

控制与决策

Control and Decision

铈星星座效能评估BDP-ADC模型

邵瑞瑞, 方志耕, 刘思峰, 王召, 聂媛媛, 高素, 解士昆

引用本文:

邵瑞瑞, 方志耕, 刘思峰, 等. 铈星星座效能评估BDP-ADC模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 733–740.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0700>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

基于交叉熵的改进NPE间歇过程故障检测算法

Improved NPE batch process fault detection algorithm based on cross entropy

控制与决策. 2021, 36(2): 411–417 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0725>

考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

基于高炉炉况评价和反馈补偿的喷煤量决策优化

Decision-making optimization of coal injection volume based on evaluation of blast furnace condition

控制与决策. 2020, 35(11): 2803–2809 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1553>

铱星座效能评估BDP-ADC模型

邵瑞瑞^{1†}, 方志耕¹, 刘思峰¹, 王 召¹, 聂媛媛¹, 高 素², 解士昆¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106;
2. 中国空间技术研究院 通信卫星事业部, 北京 100094)

摘要: 为解决传统模型在度量时间连续状态有限的星座效能时存在的困难, 构建一种基于生灭过程的评估铱星座效能的BDP-ADC模型. 首先, 利用生灭过程描述星座状态的转移过程, 得出该状态转移过程存在极限分布, 并定义铱星的可用度; 其次, 结合Kolmogorov前进方程来衡量星座在任务执行过程中的可信度; 再次, 根据建立的铱星座能力评估指标体系, 利用熵权法求得指标的权重, 结合全概率公式对星座能力进行表征; 最后, 利用BDP-ADC效能评估模型得出铱星座效能动态关系式, 求出铱星的效能, 从而为星座的设计及优化等问题提供依据.

关键词: 铱星; 生灭过程; BDP-ADC模型; 效能评估; 熵权法

中图分类号: N949

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0700

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 邵瑞瑞, 方志耕, 刘思峰, 等. 铱星座效能评估BDP-ADC模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 733-740.

BDP-ADC model for Iridium constellation effectiveness evaluation

SHAO Rui-rui^{1†}, FANG Zhi-geng¹, LIU Si-feng¹, WANG Zhao¹, NIE Yuan-yuan¹, GAO Su², XIE Shi-kun¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology (CAST), Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the difficulties of traditional models in measuring the constellation effectiveness with continuous time and limited states, a BDP-ADC (birth-death process-availability, dependability, capability) model for evaluating the effectiveness of Iridium is constructed. Firstly, the birth and death process is used to describe the transition process of constellation state, and the limit distribution of the state transition process is obtained, and the availability of Iridium is defined. Then, Kolmogorov forward equation is used to measure the dependability of the constellation in the mission execution process. Then, according to the established Iridium capability evaluation index system, the weight of indexes is obtained by using the entropy weight method, and the constellation capability is calculated with the full probability formula. Finally, the dynamic relationship of Iridium constellation effectiveness is obtained by using the BDP-ADC effectiveness evaluation model, and the Iridium constellation effectiveness is obtained, which provides a basis for constellation design and optimization.

Keywords: Iridium; birth-death process; BDP-ADC model; effectiveness evaluation; entropy weight method

0 引言

铱星(Iridium)是美国Motorola公司于1986年提出的世界上第一个全球覆盖的卫星通信系统. 星座包含6个轨道高度为780 km的近极轨道面, 每个轨道面有11颗卫星, 共有66颗卫星以及6颗备份星. 然而, 卫星通信技术复杂、研制周期长、投资巨大, 效能评估问题作为卫星通信研究的重要组成部分, 在星座方案设计、优化等方面都具有重要意义^[1]. 所以, 客观有效地评估铱星座的效能不仅可以从总体上表征其通信能力, 而且能为我国卫星通信星座建设提供有益的

参考.

生灭过程是一步状态转移只发生在相邻状态间的齐次马氏链, 起初主要用来研究群体进化过程中的个体数量^[2]. 之后, 生灭过程以其解析性好、计算简便的特性, 在基于系统失效率和修复率对系统可用度建模等工程领域得到广泛应用^[3-4]. 本文正是基于生灭过程齐次马氏链的重要特征, 结合铱星座的状态转移过程, 构建BDP-ADC (birth-death process-availability, dependability, capability) 效能评估模型.

系统效能评估问题的研究成果较多, 其中评

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71671091); 南京航空航天大学基本业务费基础研究重大项目培育基金项目(NP2019104); 南京航空航天大学基本业务费重大科技成果培育基金项目(NC2019003).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: 1439421039@qq.com.

估方法作为效能评估的核心问题之一,是有效实施效能评估的基础.目前主要的评估方法有ADC (availability, dependability, capability)方法^[5]、效能指标综合法^[6]、模糊综合评判^[7]、神经网络^[8]、层次分析及仿真法^[9-10].ADC方法作为效能评估的典型方法,在系统效能评估问题中得到广泛应用.Gui^[11]基于ADC方法构建了无人机驾驶设备的效能评估模型;Xu等^[12]提出了熵权法与ADC相结合的改进作战效能评估模型;刘仕雷等^[13]以基本ADC模型作为参考,通过分析武器装备系统的特征,提出了改进的ADC效能评估模型.在工程应用中,为了描述系统的运动,需要引入依赖于时间参数的随机变量.Jia等^[14]基于系统动力学理论,通过向模型添加反馈和时间变量来应对无人机信息通信和动态关系建模的挑战;王召等^[15]利用PBS-ADC模型对无人侦察机系统研发阶段的效能进行动态评估.

综上,国内外关于效能评估问题的研究成果较多,主要集中在武器装备领域.针对铱星星座效能评估问题的研究则明显不足,可以从以下方面进一步探索:1)已有的效能评估模型对于星座状态的划分较为简单,不足以支撑进一步细化的效能评估研究;2)铱星高度变化的拓扑结构对动态网络的效能评估提出了更高的要求.为了解决以上问题,本文引用生灭过程来表征铱星各状态间的转移过程,提出一种适应于铱星的BDP-ADC效能评估模型.模型中考虑了星座的瞬时可变性,求得铱星效能动态关系式,指出铱星星座的状态转移符合生灭过程且存在极限分布,定义了星座的可用度.与此同时,结合随机过程理论来衡量星座在任务执行过程中的可信度,为铱星可用度和可信度的求解提出了新的方法.此外,星座能力的求解可以从不同视角构建不同的指标体系,为多视角评估星座效能提供了新的思路.

1 相关定义

定义1(生灭过程) 设 $\{X(t), t \geq 0\}$ 是时间连续状态有限的齐次马氏过程,状态空间 $I = \{0, 1, \dots, s\}$,如果它的转移概率 $p_{ij}(t)$ 满足

$$\begin{cases} p_{ii+1}(h) = \lambda_i h + o(h), \\ \lambda_i > 0, i = 0, 1, \dots, s-1; \\ p_{ii-1}(h) = \mu_i h + o(h), \\ \mu_i > 0, i = 0, 1, \dots, s; \\ p_{ii}(h) = 1 - (\lambda_i + \mu_i)h + o(h), \\ i = 0, 1, \dots, s, \mu_0 = \lambda_s = 0; \\ p_{ij}(h) = o(h), |i - j| \geq 2. \end{cases} \quad (1)$$

则称 $\{X(t), t \geq 0\}$ 为生灭过程(birth-death process, BDP)

定义2(BDP-ADC模型) 通过对铱星星座的状态分解,利用生灭过程(BDP)以及随机过程理论,得到ADC模型中星座的可用度(availability, A)、可信度(dependability, D),同时结合星座能力(capability, C)的评估体系,运用 $E = ADC$ 求得铱星星座的效能,称以上模型为BDP-ADC模型.

2 模型构建

2.1 模型假设

本文基于马尔可夫生灭过程,构建铱星星座BDP-ADC效能评估模型.该模型的假设条件如下:

- 1) 星座中各卫星同类型、同型号;
- 2) 星座服役期间,当卫星故障时都能经过补星/备份星替换恢复星座功能,且单个卫星修复的概率为 μ ,在 Δt 时间内修复的概率为 $\mu\Delta t$;
- 3) 在一个很小的时间区间内,有且仅有一颗卫星故障/修复;
- 4) 星座处于故障状态时停止工作,无任何卫星继续发生故障,此时星座完全失去通信能力.

2.2 铱星星座及其状态描述

卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站转发或者反射无线电波,在两个或者多个地球站之间进行的通信.星座主要是指一组或一群卫星相互协同,共同提供通信服务,图1为铱星星际链路示意.

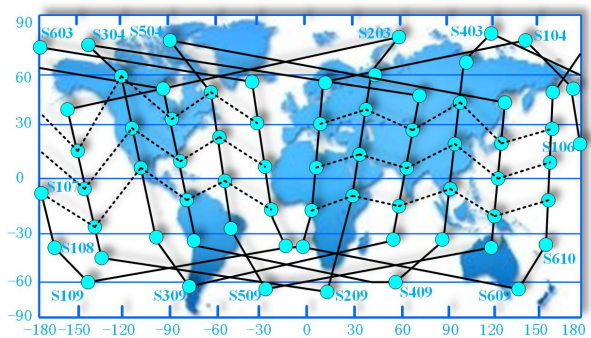


图1 铱星星际链路示意

假设星座由 m 颗卫星组成,当故障的卫星数为 s ($0 < s \leq m$)时,星座完全丧失通信功能.卫星的故障率和修复率分别为 λ 和 μ ,于是,在任务准备及执行阶段,星座有以下 $n+1$ 种状态.

状态0:星座中的所有卫星均处于完好状态,通信功能良好;

状态1:星座中有1颗卫星处于故障状态,仍能满足一定的通信要求;

状态2:星座中有2颗卫星处于故障状态,仍能满

$$\pi_j = \frac{\frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

定理得证. □

为求解星座稳态时的可用度,可由处于 $n + 1$ 种可能状态中可用状态 $\{0, 1, \dots, n - 1\}$ 的概率之和求解得到,即铱星座的可用度为

$$A = \pi_0 + \sum_{j=1}^{n-1} \pi_j = \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}\right)^{-1} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}}. \quad (4)$$

2.4 铱星座可信性 D 的计算

可信性表征星座初始执行任务时所处状态已知的情况下,运行过程中对某个瞬间星座状态的度量.假设星座在 $(0, t)$ 通信任务执行过程中处于可用状态,即可用于规定任务.可信性在概念上与可靠性本质相同.根据定义,可信性是时间的函数,星座的可信度为其在执行规定任务的过程中处于可用状态的概率之和.

为求解铱星座的可信度,可利用随机过程理论的 Kolmogorov 前进方程求得星座在运行过程中处于可用状态的概率. Kolmogorov 前进方程如下:

$$p'(t) = p(t)Q. \quad (5)$$

由式(5)可知 $p'_w(t) = p_w(t)Q$, 其中 $p_w(t)$ 为星座可用状态下完成规定任务的概率.由矩阵方程 $p'_w(t) = p_w(t)Q$ 可得如下方程组:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda_0 p_0(t) + \mu p_1(t); \\ p'_j(t) = \lambda_{j-1} p_{j-1}(t) - (\lambda_j + \mu) p_j(t) + \mu p_{j+1}(t), \quad j = 1, 2, \dots, n - 1. \end{cases} \quad (6)$$

假设任务开始时所有卫星均处于正常工作状态, $p_0(0) = 1, p_j(0) = 0 (j = 1, 2, \dots, n)$. 为求解式(6),将其进行拉氏变换并求解,可得星座在执行任务过程中一直处于可用状态 $\{0, 1, \dots, n - 1\}$ 的概率为

$$p_0(t) = e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2}t} \cdot \text{ch} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right] + \frac{\lambda_1 + \mu - \lambda_0}{2}.$$

$$e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2}t} \left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{sh} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right],$$

$$p_1(t) = \lambda_0 e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2}t} \left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{sh} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right],$$

$$p_j(t) = \frac{e^{-(\lambda_{j-1} + \mu)t}}{\mu} p_{j-1}(t), \quad j = 2, 3, \dots, n - 1.$$

于是,铱星座可信度为

$$D = \sum_{j=0}^{n-1} p_j(t) = p_0(t) + p_1(t) + \sum_{j=2}^{n-1} p_j(t) = e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2}t} \cdot \text{ch} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right] + \frac{\lambda_1 + \mu + \lambda_0}{2} e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2}t} \cdot \left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{sh} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0(\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right] + \sum_{j=2}^{n-1} \frac{e^{-(\lambda_{j-1} + \mu)t}}{\mu} p_{j-1}(t). \quad (7)$$

2.5 铱星座能力 C 的计算

能力向量反映系统在可用及可信状态下完成任务目标的概率.系统的能力 C 表示为

$$C = [c_0, c_1, \dots, c_{n-1}, c_n]^T = [c_0, c_1, \dots, c_{n-1}, 0]^T.$$

其中: $c_i (i = 0, 1, \dots, n - 1)$ 表示系统处于可用状态时完成任务目标的概率,是系统能力的综合表现; c_n 表示系统处于故障状态时完成任务目标的概率,显然 $c_n = 0$.

在本文中,铱星座能力表示星座处于可用及可信状态下完成任务目标的概率,为各可用状态的能力值与处于对应状态概率值的乘积之和,即

$$C = \sum_{j=0}^{n-1} p_j(t) c_j. \quad (8)$$

其中: c_j 表示铱星座各可用状态能力值, $p_j(t)$ 表示星座处于各可用状态的概率.利用全概率公式可求得整个星座的能力值.

铱星座各可用状态能力值 c_j 的计算步骤如下:

step 1: 构建铱星星座能力评估指标体系.

构建合理完备的指标体系是进行能力评估的前提. 根据一致性、科学性、全面性、有效性、独立性的

指标选取原则, 将铱星星座的整体能力归纳为覆盖、接入、业务质量、系统保障4个方面来描述, 具体如图3所示.

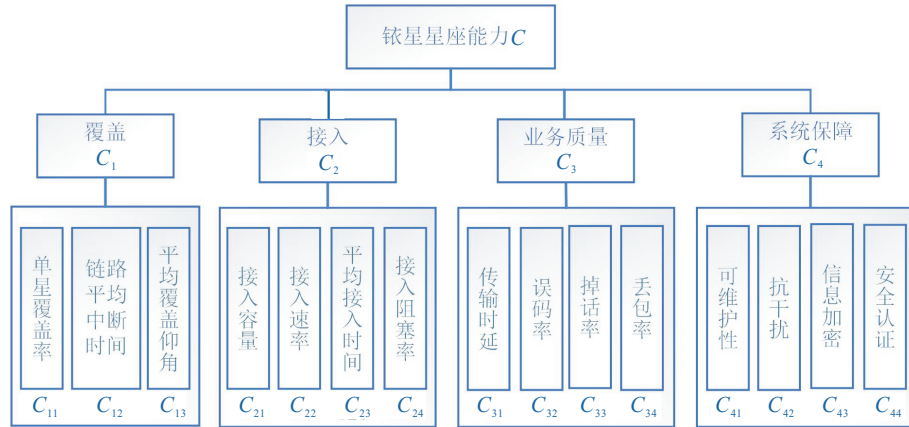


图3 铱星星座能力评估指标体系

step 2: 指标数据的收集与处理.

为评估铱星星座的能力, 需要收集各评估指标的属性值. 指标的属性值又可分为定量指标(如丢包率、误码率等)和定性指标(抗干扰、信息加密等)两种. 由于各指标的属性各不相同, 需要对各评估指标进行归一化处理.

step 3: 指标权重的求解.

权重反映了各指标在指标集中的重要性, 确定指标的权重是进行能力评估的基础. 权重的确定方法通常分为主观赋权法、客观赋权法等. 主观赋权法受专家主观意愿影响较大, 因此, 本文采用客观赋权法来确定指标权重. 熵权法是依据各指标所含信息量的多少来确定其权重, 计算过程如下.

设 $j (j = 0, 1, \dots, n-1)$ 表示星座的可用状态, 一级指标 $C_{jk} (j = 0, 1, \dots, n-1, k = 1, 2, 3, 4)$ 在可用状态下覆盖 C_1 、接入 C_2 、业务质量 C_3 、系统保障 C_4 的权重分别为 ω_{j1} 、 ω_{j2} 、 ω_{j3} 、 ω_{j4} ; 二级指标 $c_{jkl} (j = 0, 1, \dots, n-1, k = 1, 2, 3, 4, l = 1, 2, 3, 4)$ 的权重分别为 $\omega_{jkl} (j = 0, 1, \dots, n-1, k = 1, 2, 3, 4, l = 1, 2, 3, 4)$; 各可用状态下评价指标的归一化值为 r_{jkl} , 如 r_{011} 表示在可用状态0下, 二级指标 c_{11} 的属性归一化值. 令 $R_{jk} = \{\omega_{jkl}, l = 1, 2, 3, 4\}$ 表示各可用状态下一级指标 C_k 的归一化向量; R_{jkl} 表示各可用状态下归一化向量中元素, 如 R_{011} 表示在可用状态0下, 一级指标 C_1 的归一化向量中的第1个元素.

各可用状态下, 二级指标权重为

$$\omega_{jkl} = r_{jkl} / \sum_{l=1}^4 r_{jkl}. \quad (9)$$

各可用状态下, 一级指标权重的求解步骤为

$$H_{jkl} = -\frac{1}{\ln l} \sum_{l=1}^l R_{jkl} \ln R_{jkl}, \quad (10)$$

$$\nu_{jkl} = 1 + \frac{1}{\ln l} \sum_{l=1}^l R_{jkl} \ln R_{jkl}, \quad (11)$$

$$\omega_{jk} = \frac{\nu_{jkl}}{\sum_{l=1}^4 \nu_{jkl}}. \quad (12)$$

其中: H_{jkl} 为可用状态 j 下指标 c_{kl} 的熵值, ν_{jkl} 为计算中间值, $\omega_{jk} = (\omega_{j1}, \omega_{j2}, \omega_{j3}, \omega_{j4})$ 为一级指标权重.

step 4: 计算铱星星座各可用状态的能力值

$$c_j = \sum_{k=1}^4 \omega_{jk} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 \omega_{jkl} r_{jkl}. \quad (13)$$

3 铱星效能计算与分析

设铱星星座的故障率为0.08/年, 修复率为10/年. 根据文献[18], 当故障卫星数量达到12颗时,

表1 铱星星座能力指标属性值

指标属性	指标项	属性值	归一化值
定量指标	单星覆盖率/%	100	1.0
	链路平均中断时间/s	97.7	0.63
	最小覆盖仰角/(°)	8.2	0.85
	单星接入容量/信道	3840	0.81
	接入速率/kbps	4.8	0.7
	平均接入时间/s	<10	0.7
	接入阻塞率/%	1	0.77
	丢包率	10^{-3}	0.7
	掉话率/%	3	0.8
	传输时延/ms	≤ 300	0.75
定性指标 [0, 1]	误码率	10^{-2}	0.8
	可维护性	0.55	0.55
	抗干扰	0.60	0.60
	信息加密	0.75	0.75
	安全认证	0.80	0.80

STK软件仿真呈现的单星覆盖率为89.66%,此时意味着在覆盖的区域内,存在10%的概率卫星不覆盖,星座已经无法满足可用状态下的各种性能值,处于故障状态. 铱星处于0状态即所有卫星均完好的相关能力数据见表1,任务持续时间为0.2年.

3.1 结果分析

根据式(4)、(7)、(8)可知,铱星星座的效能为

$$\begin{aligned}
 E = ADC = & \left[\left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j} \right)^{-1} + \right. \\
 & \left. \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j} \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu^j}} \right] \cdot \left\{ e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} t} \operatorname{ch} \left[\left(\lambda_0 \mu + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0 (\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right] + \frac{\lambda_1 + \mu + \lambda_0}{2} \cdot \right. \\
 & \left. e^{-\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} t} \left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \lambda_0 (\lambda_1 + \mu) \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \operatorname{sh} \left[\left(\lambda_0 \mu + \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_1 + \mu}{2} \right)^2 - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \lambda_0 (\lambda_1 + \mu) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \right] + \sum_{j=2}^{n-1} \frac{e^{-(\lambda_{j-1} + \mu)t}}{\mu} p_{j-1}(t) \right\} \cdot \\
 & \sum_{j=0}^{n-1} p_j(t) \sum_{k=1}^4 \omega_{jk} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^l \omega_{jkl} r_{jkl}. \tag{14}
 \end{aligned}$$

根据式(14)分析故障率、修复率、任务持续时间与星座效能的关系,如图4~图6所示,且在一定的故障率和修复率条件下效能的变化如图7所示.

由图4~图6可知,故障率及任务持续时间与星座的效能呈负相关,修复率与星座的效能呈正相

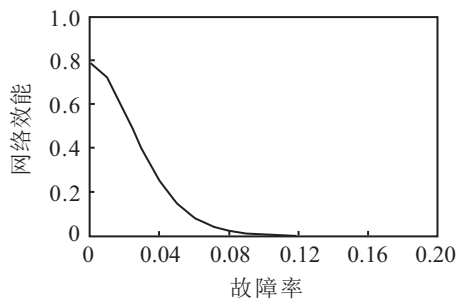


图4 故障率与网络效能的关系

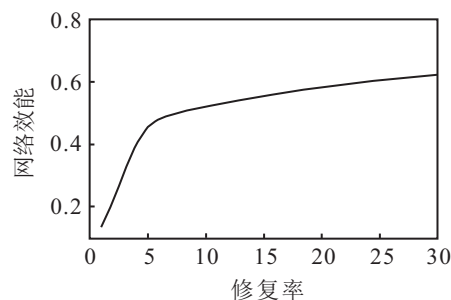


图5 修复率与网络效能的关系

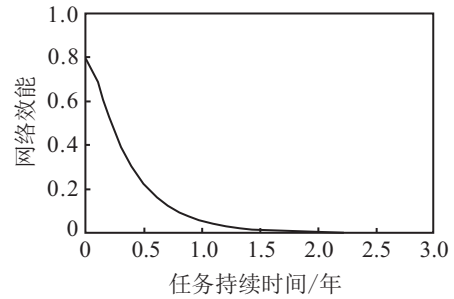


图6 任务持续时间与网络效能的关系

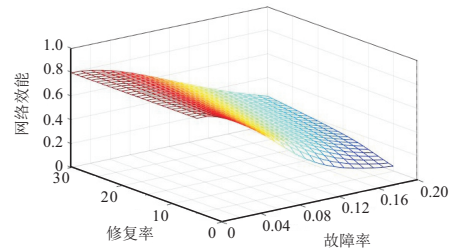


图7 故障率和修复率与网络效能的关系

关. 图4中,随着故障率增大,星座的效能变化趋势放缓,当故障率达到0.1/年时,星座的效能值趋于0. 图7中,故障率与星座效能的关系也呈现出同样的趋势. 与此同时,修复率在0~10/年时,效能增加率较高,随着修复率的继续增加,效能值增长较慢. 在图7中为一个接近直线的效能变化率,说明当星座的修复率达到一定值时,提高修复率对改善星座效能的作用较小,此时应合理控制修复成本. 图6表明,随着任务时间的延长,星座效能的下降速率减缓,当一项/组任务的持续时间较长(达到1.5年)时,效能值趋近0. 因而,合理划分任务,控制任务的持续时间,能有效提高星座的效能. 通过分析图7易知,降低故障率比提升修复率在星座效能的提升上更为明显.

3.2 基于BDP-ADC模型的铱星星座效能

根据式(4)可知 $A = 0.9999$, 根据式(6)和(7)可知 $D = 0.8101$.

能力C的求解可根据式(8)~(13),现以星座处于0状态为例,对指标的权重进行求解,具体步骤如下.

1) 二级指标权重的求解.

当星座处于0状态时,铱星星座的能力指标属性值如表1所示,将属性值进行无量纲化处理见表1的第4列. 由式(9)可得此时各二级指标的权重为

$$\begin{aligned}
 \omega_{011} &= \frac{1}{1 + 0.63 + 0.85} = 0.403, \\
 \omega_{012} &= \frac{0.63}{1 + 0.63 + 0.85} = 0.254, \\
 \omega_{013} &= \frac{0.85}{1 + 0.63 + 0.85} = 0.343;
 \end{aligned}$$

同理求得

$$\omega_{021} = 0.272, \omega_{022} = 0.235,$$

$$\begin{aligned} \omega_{023} &= 0.235, \omega_{024} = 0.258; \\ \omega_{031} &= 0.246, \omega_{032} = 0.262, \\ \omega_{033} &= 0.262, \omega_{034} = 0.23; \\ \omega_{041} &= 0.204, \omega_{042} = 0.222, \\ \omega_{043} &= 0.278, \omega_{044} = 0.296. \end{aligned}$$

2) 一级指标权重的求解.

二级指标属性值的归一化向量 R_{0k} 分别为

$$\begin{aligned} &(0.403, 0.254, 0.343), \\ &(0.272, 0.235, 0.235, 0.258), \\ &(0.246, 0.262, 0.262, 0.23), \\ &(0.204, 0.222, 0.278, 0.296). \end{aligned}$$

根据式(10)可得各二级指标的熵值为

$$H_{011} = -\frac{1}{\ln 3}(0.403 \ln 0.403 + 0.254 \ln 0.254 + 0.343 \ln 0.343) = 0.984.$$

同理可得

$$H_{012} = 0.999, H_{013} = 0.999, H_{014} = 0.992,$$

于是

$$H_{01} = (0.984, 0.999, 0.999, 0.992).$$

根据式(11)可得

$$\begin{aligned} \nu_{011} &= 0.0157, \nu_{012} = 0.0014, \\ \nu_{013} &= 0.001, \nu_{014} = 0.0084, \end{aligned}$$

于是

$$\nu_{01} = (0.0157, 0.0014, 0.001, 0.0084).$$

根据式(12)可得一级指标的权重为

$$\omega_{0k} = (0.592, 0.053, 0.038, 0.317),$$

进而,求得星座处于0状态的能力值为

$$\begin{aligned} c_0 &= \\ &0.592 \times (0.403 \times 1 + 0.254 \times 0.63 + 0.343 \times \\ &0.85) + 0.053 \times (0.272 \times 0.81 + 0.235 \times 0.7 + \\ &0.235 \times 0.7 + 0.258 \times 0.77) + 0.038 \times \\ &(0.246 \times 0.75 + 0.262 \times 0.8 + 0.262 \times 0.8 + \\ &0.23 \times 0.7) + 0.317 \times (0.204 \times 0.55 + \\ &0.6 \times 0.222 + 0.75 \times 0.278 + 0.296 \times 0.8) = \\ &0.7936. \end{aligned}$$

同理,可求得星座处于其他可用状态的能力值为

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.7921, c_2 = 0.7865, c_3 = 0.7724, \\ c_4 &= 0.7655, c_5 = 0.7521, c_6 = 0.749, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_7 &= 0.7374, c_8 = 0.7024, c_9 = 0.6862, \\ c_{10} &= 0.653, c_{11} = 0.624. \end{aligned}$$

根据式(8)即可求得 $C = 0.6429$. 于是,由式(14)求得铱星星座的效能为

$$E = ADC = 0.9999 \times 0.8101 \times 0.6429 = 0.5208.$$

3.3 效能模型对比分析

为进一步验证模型的有效性,将本文方法与经典ADC模型进行对比. 为确保各模型在相同参数下度量系统的效能,均不考虑任务的执行时间,将文献[18]和文献[19]的方法与BDP-ADC效能评估模型进行对比,如表2所示.

表2 效能评估模型对比分析

方法	应用范围	权重的求解	效能指标计算	效能
文献[18]	静态网络	主观	主观	0.6516
文献[19]	静态网络	—	主观	0.6742
BDP-ADC	动态网络	客观	客观	0.6678

由表2可知,BDP-ADC模型与经典ADC模型求得的效能值十分接近,从而进一步验证了模型的有效性. 现有的效能评估方法在研究连续时间的效能问题上明显不足,且可用度的计算方法过于简单与主观;而本文所提出的BDP-ADC模型则避免了此类问题. 此外,BDP-ADC可通过对星座历史数据的收集调整评估参数,进一步提高效能评估的准确度.

4 结论

1) 通过对效能结果的分析可知,故障率和修复率的变化与星座效能的改变不存在线性关系,因而在满足需求的情况下,需要权衡星座效能与性能优化成本费用之间的关系.

2) 根据铱星星座效能表达式分析各参数对星座效能的影响以及效能的增长趋势,找出对星座效能影响较大的参数,为星座的设计提供指导.

3) 该模型在保证效能评估结果准确度的前提下,提升了效能指标计算的客观性. 同时,对星座在一定任务时间/条件下完成规定任务的效能进行了度量,为时间连续状态有限的铱星星座效能评估问题提供了新的解决思路.

4) 本文构建了铱星星座的效能评估模型,从工程应用的角度,不确定性故障率和修复率下星座效能的评估是值得进一步深入拓展的问题.

参考文献(References)

[1] Dong Y L, Wang C T, Sun C H, et al. Performance evaluation for satellite communication networks based on AHP-BP algorithm[C]. The 10th International

- Conference on Communication Software and Networks. Piscataway: IEEE, 2018: 311-316.
- [2] 许新忠, 王禹, 苗甫. 基于生灭过程的域间路由系统相继故障模型[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(17): 125-130.
(Xu X Z, Wang Y, Miao F. A cascading failure model for inter domain routing system based on birth and die process theory[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(17): 125-130.)
- [3] 徐宗昌, 张永强, 呼凯凯, 等. 备件携行量研究方法综述[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2623-2633.
(Xu Z C, Zhang Y Q, Hu K K, et al. Survey on amount configuration methods of carrying spare parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2623-2633.)
- [4] Elhady A M. Remote sensing satellite system overall effectiveness analysis and modeling[C]. 2014 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE, 2014: 1-10.
- [5] Wang Y. The application of ADC method in effectiveness evaluation for communication constellation system[J]. Science and Education Collection, 2007, 40(1): 195-196.
- [6] Yang Q L, Ye G H, Lu R M. Synthetic performance evaluation for constellations communication system based on fuzzy theory[J]. Radio Communications Technology, 2009, 35(3): 8-10.
- [7] Yeh C, Deng H P, Chang Y. Fuzzy multicriteria analysis for performance evaluation of bus companies[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(3): 459-473.
- [8] Li Z S, Li J S, Feng F, et al. Self-organizing fuzzy clustering neural network and application to electronic countermeasures effectiveness evaluation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(1): 119-124.
- [9] Tian G D, Zhang H H, Zhou M C, et al. AHP, gray correlation, and TOPSIS combined approach to green performance evaluation of design alternatives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(7): 1093-1105.
- [10] Xiong X L, Yang L, Zhao G S. Effectiveness evaluation model of moving target defense based on system attack surface[J]. IEEE ACCESS, 2019, 7: 9998-10014.
- [11] Gui C M. Evaluation of unmanned equipment operational effectiveness based on ADC model[C]. The 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Piscataway: IEEE, 2018: 299-303.
- [12] Xu P F, Zhang W H, Ma R N. Study of operational effectiveness evaluation algorithm in communication-based network based on entropy weight of the improved ADC method[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(1): 64-68.
- [13] 刘仕雷, 李昊. 改进ADC方法及其在武器装备系统效能评估中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 130-135.
(Liu S L, Li H. Modified ADC method and its application for weapon system effectiveness evaluation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(3): 130-135.)
- [14] Jia N P, Yang Z W, Yang K W. Operational effectiveness evaluation of the swarming UAVs combat system based on a system dynamics model[J]. IEEE ACCESS, 2019, 7: 25209-25224.
- [15] 王召, 刘思峰, 方志耕, 等. 无人侦察机系统研发阶段的效能评估PBS-ADC模型[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10): 2279-2286.
(Wang Z, Liu S F, Fang Z G, et al. PBS-ADC model for effectiveness evaluation in the development phase of unmanned reconnaissance aircraft[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 41(10): 2279-2286.)
- [16] Ross S M. Introduction to probability models[J]. Technometrics, 2003, 40(1): 78.
- [17] 赵涛, 林青. 可靠性工程基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 66.
(Zhao T, Lin Q. Reliability engineering foundation[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 66.)
- [18] 王宇. 基于ADC模型的星座卫星通信系统效能评估技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学信息通信学院, 2007.
(Wang Y. Research on effectiveness evaluation technology for constellation satellite communication system based on ADC modeling[D]. Changsha: College of Information and Communication, National University of Defense Technology, 2007.)
- [19] 时和平, 芮科慧, 郝明. 基于ADC模型的C4ISR通信系统效能评估研究[C]. 北京地区高校研究生学术交流会通信与信息技术会议论文集. 北京, 2008: 313-316.
(Shi H P, Rui K H, Hao M. Based on ADC model C4ISR communication system effectiveness evaluation[C]. Proceedings of Conference on Communication and Information Technology for Graduate Students in Beijing. Beijing, 2008: 313-316.)

作者简介

邵瑞瑞(1991—), 女, 博士生, 从事卫星网络效能的研究, E-mail: 1439421039@qq.com;

方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事可靠性工程、复杂装备研制管理等研究, E-mail: zhigengfang@163.com;

刘思峰(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色理论、数量经济学等研究, E-mail: sfliu@nuaa.edu.cn;

王召(1994—), 男, 硕士生, 从事复杂装备研制管理、质量管理的研究; E-mail: wongshao@126.com;

聂媛媛(1989—), 女, 博士生, 从事卫星网络抗毁性的研究, E-mail: yynnuaa@163.com;

高素(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 从事卫星通信系统架构设计、基于模型的系统工程、效能分析的研究, E-mail: su_gao06@163.com;

解士昆(1974—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事体系和系统的架构设计与分析优化的研究, E-mail: kxie2004@163.com.

(责任编辑: 李君玲)