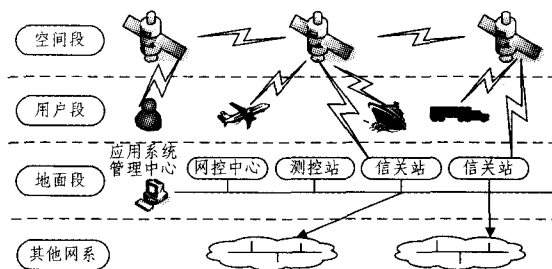


图1 一种星座卫星通信系统的体系结构

本文第2节分析了影响星座卫星通信系统资源平衡的问题;第3节描述了星座卫星通信系统资源动态平衡模型的建立过程并给出了求解步骤;第4节建立星座卫星通信系统资源动态平衡模型评估体系并给出了评估步骤;最后总结全文并指出下一步研究方向。

2 星座卫星通信系统资源平衡问题分析

文献[2,3]可知,星座卫星通信系统资源平衡具有以下3个方面的含义:

(1)总体平衡。通信任务对星座卫星资源的需求量与星座卫星资源供给总量保持平衡。

(2)结构平衡。星座卫星资源总量增减基本保持平衡,保证整个星座卫星通信系统天地结构平衡。

(3)时间和空间平衡。由于星座卫星资源在一定时间和空间内所能够接受的通信任务需求量是有限且相对稳定的,因此星座卫星资源和通信任务需求在一定的时间和空间上保持相对平衡。

当星座卫星通信系统所提供的通信保障服务不能满足通信任务需求时,可以调整星座卫星资源平衡,来改善用户的通信服务质量。影响系统资源平衡的因素包括4种情况^[2,3]:

(1)局部系统资源发生故障

当局部系统资源发生故障时,会导致系统在局部区域,甚至在全局区域内资源失衡,致使通信保障能力下降。

(2)局部资源不足

用户聚集在某一特定区域会导致该区域内的通信资源不足,从而影响资源平衡,导致用户通信服务质量的不足。

(3)特殊通信保障任务

星座卫星通信系统能够通过调整系统资源平衡来保障一些通信任务的特殊需求,例如南极考察、矿产勘探等目标活动区域明确的社会活动。

(4)社会与经济发展因素

社会与经济发展对资源平衡的影响主要在两方面:一方面是综合国力的增强需增加投入而形成资源失衡;另一方面是科学技术的发展,促使通信任务对资源数量及质量的要求提高,从而改变资源平衡。

宏观上看,一个星座卫星通信系统模型由4个部分组成:

星座卫星、总控中心、地面信关站与通信任务^[4]。软硬件设备和通信网络是构成星座卫星通信系统的基本元素,是调节系统资源平衡的基本前提。设备资源平衡的调节主要包括设备类型、设备信息的读取和控制方法、可能出现的设备故障以及产生故障的原因和排除故障的方法等。例如,空间段包括星座位置参数、转发器工作状态、星际链路设备的状态和链路配置参数等;地面段包括信关站中通信链路设备、网间接口设备、天线分系统设备、交换分系统设备、控制分系统设备和消息分系统设备等;用户段包括通信参数配置和复杂终端(如多模终端、机载终端、舰载终端和潜艇终端)的通信链路设备等。

由于星座网络拓扑结构的持续变化、相互连接的信关站构成的分布式控制结构以及星际链路和地面链路构成的路由方案的复杂性^[5],因此网络资源平衡调节的研究重点应包括星座拓扑动态变化条件下网络的组织运用和网络资源的调节、星座卫星通信路由策略的管理和网络资源的性能指标体系等。

星座卫星通信系统资源动态平衡问题主要研究的是资源需求和之间的平衡。为了突出重点,简化模型,建模过程中可以忽略总控中心和地面信关站等中间结点,将整个系统看成星座卫星和通信任务两者的直接交互。星座卫星寻求的目标是卫星效用的最大化,即资源调配最优化;通信任务的目标则是占用资源的最大化。要达到卫星资源供给与通信任务需求综合体的平衡,就必须解决效用最大化和占用最大化的问题,找到它们之间的平衡点,使星座卫星与通信任务之间协调发展。

星座卫星通信系统资源动态平衡要求具有可靠的稳定性和良好的扩展性,适应多种应用和需求。除此之外,还可以运用各种已经存在的资源调配工具共同工作,灵活架构各种资源平衡模型和结构,有效地调配资源和处理通信请求。星座卫星资源包括卫星与卫星资源两部分,通信任务分为常规任务和特殊任务。为了简化模型,使建模过程清晰化,在此提出虚拟工厂的概念。虚拟工厂的含义就是把星座卫星资源调配给通信任务使用,当某个通信任务结束时,将释放出的星座卫星资源看成是由生产资源的虚拟工厂生产出来的。简言之,将被占用过的星座卫星资源当成消耗品,被释放的星座卫星资源看成是由虚拟工厂生产出来的新资源。以虚拟工厂为平台建立动态平衡模型,可以突出星座卫星与通信任务两个对象,对寻求平衡点能够起到事半功倍的作用。

3 星座卫星通信系统资源动态平衡模型的建立与求解

凯恩斯宏观经济理论中指出,两大市场的商品价格和劳动力薪酬水平在短期内都是固定的^[6]。将这原理运用到星座卫星通信系统资源动态平衡模型中,可以认为在一定时间和空间内星座卫星总数量一定,通信任务的总需求量一定。即使某颗卫星出现故障或添加一颗卫星或有突发通信任务,都可看成短期内的固定,对模型的建立和求解没有影响。此外,通信任务完全服从卫星资源的调配。这些都是建立模型的基础。

以往对于资源动态平衡模型的构建,就是将动态平衡的概念应用到静态模型之中,这仍然是一种单向的过程描述,并

没有阐述和分析动态平衡本身的机理。为了有效、深入地剖析星座卫星通信系统资源动态平衡的循环过程及其相应内、外部关系,在此提出一种资源动态平衡模型,如图2所示。

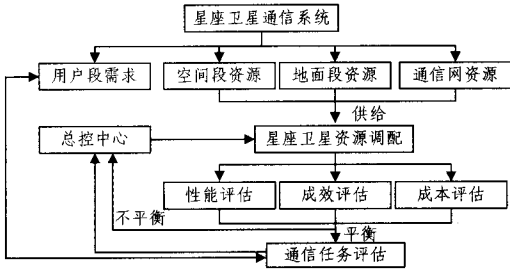


图2 资源动态平衡模型结构图

在时间、空间纬度上,星座卫星通信系统的外部环境、内部元素都会发生变化,用户需求变动及资源使用释放也会随着时间的推移和空间转换而发生改变。

凯恩斯宏观经济理论中的供需理论又表明,市场经济中,当产品供给量与产品需求量相等时,产品的供需达到平衡^[6]。同理,星座卫星通信系统中,在一定时间和空间内,当所有通信任务的卫星资源需求量等于具有通信保障能力且可以调配的卫星资源供给量时,星座卫星资源供给达到平衡。然而在追求平衡的过程中,最重要的影响因素是星座卫星资源的平均消耗速度和平均生产速度。星座卫星资源的供给速度越快,通信任务的需求就越容易满足。当星座卫星资源的供给速度变慢时,星座卫星通信系统会采用一些替代手段缓解通信任务的需求量(例如,增加资源生产速度或使用备星资源)。由此可见,星座卫星资源的平均消耗速度与通信任务需求量之间存在线性函数关系:

$$D_m = m - nV_c \quad (1)$$

式中, D_m 表示通信任务的总需求量; V_c 表示星座卫星资源的平均消耗速度; m, n 均为大于0的常数。

同时,在星座卫星通信系统中,当星座卫星资源供不应求时,系统只有提高资源的生产速度。当供过于求时,资源的消耗速度变慢,其生产速度也会相应变慢。因此,星座卫星资源供给量与资源平均生产速度也存在线性函数关系:

$$S_r = c + dV_m \quad (2)$$

式中, S_r 表示卫星资源的总供给量; V_m 表示星座卫星资源的平均生产速度; c, d 均为大于0的常数,且 $c \leq m$ 。

根据前面的分析,在星座卫星资源和通信任务需求可变的条件下,建立卫星及卫星资源在虚拟工厂中的生产函数以及通信任务需求函数如下:

通信任务结束后,占用的卫星资源被释放出来,这部分资源被看成是由虚拟工厂生产出来的,用 M_r 表示:

$$\begin{cases} M_r = F(R_A, \alpha A, \beta B) \\ 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

上式即为卫星资源的生产函数。式中, A 表示卫星资源数量; R_A 表示卫星资源存量; B 表示卫星数量; α 表示通信任务占用卫星资源的比例; β 表示通信任务占用卫星的比例。

通信任务是占用的某颗卫星上的卫星资源。通信任务结束后,卫星资源被释放出来,有可能整颗卫星也被释放出来,所以卫星也被看成是由虚拟工厂生产出来的,用 N_s 表示:

$$\begin{cases} N_s = F(R_B, \alpha A, \beta B) \\ 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

上式即为卫星的生产函数。式中, R_B 表示卫星存量。

星座卫星资源的消耗和生产是连续的,因此这里的 α 和 β 理解为瞬时占用比,则

$$\begin{cases} \alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{A(t+\Delta t) - A(t)}{A(t) \cdot \Delta t} \\ \beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{B(t+\Delta t) - B(t)}{B(t) \cdot \Delta t} \end{cases} \quad (5)$$

通信任务需求函数为

$$\begin{cases} L_m = F(R_A, (1-\alpha)A, (1-\beta)B) \\ 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

星座卫星通信系统可以根据通信任务的类型选择需求函数的形式,通常采用线性函数、指数函数、对数函数或跳跃函数等,如图3所示。

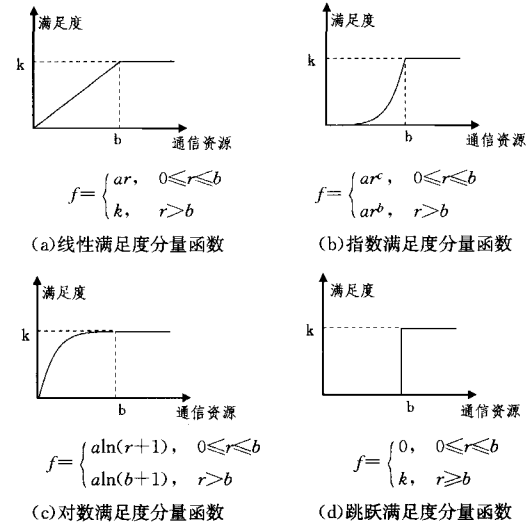


图3 通信任务需求函数形式

要使星座卫星资源的释放与通信任务的需求保持动态的一致性,则需进行下一步:

$$\begin{cases} S = \alpha A \cdot \theta_A \cdot s(R_A, \beta B) \\ P = \alpha A \cdot \varphi_B \cdot p(R_A, \beta B) \\ L = (1-\alpha)A \cdot \lambda \cdot l(R_A, (1-\beta)B) \\ \alpha A = V_c t \\ (1-\alpha)A = V_m t \\ 0 \leq \theta_X, \varphi_X, \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, s, p, l 是 M_r, N_s, L_m 具有相同层次的密度函数,同时 φ_X, θ_X 分别为卫星和卫星资源在虚拟工厂中的产出率, λ 是通信任务需求满足度,并且有 $X = \{A, B, R_A, R_B\}, u = \theta_{R_A} + \theta_{R_B} + \lambda, v = \varphi_{R_A} + \varphi_{R_B} + \lambda$ 。资源动态平衡中心点需满足关系式:

$$\frac{1-u}{1-v} = \frac{\theta_A + \varphi_B}{\lambda} \quad (8)$$

即虚拟工厂中由内在要素(R_A, R_B)决定的卫星资源、卫星的产出率之和与偏离通信任务需求满足度的差的比值(式(8)的左边)同外在要素(A, B)生产卫星资源、卫星的产出率之和与通信任务需求满足度的比值(式(8)的右边)是相等的。星座卫星通信系统是一种典型的分布式系统,资源处于动态环境中,必然会遇到通信任务的增删和资源的调整^[7]。基于上述条件,文献[8,9]采用如下迭代算法来求解:

(1)接收用户端需求 L_m 的资源申请,同时总控中心给出资源需求底限,即通信任务需求满足度 λ 以及虚拟工厂生产能力 M_r 和 N_s ;

(2)按照先接受先满足的原则,确定 t 时间段内总需求 D_m 的资源申请,确保不超出虚拟工厂生产能力 M_r 和 N_s ;

(3)设定当前资源存量(R_A, R_B)作为初始值,确定星座卫星资源的平均生产速度初值 V_i 和迭代中止参数 ε ;

(4)接收通信任务评估返回的、在平均生产速度初值 V_i 下的最优资源需求量 Q_M ,计算超额需求 Z_i ($Z_i = \max(|Q_M - M_r|, |Q_M - N_s|)$);

(5)如果 $Z_i \leq \varepsilon$,那么当前的 V_i 就是生产速度,按照当前最优资源需求量调配资源,该次资源调配结束,返回(1);

(6)如果 $Z_i > \varepsilon$,调整 V_i 为 φ_X, θ_X ,分别计算虚拟工厂生产能力 M_r 和 N_s ,返回(4);

(7)如果 D_m 全部满足,计算式(8)是否满足,如果不满足,则调整 φ_X 和 θ_X ,返回(4);如果满足,则得到星座卫星资源通信系统中资源动态平衡中心点,其解为

$$M_{\text{E}} = N_{\text{E}} = L_{\text{mE}} = \frac{\lambda}{1-v} = \frac{\theta_A + \varphi_B}{1-u} \quad (9)$$

宏观分析中将通信任务作为一个整体来看待,与微观分析中把通信任务看成是单个行为主体的原理是相通的。正如各单个卫星的资源均衡供给量可以加总成整个星座卫星的资源供给量一样,各通信任务的需求量也可以加总成整个社会的通信任务需求量。实际上,总供给量和总需求量是微观领域内无数资源供给量和任务需求量在宏观层面上的综合反映。而且,在现实星座卫星通信系统运行中,总的供给量和需求量的形成也必然与单体的供给量和需求量的形成相一致。由此而知,从宏观层面上进行星座卫星通信系统资源动态平衡模型的分析是合理可行的,得出的结论也是可靠的。

从上面模型均衡解的结果看出,星座卫星通信系统的高效率在一般情况下不是由技术参数来决定的,而是由虚拟工厂中内外在要素的产出率决定的。这充分表明,在全球范围内星座卫星资源达到平衡时,虚拟工厂内不存在瓶颈,整个系统符合帕累托最优(也称为帕累托效率,资源分配的一种状态,指在不使任何人境况变坏的情况下,也不可能再使某些人的处境变好^[10])的标准。按照帕累托最优标准,星座卫星资源通信系统中的帕累托最优应该是星座卫星和通信任务两个对象所拥有的任意两个单体(单颗卫星上的某种卫星资源和单项通信任务)之间的满足率相等。当式(9)满足时,星座卫星资源通信系统已经不可能通过改变卫星资源的调配使某项通信任务的效用增加,同时又不使其他通信任务的效用减少,从而达到帕累托最优。

4 模型评估体系的建立

建立科学有效的评估指标体系,是星座卫星通信系统资源动态平衡模型中的重要一环。评估指标体系可以论证资源平衡程度,为比较选择备选调配方案提供依据,为调整资源平衡提供决策信息。在此将 3C 评估指标体系应用于资源动态平衡模型,即由性能评估系统(capability evaluation system)、成效评估系统(consummation evaluation system)和成本评估系统(cost evaluation system)为核心内容构成的评估体系。

它们之间的关系是:根据星座卫星通信系统内资源特点和战略目标进行性能评估,明确所有资源各自的职责及性能;根据资源的性能评估结果,设计资源的成效考核方案,并用这些考核方案考核系统内所有资源;根据成效考核结果,计算资源成本及其设计配置管理方案。

4.1 成效评估指标体系

成效评估指标体系的建立是一个反复深入的过程,设计的过程如图 4 所示^[11]。

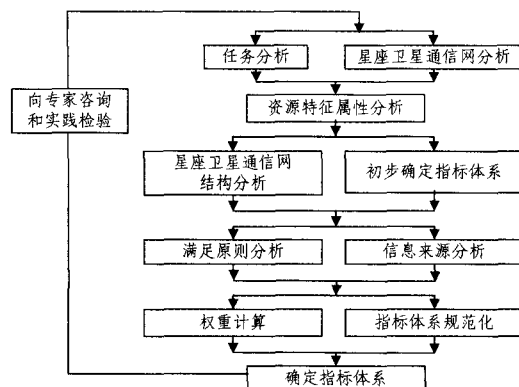


图4 成效评估指标体系建立过程

具体过程包括:

①任务分析。在充分考虑星座卫星通信系统特点与任务需求的基础上,提出评估指标:有效性、抗干扰性、抗摧毁性、安全性、覆盖率、接入速率、畅通率、时延、成功率、通信范围、传输质量、失话率和误码率等。

②资源特征属性分析。弄清各指标的本质属性(定性定量、静态动态、取值范围等),为建立数学模型、获取评估数据奠定基础。

③星座卫星通信网结构分析。根据系统结构分析,确定指标体系的层次结构,分析影响成效指标的参数(覆盖、接入、通信质量和系统保障等)。

④满足原则分析。指标体系的设计要依据系统成效评估的基本原则。

⑤信息来源分析。指标信息的来源包括以下几种:直接给定经验值或典型值、统计分析、专家咨询、仿真或测量,为权重计算建立基础。

⑥权重计算。指标权重反映了某一指标在指标体系中所起作用的大小,是指标对总目标的贡献程度^[11]。因此,指标权重是否反映实际情况及其是否合理,是关系到成效评估结果是否科学合理的重要因素之一。权重计算的方法较多,如客观赋权法(利用客观信息赋权)、主观赋权法(由赋权者根据经验及对各属性的重视程度进行赋权)、组合赋权法(综合主、客观赋权法)和交互式赋权法(对赋权过程不断进行调整和修改)等^[11]。

⑦指标体系规范化。指标规范化是指标间相互比较的基础,是成效评估的前提。指标规范化包括指标类型一致化和指标无量纲两项工作。

⑧形成初步的成效评估指标体系。完成上述各项工作,可以形成一个初步的、可供实际操作的成效评估指标体系。将其通过专家咨询和实践检验后反馈给系统,如此反复形成最终的成效评估指标体系。

4.2 性能评估指标体系

建立性能评估指标体系的一般过程如图 5 所示^[12-14]。

文献[15,16]建立性能评估指标体系的具体过程包括：

①系统分析、任务需求分析。分析星座卫星通信系统，细分子系统结构，获得系统参数相关数据；分析通信任务，得出需求。

②建立性能评估指标体系。性能指标体系既要符合星座卫星通信系统特点，满足任务需求，也要注意与成效评估体系相适应。

③计算资源性能指标。星座卫星通信系统中影响性能指标的参数很多，有些指标可以通过解析表达式给出，而有些很难给出清晰的解析表达式。性能指标的获取需要根据性能指标的特点选取不同的方法。

④选取性能评估方法、建立性能评估模型。性能评估与系统特性及其任务需求密切相关，不仅需要面向具体任务目标，提出恰当的性能评估测度，而且需要对系统进行全面、透彻的分析，以寻求合适的方法和建立有效的模型。

⑤检验资源综合性能计算结果。在设定的性能评估体系指导下，采用各个性能指标值计算资源综合性能，并检验结果的有效性。如果满足需要，则进行下一步骤，否则返回检查评估方法和模型的适用性以及指标体系设计的合理性。视实际需要，可能要重新选取性能评估方法、改进评估模型或重新设计指标体系，再次评估系统性能，直至性能评估结果满足有效性准则。

⑥灵敏度分析。灵敏度分析是指星座卫星系统参数(指标)在一定幅度内变化时，通过测定系统性能的变化幅度，分析讨论参数的变化对系统性能的影响程度和范围，掌握系统性能对系统参数变化的敏感度。对性能指标进行灵敏度分析，结合系统环境以及任务满足度分析评价结果。

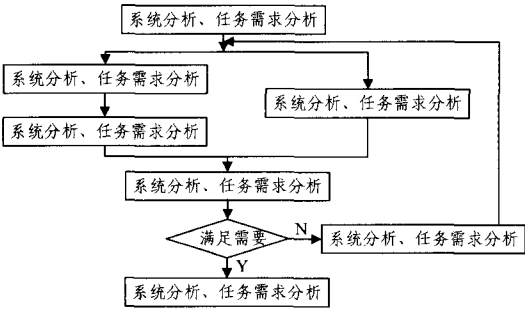


图 5 性能评估指标体系建立过程

4.3 成本评估指标体系

建立成本评估指标体系的一般过程如图 6 所示。

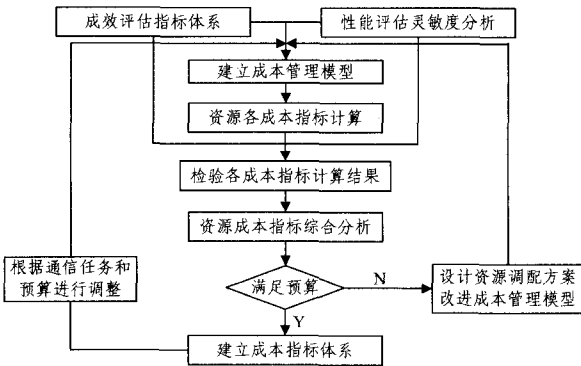


图 6 成本评估指标体系建立过程

星座卫星通信系统的成本评估系统是建立在性能评估系统和成效评估系统之上的。根据资源性能和成效的综合评估，计算出资源投入量、资源消耗量、资源增加量和资源磨损量等，得出综合的资源成本，设计资源调配管理方案，使得资源性能、成效和成本三者达到完美结合。

4.4 实例评估

星座卫星通信资源动态平衡模型的 3C 评估指标体系的建立过程也就是评估流程图。因此，根据图 4—图 6 可设计出相应的算法程序来求解各评估指标。目前，星座卫星通信系统的评估主要借鉴武器装备系统的评估模型与方法^[12]，如层次分析法、模糊综合评判法、ADC 法、SEA 法、有色 Petri 网法等都是一些常用的评估方法与模型^[16]。在此以铱系统为例，选用 ADC 法进行 3C 评估指标体系中的成效评估。

(1)铱系统分析。铱系统基本参数如表 1 所列^[17]。铱系统是世界上第一个低轨道全球卫星移动通信系统，提供双向的话音、数据和定位业务，具有星上处理和交换、星际链路，实现不依赖于地面网络的全球无缝通信。

表 1 铱系统基本参数表

系统	铱系统(Iridium)
轨道高度(km)	785
卫星数目	66+6
轨道面数	6
轨道倾角(°)	86
覆盖区域	全球
卫星重量(kg)	689
卫星功率(kW)	1200
用户频率	L
点波束数量	48
链路形式	星间链路
建设成本(百万\$)	7000
寿命(年)	7.5
运营商	美国摩托罗拉公司

(2)确定铱系统指标属性。按照成效评估指标选取原则，以铱系统需求为基础，归纳其功能特征，提出多项指标，建立铱系统指标体系，将其归纳为覆盖、通信质量和系统保障等 3 个一级指标，并由多个分指标支撑。指标属性如表 2 所列^[18]。

表 2 铱系统指标属性值

指标	铱系统(Iridium)	归一化处理
单星覆盖率	100%	1
两星覆盖率	62.6%	0.63
三星覆盖率	12.6%	0.13
链路平均中断时间(s)	97.7	0.63
最小覆盖仰角(°)	8.2	0.85
接入速率	4.8	0.7
平均接入时间(s)	小于 10	0.7
丢包率	10 ⁻³	0.8
传输时延(ms)	小于或等于 300	0.7
误码率	10 ⁻²	0.8
维护性	一般	0.4
抗干扰	中等	0.6

(3)确定指标权重。采用组合赋权法对表 2 中各指标进行权重计算，得到以下矩阵。

一级指标矩阵：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

覆盖矩阵:

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

通信质量矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & 5 & 3 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{保障矩阵: } G = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

分别求出各矩阵的特征向量,得到各指标的权重:

$$w_T = (0.6483, 0.2297, 0.1220)^T$$

$$w_k = (0.4428, 0.2612, 0.1520, 0.0959, 0.0481)^T$$

$$w_Q = (0.4352, 0.2804, 0.0920, 0.1525, 0.0399)^T$$

$$w_G = (0.25, 0.75)^T$$

(4) 铱系统成效评估。

将表 1 中经过归一化处理的属性值与相应的权重相乘再累加,得到反映整体指标的属性值 $P=0.7031$ 。

在不增加备用卫星的情况下,铱系统平均无故障时间(MTBF)约为 8~10 年,平均维护时间(MTTR)为 2 个月,卫星平均年故障率(FR)为 9.6%^[18],所以铱系统综合成效值为

$$\begin{aligned} E &= ADC \\ &= \begin{bmatrix} MTBF/(MTBF+MTTR) \\ 1-MTBF/(MTBF+MTTR) \end{bmatrix}^T \\ &\quad \begin{bmatrix} 1-FR^2 & FR^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= 0.6824 \end{aligned}$$

成效评估是指系统能满足任务要求的程度的度量。从评估结果来看,铱系统能够满足任务要求。通过对铱系统的成效评估,可以证实 3C 评估指标体系中的成效评估是可行和有效的。性能和成本评估过程与成效评估相似,具体过程不再赘述。

结束语 基于目前对资源规划和资源调度研究较多而对资源平衡探索较少的局面,本文研究了星座卫星通信系统资源动态平衡问题,分析了影响资源平衡的因素,阐述了资源动态平衡的含义和目标;结合宏观经济理论中的供需原理,架构资源动态平衡模型,并求证动态平衡中心点的存在,找到一定时间、空间范围内卫星资源供给和通信任务需求之间的平衡。目的在于解决我国星座卫星资源调配与通信任务需求间的矛盾,合理调整星座卫星资源,提高资源的使用效率和通信任务

需求的满意程度。

本文从宏观层面上(即在一定时间和空间内星座卫星总数量一定、通信任务的总需求量一定)分析了星座卫星资源动态平衡问题。在以后的工作中将研究微观层面上(即在一定时间和空间内星座卫星数量和通信任务的需求量不断变化)的资源动态平衡问题,采用非线性函数建立模型,以期找出更实际、更准确的平衡中心点。此外,资源动态平衡模型本质上是一个决策系统,而星座卫星通信系统是一种典型的分布式系统,所以如何在分布式环境中实现决策系统是一个重要的问题,这也是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 张晓天,马东堂,李强. 基于移动性的星座卫星通信网络管理体系结构研究[J]. 现代电子技术,2009(15):19-21
- [2] Wang Xiu-lai, Wang Song-qing, Liu Na. Dynamic Balance Model Based on Gross Human Resource[J]. Science Technology and Management, 2008, 10(1):23-26
- [3] Czajkowski K, Foster I, Karonis N. A resource management architecture for metacomputing systems[C]//Proc. of IPPS/SPDP'98 Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Orlando, Florida, USA, 1998:84-92
- [4] 王振永. 多层卫星网络结构设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007
- [5] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D, et al. A Multicast Routing Algorithm for LEO Satellite IP Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(2):183-191
- [6] 约翰·梅纳德·凯恩斯. 就业、利息和货币通论[M]. 北京:华夏出版社,2005:44-62
- [7] 陈守科,韦灼彬. 大型工程项目集成化管理环境下的知识协同与任务调度[J]. 海军工程大学学报,2010,22(1):91-96
- [8] 王长峰. 奥运大型通信保障工程多项目资源平衡数据模型与应用研究[J]. 科研管理,2010,31(2):162-169
- [9] 唐进岭,张著洪. 动态多项目多任务选择计划资源配置及其智能决策[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2011,28(2):62-66
- [10] 平狄克·鲁宾费尔德. 微观经济学[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006:186-197
- [11] 宋鹏涛,马东堂,李树锋,等. 军用卫星星座效能评估指标体系研究[J]. 现代电子技术,2007,30(15):43-46
- [12] 郭齐胜. 装备效能评估概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005:62-118
- [13] Dersin P, Levis A H. Large System Effectiveness Analysis [R]. 1981:1072
- [14] Levis A H, Houpt P K, Andreadakis S K. Effectiveness Analysis of Automotive Systems[R]. 1984:1383
- [15] 杨军. 基于模糊理论的卫星导航系统综合效能评估研究[J]. 宇航学报,2004,25(2):38-39
- [16] 丁鲲鹏,曹志耀. 基于有色 Petri 网的卫星信息系统作战效能仿真研究[J]. 军事运筹与系统工程,2005,19(2):79-81
- [17] 张艳娥,张更新,季连涛. 星座通信卫星[J]. 卫星与网络,2007(10):38-39
- [18] 杨海涛. 星座卫星通信系统效能评估方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007