引用格式:谢家豪,韦道知.基于动态规划的多目标卫星资源优化配置[J].电光与控制,2019,26(9):9-12,25. XIE J H, WEI D Z. Multi-target satellite resource optimization configuration based on dynamic programming[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):9-12, 25.

基于动态规划的多目标卫星资源优化配置

谢家豪[a], 韦道知[b]
(空军工程大学,a.研究生院;b.防空反导学院,西安 710051)

摘 要:针对目前我国弹道导弹的预警卫星星座系统资源优化配置问题,提出基于动态规划方法的多目标卫星星座资源优化配置方案。该方法从本质上讲是一种非线性规划方法,原理可归结为一个基本递推关系式,通过将预警卫星星座单帧时间内可观测到弹道目标的星座作为一种资源进行分配,建立星座方案评价函数,使丢失弹道目标的可能性最小,从而达到不丢失目标或部分状态信息的目的。实验表明该方法是卫星星座资源配置的有效方法,同时通过与其他算法对比,证明了该方法可以使卫星星座资源发挥其最大的作用。

关键词:动态规划;卫星星座;资源优化配置
中图分类号:TP273 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.003

Multi-target satellite Resource Optimization Configuration Based on Dynamic Programming

XIE Jia-hao[a], WEI Dao-zhi[b]
(Air Force Engineering University, a. Graduate College; b. Air Defense and Missile College, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aiming at the problem of optimal resource allocation of early warning satellite constellation system for ballistic missiles in China, a multi-target satellite constellation resource optimization configuration scheme based on dynamic programming method is proposed. This method is essentially a nonlinear programming method. The principle can be reduced to a basic recursive relationship. The constellation of the ballistic target observed in a single frame of the early warning satellite constellation is taken as a resource to be allocated, and the constellation scheme evaluation function is established to minimize the possibility of losing the ballistic target, thereby achieving the goal of not losing the target or state information. Experiments show that this method is effective in satellite constellation resource allocation. Compared with other algorithms, this method can make full use of the satellite constellation resources.

Key words: dynamic programming; satellite constellation; resource optimization configuration

0 引言

随着航天技术、电子技术的迅速发展,卫星技术在通信、导航、对地侦察等领域中得到了广泛的应用,现代小卫星的兴起,又使卫星的应用范围在深度和广度上不断扩展。如今,利用小卫星组成的星座为人类提供各种服务已成为卫星应用的一种技术趋势,这些卫星星座是由一簇有着相似卫星轨道的卫星(有相同功能或类型的卫星)构成。

卫星星座资源优化配置是一个非线性目标优化问题。文献[1]提出了基于CART算法的卫星星座构型优化问题,该算法具有可扩展性强、准确性高和易于实现的优点,为卫星星座构型模块化设计建立了良好的基础,但是存在样本集容量太小的问题;文献[2]提出了基于Petri网的Walker星座资源优化算法,该算法可以保证星座的平稳运行,但对卫星的寿命分析不完善;文献[3-4]利用遗传算法来实现对卫星星座的资源配置,在某种程度上提高了算法的运行效率,但存在算法容错性差、收敛速度慢等缺点;文献[5]提出一种基于多目标进化算法的卫星通信星座优化设计方法,将基于Pareto最优解的多目标进化算法引入星座设计中,但所用计算时间较长;文献[6]引入一种多目标演化算法的区域星座优化设计方法,应用到两个中低轨区域覆盖星座的优化设计实例中,但是如何能合理地

收稿日期:2018-08-23 **修回日期**:2019-05-20
基金项目:国家自然科学基金(61603410)
作者简介:谢家豪(1996—),男,吉林敦化人,硕士生,研究方向为空天目标智能信息处理。

将多目标演化算法和局部搜索方法有机地结合起来，以平衡算法的全局搜索与局部搜索能力，均衡搜索效率将是今后工作的关键性问题。本文运用动态规划理论[7-8]针对多弹道目标对卫星星座资源进行了合理配置研究，得到了卫星星座资源配置的有效方法，使卫星星座资源得以发挥最大的作用。

利用动态规划理论，将预警卫星星座单帧时间内可观测到的弹道目标的星座作为一种资源进行分配，其评价指标设定为丢失率 J，即丢失弹道目标的可能性，通过使 J 最小达到不丢失目标或部分状态信息的目的，解法采用动态规划的顺推法。

1 卫星星座资源优化配置模型

1.1 动态规划

动态规划[9-11]从本质上讲是一种非线性规划方法，其核心是贝尔曼最优性原理。这个原理可归结为一个基本递推关系式，从而使决策过程连续地转移，并将一个多步最优控制问题转化为多个一步最优控制问题，从而简化求解过程。贝尔曼指出，多级决策过程的最优策略具有这样的性质：不论初始状态和初始决策如何，当把其中的任何一级和状态再作为初始级和初始状态时，其余的决策对此必定也是一个最优策略。具体来说，若有一个初态为 N 级的决策过程，其最优策略为 $\{u(0),u(1),\cdots,u(N-1)\}$，那么，对于以 $x(1)$ 为初态的 $N-1$ 级决策过程来说，决策集合 $\{u(1),u(2),\cdots,u(N-1)\}$ 必定是最优策略。最优性原理为解决多级决策过程的寻优问题提供了简便而有效的方法，可将一个多级最优决策问题化为多个单级最优决策问题，并为导出递推方程提供了理论基础。

1.2 卫星星座性能评价函数

卫星星座资源优化问题是一个求解如何在有限时间内、有限资源和空间等多约束条件下，提高卫星工作效率的问题。对卫星星座工作效能的评估指标有多种，本文从任务完成情况、资源使用率和时效性 3 个方面建立卫星星座动态评估体系，具体分类如图 1 所示。

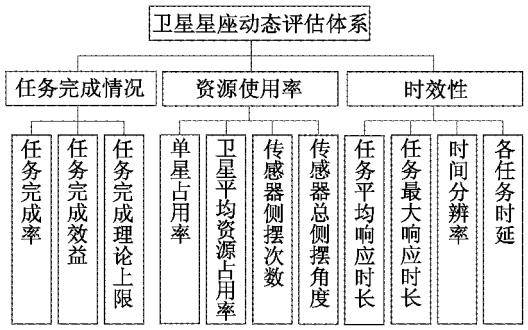

图 1 卫星星座动态评估体系

Fig. 1 Satellite constellation dynamic evaluation system

本文通过建立卫星星座任务完成率函数，即考虑卫星星座丢失弹道导弹目标的可能性来实现对卫星星座性能的动态评估。评价函数为

$$\min J_k(T_k) = \underset{u_k \in D_k(T_k)}{opt} \{v_k(T_k,u_k)+J_{k+1}(T_{k+1})\}$$
$$k=n,n-1,\cdots,1 \tag{1}$$

式中：$J_k(T_k)$ 为卫星星座对后 $n-k+1$ 个弹道目标的丢失率；T_k 为第 k 个弹道目标；$D_k(T_k)$ 为能够监视到弹道目标的卫星星座集合；u_k 是 $D_k(T_k)$ 中不同卫星星座的配置组合，是 $D_k(T_k)$ 的真子集；$v_k(T_k,u_k)$ 是当前目标在可监视预警卫星星座的不同配置下所能取得的指标，为多个值，与 u_k 相关。通过评价函数方程的递推，可以得到理想的监视效率。图 2 给出了采用动态规划方法两节点之间的递推关系。

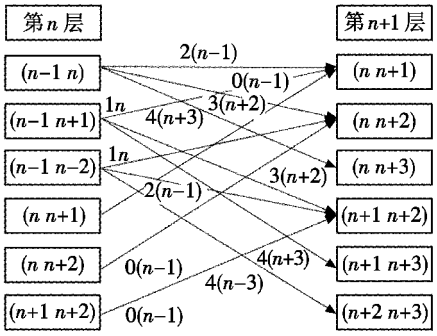

图 2 两节点间的递推关系

Fig. 2 Recursive relationship between two nodes

1.3 前提条件

1）对弹道目标按照前期预测的攻击剩余时间，或弹道目标到预测落点斜距或到我国国境距离进行排序，剩余时间或距离越少，优先级越高，排序越靠前。首次发现目标可按到我国国境距离进行排序，待掌握其状态参数对落点做出预测后可按剩余时间进行排序。

2）每颗卫星星座仅对一个弹道目标进行凝视监视，以便取得良好的监视效果。

3）卫星星座采用 Walker-δ 卫星星座，这是目前卫星星座配置中常用卫星星座，具有良好的覆盖性能，如图 3 所示。

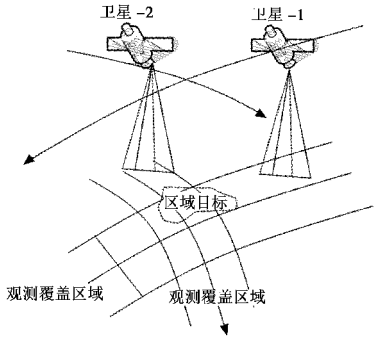

图 3 卫星对区域目标覆盖示意图

Fig. 3 Satellite coverage of regional targets

4）两颗以上卫星星座的监视效果与目标到卫星星座的视线角有关。

1.4　约束条件

1）卫星星座的数目有限；

2）对目标的监视，单颗卫星星座可确保目标不丢失，两颗以上卫星星座可获得目标的状态信息，故 $v_k(T_k, u_k)$ 应当与卫星星座数目有关；

3）目标的可见或可监视的含义是目标处于预警卫星星座上所搭载探测器的探测距离内；

4）探测器的探测范围受地球的遮挡，即无法探测到地球另一面的目标。

图 4 为 3 颗卫星星座探测侧视图与俯视图。

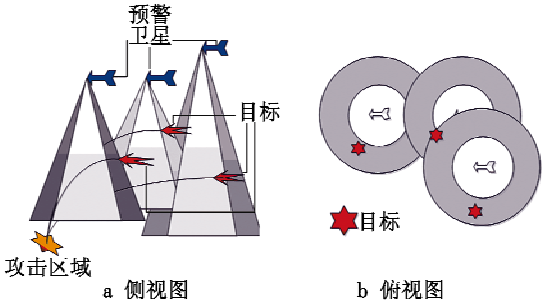

图 4　卫星星座探测侧视图与俯视图

Fig. 4　Side and top view of satellite constellation detection

1.5　指标 $v_k(T_k, u_k)$ 的确定

根据以上前提条件及约束，可以确定 $v_k(T_k, u_k)$ 是可监视卫星星座数目 S_{num}、目标到各可监视卫星星座视线夹角 A、目标到各可监视卫星星座距离 R 的函数，即

$$v_k(T_k, u_k) = f_1(S_{num}) \cdot [f_2(A) + f_3(R)]。\quad (2)$$

由于本文旨在讨论一种可行的卫星星座配置方案，故对 $v_k(T_k, u_k)$ 进行合理假设，最终确定

$$f_1(S_{num}) = \begin{cases} \dfrac{1}{S_{num}} & S_{num} \leqslant 2 \\ \dfrac{1}{3} & S_{num} \geqslant 3 \end{cases} \quad (3)$$

$$f_2(A) = \frac{|\bar{A} - A_{opt}|}{A_{opt}} \quad (4)$$

$$f_3(R) = \frac{\bar{R}}{R_{detect}} \quad (5)$$

式中：$\bar{A}$ 为监视卫星星座轴向与其弹道目标的夹角；A_{opt} 为最佳探测视线角；$\bar{R}$ 为导弹目标到各可监视卫星星座的平均距离；R_{detect} 为星载探测器最大可探测距离。

2　具体步骤

下面给出卫星星座资源优化配置的具体步骤。

1）目标优先级排序：根据 1.3 节中的条件 1），对发现的目标进行优先等级排序[9]，以将更优质的资源提供给更紧要的目标。

2）可监视卫星星座判断：分析目标与预警卫星星座中各星座的几何位置关系，分别找出各目标所对应的监视卫星星座集合 $D_k(T_k)$，各集合可能存在交集。

3）交集卫星星座分配：利用上述动态规划的方法对同时存在于两个以上监视卫星星座集合中的卫星星座进行优化配置[12]，使最终丢失率达到最小。

4）正向分析找到丢失率达到最小的配置方案。

5）本帧结束，进入下一帧的循环。

卫星星座资源优化配置全过程如图 5 所示。

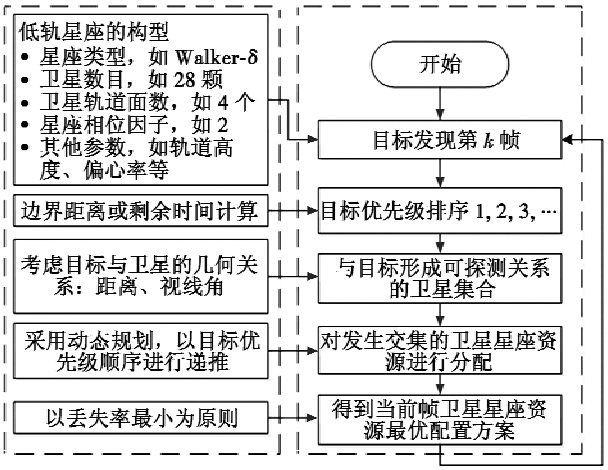

图 5　卫星星座资源优化配置全过程

Fig. 5　Satellite constellation resource optimization configuration

3　仿真案例

3.1　低轨卫星星座的构型

Walker-δ 卫星星座，轨道高度 1600 km，有 4 个轨道面，每个轨道面有 7 颗卫星，相位因子为 2，探测器采用复合圆锥型推扫，内圆锥半角为 45°，外圆锥半角为 65°。

卫星星座编号如表 1 所示。

表 1　卫星星座编号

Table 1　Satellite constellation number

Ⅰ轨道面	Ⅱ轨道面	Ⅲ轨道面	Ⅳ轨道面
S11	S21	S31	S41
S12	S22	S32	S42
S13	S23	S33	S43
S14	S24	S34	S44
S15	S25	S35	S45
S16	S26	S36	S46
S17	S27	S37	S47

3.2　弹道目标

6 颗弹道导弹在 2017 年 8 月 28 日 4:00:00 同时发射，发射点、落点信息见表 2。

表2 弹道目标信息

Table 2 Ballistic target information

导弹编号	发射点	落点
Ⅰ	(43.916 8°N, 65.114 7°W)	(37.614 9°N, 114.689°E)
Ⅱ	(45.492 3°N, 100.525°W)	(38.796 5°N, 116.656°E)
Ⅲ	(31.312 9°N, 102.098°W)	(38.796 5°N, 116.262°E)
Ⅳ	(35.521 6°N, 106.653°W)	(38.796 5°N, 116.386°E)
Ⅴ	(38.926 1°N, 108.068°W)	(38.796 5°N, 116.535°E)
Ⅵ	(42.312 9°N, 111.218°W)	(38.796 5°N, 116.843°E)

3.3 仿真实验

本文分别采用动态规划算法[13]、分治算法[14]和贪心算法[15]对2017年8月28日4:01:05,4:01:25及4:01:45这3个时刻的目标进行卫星星座配置,通过比较3种算法对目标的丢失概率来衡量算法的优劣。

3种算法A_{opt}均采用90°,R_{detect}均采用1800 km。

3.3.1 利用动态规划算法对星座进行配置

采用动态规划算法对3个时刻的目标进行卫星星座配置,星座配置结果如表3所示。

表3 动态规划算法进行星座配置

Table 3 Dynamic programming method for constellation configuration

导弹编号	不同帧数下的星座配置		
	第1帧 4:01:05	第2帧 4:01:25	第3帧 4:01:45
Ⅰ	S32,S41,S43	S31,S37	S21
Ⅱ	S31,S47,S44	S22,S35	S37
Ⅲ	S23,S31,S36	S37,S42	S22
Ⅳ	S34,S42,S37	S24,S36	S25
Ⅴ	S25,S36,S22	S35,S45	S31
Ⅵ	S17,S27,S35	S16,S33	S43

结合表3数据可知,每一颗弹道导弹在每一帧中都有配置的星座对其进行探测,同时由表3数据并结合式(1)可以求出该算法下每一帧卫星星座配置方案对弹道导弹目标的丢失率分别为0.532,0.602,0.725。

3.3.2 利用分治算法对星座进行配置

采用分治算法对3个时刻的目标进行卫星星座配置,星座配置结果如表4所示。

表4 分治算法进行星座配置

Table 4 Divide-and-conquer algorithm for constellation configuration

导弹编号	不同帧数下的星座配置		
	第1帧 4:01:05	第2帧 4:01:25	第3帧 4:01:45
Ⅰ	S34,S43	S12,S24	S13
Ⅱ	S15,S32	S26,S32	S26
Ⅲ	S25,S44	S17,S31	S31
Ⅳ	S34,S47	S31	
Ⅴ	S37,S41	S32	
Ⅵ	S36,S45	S21	

结合表4数据可知,该算法随着帧数的增加,并不是都有配置的星座对导弹目标进行探测,而且每一帧配置的星座数变少,最终会导致丢失目标,同时,由表4数据并结合式(1)可以求出该算法下每一帧卫星星座配置方案对弹道导弹目标的丢失率分别为0.586,0.702,0.789。

3.3.3 利用贪心算法对星座进行配置

采用贪心算法对3个时刻的目标进行卫星星座配置,星座配置结果如表5所示。

表5 贪心算法进行星座配置

Table 5 Greedy algorithm for constellation configuration

导弹编号	不同帧数下的星座配置		
	第1帧 4:01:05	第2帧 4:01:25	第3帧 4:01:45
Ⅰ	S12,S33	S13,S46	
Ⅱ	S26,S37	S24	
Ⅲ	S31,S42	S26,S37	S26
Ⅳ	S34	S15	S41
Ⅴ	S41,S47	S36	
Ⅵ	S23	S27	

结合表5数据可知,该算法随着帧数的增加,每一帧配置的星座数明显变少,丢失目标几率大增,由表5数据并结合式(1)可以求出,该算法下每一帧卫星星座配置方案对弹道导弹目标的丢失率分别为0.618,0.724,0.812。

根据3种算法计算得出的卫星星座配置方案对弹道导弹目标的丢失率,可得图6。

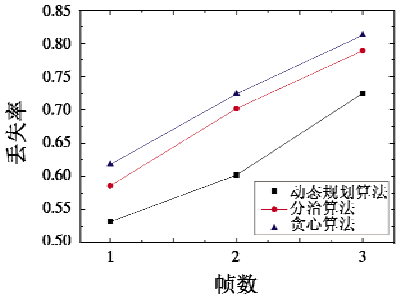

图6 3种算法目标丢失率比较

Fig.6 Comparison of target loss rate of three algorithms

通过表3~表5可知,3种算法均可实现对弹道导弹的探测,动态规划算法在卫星星座的资源配置方案中更容易实现并且方案可行性高,分治算法对卫星星座的资源配置能力优于贪心算法。同时,由图6可知,3种算法都可以通过卫星星座资源优化配置实现对目标的有效探测,但是3种算法中,动态规划算法效果较好,目标的丢失率较低,分治算法对复杂问题的求解过程存在丢解的情况,从而增大了目标丢失概率,贪心算法作为集中式算法存在容易陷入局部最优解的缺点,所以丢失目标的概率最高。

(下转第25页)

参考文献

[1] 王金云,王孟军. 反舰导弹发展趋势分析及其末端防御[J]. 现代防御技术,2012,40(3):14-17,38.

[2] 杨卫丽,耿国桐,李秋娜,等. 国外反舰导弹发展初步分析[J]. 战术导弹技术,2014(2):1-6.

[3] 袁华,严必虎. 外军反舰导弹装备使用现状及发展趋势研究[J]. 国防科技,2014,35(6):46-50.

[4] 张金春,张晶,张书宇,等. 反舰导弹对海目标饱和攻击辅助决策系统研究[J]. 战术导弹技术,2014(2):21-27.

[5] 张书宇,张金春,李雪梅. 多方向饱和攻击时反舰导弹航路规划方法[J]. 兵工自动化,2012,31(11):6-9.

[6] 刘钢,老松杨,谭东风,等. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报,2013,39(4):347-355.

[7] 张承果,丁勇,申兴盼. 基于量子双向 RRT 算法的多平台反舰导弹协同航路规划[J]. 火力与指挥控制,2017,42(4):36-41.

[8] 陈榕,沈培志,张海峰,等. 多型反舰导弹协同攻击岛礁区目标攻击方向选择研究[J]. 电光与控制,2016,23(5):22-25.

[9] 李红亮,宋贵宝,曹延杰. 多反舰导弹攻击多目标协同航路规划[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(10):2102-2109.

[10] 王建国,徐晓刚,高军亮. 基于目标点的反舰导弹航路规划方法[J]. 火力与指挥控制,2008,33(s):119-124.

[11] 陈玉文. 反舰导弹航路规划快速搜索算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(20):6424-6428.

[12] 郭新奇,严建钢,郑宝华. 反舰导弹预设航路末端攻击角选取问题[J]. 火力与指挥控制,2010,35(10):118-119,130.

[13] 李相民,孙瑾,谢晓方,等. 火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[14] 曾家有,宋友凯,车志宇. 基于航路规划的反舰导弹发射顺序和间隔研究[J]. 航天控制,2009,27(2):22-25.

(上接第 12 页)

4 结束语

本文提出了基于动态规划算法的多目标卫星星座资源优化配置方案。该方法从本质上讲是一种非线性规划方法,原理可归结为一个基本递推关系式,通过将预警卫星星座单帧时间内可观测到弹道目标的星座作为一种资源进行分配,建立星座方案评价函数,使丢失弹道目标的可能性最小,从而达到不丢失目标或部分状态信息的目的。仿真表明,该算法针对多目标跟踪探测问题给出了较为合理的卫星星座资源配置方案,在既定目标下满足最优的原则,通过与其他算法对比,更有效地证明了该算法可以使卫星星座资源得以发挥其最大的作用。但是本文也存在着评价函数不够科学的问题,同时未考虑到卫星星座的不确定性及其寿命对实现连续高概率探测目标的影响,这些将在下一步工作中继续研究。

参考文献

[1] 常辉,胡修林,张蕴玉. 基于 CART 算法的卫星星座原始构型选择策略[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(6):1-5.

[2] 胡敏,宋旭民,杨雪榕. 基于 Petri 网的 Walker 导航星座备份策略研究[J]. 航天器工程,2017,26(2):14-21.

[3] 林宇生,蒋洪磊,董彦磊,等. 基于遗传算法的通信卫星资源动态调度方法研究[J]. 无线电工程,2017,47(6):20-23.

[4] 朱卫宵,祝前旺,陈康. 一种基于遗传算法的多传感器目标分配方法[J]. 电子信息对抗技术,2015,30(3):30-34.

[5] 刘文,张育林,刘昆. 基于多目标进化算法的卫星通信星座优化设计[J]. 宇航学报,2008,29(1):95-99.

[6] 郑蔚. 模型多目标演化算法(OMEA)在星座优化设计中的应用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2007.

[7] FAGGIAN S, GOZZI F. Optimal investment models with vintage capital:dynamic programming approach[J]. Journal of Mathematical Economics, 2010, 46(4):416-437.

[8] CHEN S. A dynamic programming implemented resource competition game theoretic model[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(16):1847-1851.

[9] 李端,钱富才,李力,等. 动态规划问题研究[J]. 系统工程理论与实践,2007(8):56-64.

[10] STEFFEN P, GIEGERICH R. Table design in dynamic programming[J]. Information and Computation, 2006, 204(9):1325-1345.

[11] 李强. 动态规划算法时间效率优化策略研究[D]. 武汉:中南民族大学,2015.

[12] 张士磊,张朋,熊志刚. 基于改进蝙蝠算法的多传感器多目标分配[J]. 电光与控制,2018,25(4):92-96.

[13] 雷科,林忠贤. 基于动态规划的制导滑翔炸弹最优控制研究[J]. 电光与控制,2012,19(7):28-31.

[14] 刘洋,唐好选. 针对路面建模的 Delaunay 三角网格分治算法[J]. 智能计算机与应用,2017,7(2):87-89.

[15] 孙启豪,蔡爱华. 航空搜潜布阵航路优化研究[J]. 电光与控制,2017,24(4):39-42.