

文章编号: 1001-2486(2011)01-0149-06

空域频域不确定条件下电磁探测卫星规划方法研究*

王慧林, 黄 维, 邱涤珊, 伍国华

(国防科技大学^{C1}ISR技术国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:电磁探测卫星对区域目标的覆盖搜索在反恐及海上搜救等领域发挥着重要作用。针对电磁探测卫星区域搜索任务中存在的空域频域不确定性,构建了电磁探测卫星区域搜索问题(EDSASP)中不确定因素的量化描述模型及决策要素模型,提出了基于贝叶斯决策的电磁卫星任务规划方法,并以信息探测收益和前端截获收益为优化目标,建立了空域频域不确定条件下电磁探测卫星规划问题的数学模型。仿真实例表明,该方法能够有效解决空域频域不确定条件下多星搜索探测问题,并且性能良好。

关键词:电磁探测卫星;空域频域不确定性;区域搜索;探测规划控制;贝叶斯决策

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Research on Electromagnetic Detection Satellites Scheduling Technique under Uncertain Space-frequency Domain Environments

WANG Hui-lin, HUANG Wei, QIU Di-shan, WU Guo-hua

(National Key Laboratory of Information Systems Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Electromagnetic detection satellite(EDS) holds a significantly important role in the fields of antiterrorism and salvage. Considering the uncertainties of the electromagnetic detection satellite area search tasks in space-frequency domain, the uncertain factors' quantitative description models of the EDS area search problem(EDSASP) were proposed. So were the decision elements' models. An EDS task scheduling technique based on Bayesian decision-making was put forward, and the EDS scheduling model in uncertain space-frequency domain environments was also established, aiming to optimize the objectives of the information detecting reward and the front interception reward. The simulation instances demonstrate that the technique can effectively deal with the EDS detecting problem and the performance goes on well.

Key words: electromagnetic detection satellites; the uncertainties in space-frequency domain; area search; detection scheduling and controlling; Bayesian decision-making

电磁探测卫星(electromagnetic detection satellite, EDS)是一种搜集其星下点轨迹附近一定范围内的电磁信号的侦察卫星,其对大范围区域目标内未知电磁辐射源的覆盖探测在反恐作战、航海安全及海上搜救等领域中发挥着重要作用。针对给定探测区域内存在的空域、频域、时域等多种不确定性,如何利用先验信息引导电磁卫星的后续规划,形成最优侦察决策以完成对区域的高效覆盖侦察,已成为电磁探测卫星应用领域急需解决的新课题,其军事应用前景亦十分广阔。

目前,关于多星规划问题的研究主要集中在成像卫星领域:BurrowBridge^[1]讨论了面向地面测控资源优化分配的多星调度问题,在他的调度模型中未考虑观测需求、图像获取和数传等因素;

Globus^[2]等研究了一般的多星联合调度问题,其中考虑了任务需求的优先级以及每颗卫星载有多遥感器的约束条件,但没有给出具体的模型表示和算法实现细节;Frank^[3]等在研究对地观测卫星调度问题时给出了一种基于约束的模型表示和描述方法,不足点是所有观测任务在调度之前必须声明其需求的资源,且所给算法只能对一些小规模问题进行处理。Morris^[4]等研究了对地观测卫星编队调度问题,介绍了一种名为DESOPS的卫星调度系统,但没有给出调度系统具体采用的模型及算法;慈元卓^[5]研究了面向移动目标搜索的多成像卫星规划问题,建立了离线及在线等多种规划模型对问题进行刻画描述,并取得了一定的应用效果;阮启明^[6]等建立了面向区域目标的成像

* 收稿日期:2010-05-16

基金项目:国家973重点资助项目(97361361)

作者简介:王慧林(1983—),男,博士生。

卫星调度模型并基于邻域搜索进行求解。

电磁探测卫星规划与成像卫星规划有相似之处,但电磁卫星规划受到更多的特有机制及约束的限制,更为复杂。目前电磁卫星规划方面能够检索到的文献还比较少:阙渭焰^[7]等对电磁探测卫星的能力进行了探析;赵玉普^[8]等对电磁探测卫星侦察预案进行了设计与实现;陈浩^[9]等研究了电子侦察卫星多星规划问题,并采用基于动态罚函数的遗传算法进行求解;王迪^[10]等比照成像卫星规划问题建立了电子侦察卫星整数规划模型,并使用遗传算法求解;王慧林^[11]等建立了电子侦察卫星综合规划问题的多目标数学模型,并采用一种遗传退火算法进行求解。上述针对电磁探测卫星规划问题的研究存在如下不足:

(1)未充分考虑电磁探测过程中存在的多种不确定性因素,将问题简化为确定性问题进行处理;

(2)未考虑探测过程的整体性及侦察结果间的递进关系,没有形成基于实时信息反馈的规划引导闭环。

针对上述问题,本文将探讨在空域频域动态不确定条件下如何把多星探测活动进行无缝衔接,基于先验信息对后续的卫星活动进行引导控制,以得到最优侦察决策并高效地执行多星对区域目标搜索任务。

1 问题描述

本文所研究的电磁探测卫星规划问题是指:在综合考虑目标空域、频域、时域等不确定性及电磁探测卫星能力的基础上,使用多星对任务区域中的目标辐射源进行搜索,并确定各星载接收机的历次开关机时间、搜索频段等规划要素,在任务时间内最大限度地降低区域的不确定性,并发现更多的目标。

由于电磁探测卫星及目标辐射源工作体制的特殊性,卫星区域搜索过程中,存在如下不确定性:

(1)频域不确定性:由目标辐射信号的频域参数(载频、带宽、调制方式等)未知而引起的不确定性;

(2)时域不确定性:由目标辐射源信号的时域参数(脉冲到达时间、脉冲宽度、重复周期、天线扫描方式等)未知而引起的不确定性;

(3)空域不确定性:由目标辐射源的位置参数(经纬度、高度等)未知而引起的不确定性;

(4)环境不确定性:探测区域电磁环境复杂,

由各种电磁噪声及干扰信号综合作用而导致的电磁环境不确定性。

研究面向区域搜索任务的电磁探测卫星多星规划方法,就是要在上述不确定条件下,对各卫星及星载接收机进行规划,以提高探测效率。本问题涉及要素多,背景复杂,同时还受到多重不确定性因素的影响,为便于后续工作的开展,本文暂不考虑时域不确定性,假定目标辐射源始终开机,只针对目标辐射源的空域频域不确定性进行建模描述,并探讨基于先验信息的后续规划策略。

2 规划要素分析

图1是某电磁卫星过境时的对地探测示意图,本文所研究的问题是在多目标辐射源的位置及工作频率不确定的条件下,如何根据某卫星在 t_n 时刻的观测结果合理安排下一卫星在 t_{n+1} 时刻的观测计划,从而提高对区域侦察的效果。

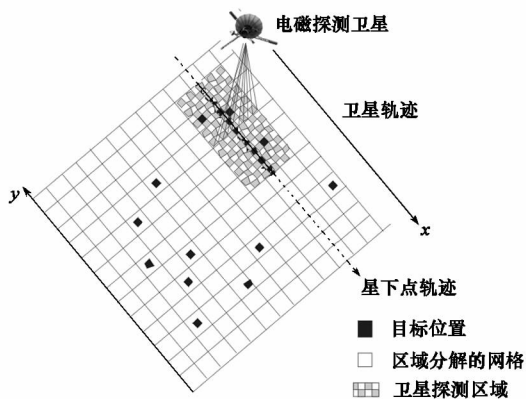


图1 电磁探测卫星活动示意图

Fig.1 The illustration of the detecting process of the EDS

2.1 区域处理技术

为便于规划处理及统计,借鉴文献[6]的区域分割方法,将搜索区域 $Area$ 分割为 N 个独立的单位方格进行统一规划,区域中分布着若干个位置及工作频率不确定的目标辐射源,如图1所示。假定每个网格中最多只能存在一个电磁目标,每个网格的状态为 $S_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, N$,若网格 i 中存在目标则 $S_i = 1$,否则 $S_i = 0$ 。设 t_n 时刻网格 i 中存在目标的概率为 $Pr_i(t_n)$, $i = 1, \dots, N$, $Pr_i(t_n) \in [0, 1]$ 。鉴于香农熵理论在不确定性衡量方面的适应性,引入熵值对区域进行定量描述,则 t_n 时刻 $Area$ 内第 i 个网格的不确定性为^[12]

$$H_i(t_n) = -Pr_i(t_n)\log_2(Pr_i(t_n)) - (1 - Pr_i(t_n))\log_2(1 - Pr_i(t_n)) \quad (1)$$

2.2 星载接收机探测

电磁探测卫星利用星载接收机从轨道上对目

标电磁辐射信号实施探测。在实际应用中,卫星根据接收天线的方向图形成瞬时探测条带,若目标辐射的电磁信号与接收天线方向满足一定的空间关系,且接收机接收到的信号电平高于信号检测门限,即可实现对目标辐射信号的前端截获。由于各种不确定因素的影响,星载接收机工作过程中,存在前端截获概率 Pr_c 、漏警概率 Pr_l 及虚警概率 Pr_f ,具体定义如下:

定义 1 前端截获概率:目标在卫星探测区域内,星载接收机能够排除噪声干扰而截获目标辐射电磁波的概率,记为 Pr_c ;

定义 2 漏警概率:目标在卫星探测区域内,但由于噪声的干扰,目标信号的幅度可能低于检测门限,星载接收机未能截获目标辐射电磁波的概率,记为 Pr_l ,且 $Pr_l = 1 - Pr_c$;

定义 3 虚警概率:目标不在卫星探测区域内,但由于噪声信号的幅度超过了检测门限,星载接收机误报截获目标辐射电磁波的概率,记为 Pr_f 。

将全部卫星在规划时域 $[TStart, TEnd]$ 内过境区域 $Area$ 的所有时刻点按时间先后次序进行排列,以这些时刻点作为决策时刻点,定义决策点集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N\}$ (T 为有限集)。设 t_n 时刻过境的卫星为 s ,以 $[t_n^s, tEnd_n^s]$ 表示卫星 s 在 t_n 时刻过境时的整个探测时间窗口, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示经离散化处理后的星载接收机可以选择的侦察频段集合,侦察过程中接收机采用扫频的方式遍历集合 F ,从而覆盖全频段。为降低问题复杂性,建模过程中作如下假设:

(1) 卫星每次过境只选择一个工作频段 f_i 进行探测;

(2) 受观测系统的实际工作能力所限,设定星载接收机每次开机的最长工作时间为 T_{max} ,则卫星每次可侦察的区域面积受限;

(3) 卫星每次过境只开机探测一次,开机时间点离散化为探测条带边界正好与网格边界相重合的各时间点。记卫星 s 在 t_n 时刻过境区域时的候选开机时间集合为 $TStart_n^s = \{tstart_{n,1}^s, tstart_{n,2}^s, \dots, tstart_{n,m}^s\}$, $tstart_{n,m}^s \in [t_n^s, tEnd_n^s]$ 。

2.3 决策要素

卫星探测过程中,选择不同的工作频段及开机时间对区域的覆盖及探测结果是不同的,卫星每次过境具有多种探测选择,这些选择构成了卫星搜索候选行动集。定义卫星 s 在 t_n 时刻过境

时的候选行动集为

$$Action_n^s = \{a_{n,1}^s, a_{n,2}^s, \dots, a_{n,N}^s\}$$

其中 $a_{n,i}^s = I(f_h, tstart_{n,k}^s)$, $f_h \in F$, $tstart_{n,k}^s \in TStart_n^s$ 为此时可供卫星选择的第 i 个探测策略, $I(f_h, tstart_{n,k}^s)$ 表示探测频段、开机时间等侦察要素的组合模式,则该次过境的候选行动集中候选行动策略的数量 $|Action_n^s| = |F| \times |TStart_n^s|$ 。

设 t_n 时刻卫星 s 过境任务区域时选择的行动为 a , $a \in Action_n^s$, 定义行动 a 对应的探测区域包含的网格集合为 $G_a = \{g_{i_1}, g_{i_2}, \dots, g_{i_n}\}$, g_{i_n} 表示编号为 i_n 的网格,且 $|G_a| = n$ 。

2.4 基于贝叶斯规则的目标分布

随着电磁探测过程的深入,区域实时信息将不断获得反馈,区域状态将变得明朗并持续更新,而这些实时更新的概率状态即可用作引导后续过境卫星的观测活动。当卫星 s 在 t_n 时刻选择策略 a , $a \in Action_n^s$ 进行探测时,探测网格集合为 G_a ,对任意网格 $i \in Area$,其目标分布概率更新规则为

(1) 若 $i \notin G_a$,则 $Pr_i(t_{n+1}) = Pr_i(t_n)$;

(2) 若 $i \in G_a$,采用贝叶斯更新规则,设 C 和 E 分别代表发现目标事件和目标在网格 i 中的事件,则

(a) t_n 时刻采取策略 a 探测发现目标的情况下, t_{n+1} 时刻目标分布概率更新为:

$$\begin{aligned} Pr_i(t_{n+1}) &= Pr(E | C, a) \\ &= \frac{Pr(C | E) Pr(E)}{Pr(C | E) Pr(E) + Pr(C | \bar{E}) Pr(\bar{E})} \\ &= \frac{Pr_i(t_n) Pr_c}{Pr_i(t_n) Pr_c + (1 - Pr_i(t_n)) Pr_f} \end{aligned} \quad (2)$$

(b) t_n 时刻采取策略 a 探测未发现目标的情况下, t_{n+1} 时刻目标分布概率更新为

$$\begin{aligned} Pr_i(t_{n+1}) &= Pr(E | \bar{C}, a) \\ &= \frac{Pr(\bar{C} | E) Pr(E)}{Pr(\bar{C} | E) Pr(E) + Pr(\bar{C} | \bar{E}) Pr(\bar{E})} \\ &= \frac{Pr_i(t_n) Pr_l}{Pr_i(t_n) Pr_l + (1 - Pr_f)(1 - Pr_i(t_n))} \end{aligned} \quad (3)$$

3 电磁探测卫星规划模型

3.1 侦察收益定义

在不确定环境下,从两个方面定义电磁卫星对地探测收益:探测信息收益和探测前端截获收益。

(1)探测信息收益:侦察活动所带来的区域不确定性信息熵的减少量,其实质为卫星 s 在 t_n 时刻选择策略 a ($a \in Action_n^s$) 进行探测所导致的区域不确定性的变化量,在 t_n 时刻不确定性的基础上定义对区域实施探测的信息收益为

$$O_i(t_n, a) = \sum_{i \in G_a} (H_i(t_n) - H_i(t_{n+1})) \quad (4)$$

(2)探测前端截获收益:在接收机扫频工作模式下,截获、定位及确认区域中存在目标辐射源而获得的收益。为此,卫星应该尽量选择对目标位置分布概率高的地区进行探测。在目标分布先验概率为 $Pr_i(t_n)$ 及接收机扫频工作的情况下,定义对网格 i 进行探测的前端截获收益为先验概率与频域前端截获概率的乘积,即 $Pr_i(t_n)Pr_c$, 则卫星 s 在 t_n 时刻卫星选择策略 a ($a \in Action_n^s$) 进行探测的前端截获收益函数为:

$$O_c(t_n, a) = \sum_{i \in G_a} Pr_i(t_n)Pr_c \quad (5)$$

需要指出的是,这两个目标之间并无依赖关系,且不总是兼容的,有时甚至可能存在竞争:为了增加探测收益,减少环境的不确定性,需要安排卫星对区域内目标分布概率为 0.5(此时网格信息完全未知,由不确定性计算公式(1)可得此时该位置的不确定性最大)附近的位置进行探测;而为了截获和确认目标,需要安排卫星对目标分布概率高的位置进行探测。为取得探测信息收益和前端截获收益这两个优化目标之间的偏好平衡,定义卫星 s 在 t_n 时刻选择策略 a ($a \in Action_n^s$) 进行探测的目标函数为二者的线性组合:

$$O(t_n, a) = (1 - \lambda)O_i(t_n, a) + \lambda O_c(t_n, a) \quad (6)$$

其中, $\lambda \in [0, 1]$ 表示信息收益和探测截获收益两个目标函数之间的权重信息,通过改变 λ 的取值可以调整二者的相对重要度,以满足决策者特定的偏好需求。

3.2 电磁探测卫星规划模型

空域频域不确定条件下多星协同规划就是要基于以往的探测信息,对下一时刻的状态进行预测和权衡,形成决策控制闭环,进而求取能够获得最大累计探测收益的卫星探测活动序列 $Action^* = \{a_1^*, a_2^*, \dots, a_m^*\}$, 即从任意的目标先验信息出发规划出整体最优的卫星探测计划。

3.2.1 基于先验概率的侦察收益预测方法

卫星 s 在 t_n 时刻选择策略 a ($a \in Action_n^s$) 进行探测之前进行收益预测时,无法确知本次是否发现目标,相应地也就无法利用贝叶斯更新规则

计算 t_{n+1} 时刻目标分布的概率及区域不确定性,因此本文采用一种乐观规则来预测 t_n 时刻选择策略 a 进行探测是否会发现目标及该策略的期望收益,进而获得下一时刻 t_{n+1} 的目标分布先验概率的估计 $\hat{Pr}_i(t_{n+1})$ 。定义发现目标的阈值 δ , 对所有卫星,如果 $Pr_i(t_n) \geq \delta$, $i \in G_a$, 则认为卫星在 t_n 时刻选择策略 a 对网格 i 探测时能发现目标,否则认为卫星不能发现目标。由此则可以根据式(1)~(3)获得 t_n 时刻采取策略 a 时下一时刻的先验概率 $\hat{Pr}_i(t_{n+1}, a)$ 及先验熵 $\hat{H}_i(t_{n+1}, a)$, 则卫星在 t_n 时刻选择策略 a ($a \in Action_n^s$) 实施探测的期望信息收益为

$$\hat{O}_i(t_n, a) = \sum_{i \in G_a} (H_i(t_n) - \hat{H}_i(t_{n+1}, a)) \quad (7)$$

因为本文处理的是静止目标,所以探测前端截获收益预测 $\hat{O}_c(t_n, a)$ 可直接按式(5)进行求解。

3.2.2 规划模型

本文采用实时侦察信息对区域状态进行更新,利用前次探测结果更新后续规划模型中的参数,求解出卫星每次过境时的探测方案,以循环引导的方式进行规划直到探测任务结束。

设全部卫星在规划时域 $[TStart, TEnd]$ 内过境区域 $Area$ 的所有时刻点按时间先后次序排列为 $t_1, \dots, t_n, \dots, t_N$, 决策时刻点集合 $T = \{t_1, \dots, t_n, \dots, t_N\}$, 则本文问题的数学规划模型为:

$$V_n = \max_{a \in Action_n^s} ((1 - \lambda)\hat{O}_i(t_n, a) + \lambda\hat{O}_c(t_n, a)) \quad (8)$$

进一步将该目标函数写为

$$V_n = \max_{a \in Action_n^s} ((1 - \lambda) \sum_{i \in G_a} (H_i(t_n) - \hat{H}_i(t_{n+1}, a)) + \lambda \sum_{i \in G_a} \hat{Pr}_i(t_n, a)Pr_c) \quad (9)$$

该目标函数表示卫星 s 在 t_n 时刻过境时要选择执行使综合侦察收益增长最大的候选活动,在给定任务时域 $[TStart, TEnd]$ 内,通过对多星多次过境的综合侦察收益进行累加 ($\sum V_n$), 即可使多颗卫星的累计期望探测收益最大。此外,模型需要满足下述约束:

(1)只能在卫星过境时刻点 $t_1, \dots, t_n, \dots, t_N$ 进行决策;

(2)卫星在任务时域以外的侦察活动不产生收益,即 $V_{N+1} = 0$, 该约束确定了本规划问题的时域边界;

(3) $\forall a \in Action_n^s, a = I(f_h, tStart_{n,k}^s)$, 必须满

足条件:探测频率 $f_h \in F$, 探测开始时间点 $tstart_{n,k}^s \in TStart_n^s$, 其中 F 是接收机的候选探测频率集合, $TStart_n^s$ 是 t_n 时刻过境探测区域的卫星 s 可选的候选开机时间集合;

(4) 卫星每次开机探测时间不能超过其单次最长工作时间, 即必须满足工作时间约束: $\Delta t \leq T_{max}$;

(5) 卫星每次开机侦察所消耗能量不能大于卫星当前剩余能量 E_r , 即: $e \cdot \Delta t \leq E_r$ (侦察耗能能与侦察时间成正比, e 为单位时间侦察耗能)。

4 仿真实验

为了验证本文方法的有效性, 进行如下仿真实验: 多星在 24h 内对任务区域 $Area(70^\circ E \sim 76^\circ E, 25^\circ N \sim 50^\circ N)$ 进行电磁搜索探测, 区域内随机分布了对卫星系统而言位置未知的 10 个目标。将 $Area$ 离散为 25 列 \times 4 行的 100 个网格并投影到平面直角坐标系中, 其中 t_0 时刻所有网格内目标分布的初始先验概率为 $Pr_i(t_0) = 0.5$ 。星载接收机的探测频段离散为 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ 五种模式, 由 2.2 节假设(2)可知某卫星 s 在 t_n 时刻过境的候选开机时间集合所含元素数为 $|TStart_n^s| = 24$, 即 $TStart_n^s = \{tstart_{n,1}^s, tstart_{n,2}^s, \dots, tstart_{n,24}^s\}$, 进一步有 t_n 时刻该卫星可选探测策略为 $|Action_n^s| = |F| \times |TStart_n^s| = 120$ 个。其他相关参数设为: $Pr_c = 0.8$, $Pr_l = 0.2$, $Pr_f = 0.1$, $\delta = 0.6$, 仿真时长 $T = 70$ 。实验设计的评价指标为: (1) 截获目标的数量; (2) 区域剩余不确定性比例。

由于本文问题与面向移动目标搜索的成像卫星规划问题具有一定的相似性(均为对区域中的未知目标进行搜索), 为了验证本模型的有效性, 引入另外两种在成像卫星对移动目标搜索中应用较成功的规划模型^[5]进行对比: 随机模型和均匀覆盖模型, 随机模型中各卫星每次过境时在接收机探测频率和开始时间约束下随机选择策略 $a(a \in Action_n^s)$ 进行探测; 均匀覆盖模型中各卫星每次过境时选择目前探测次数最少的网格进行探测, 寻求覆盖的均匀性。

对三种模型各进行 30 次仿真, 历次仿真结果见图 2、3; 为消除随机误差的影响, 对运算结果取均值, 三种模型的平均性能比较如图 4、5 所示。

由图 2~5 知, 本文模型应用效果最好, 截获的目标数量最多, 发现 9 个以上目标的概率为 0.87, 区域剩余不确定性指标与均匀覆盖模型获得的结果相近; 随机模型性能最弱, 截获目标数量

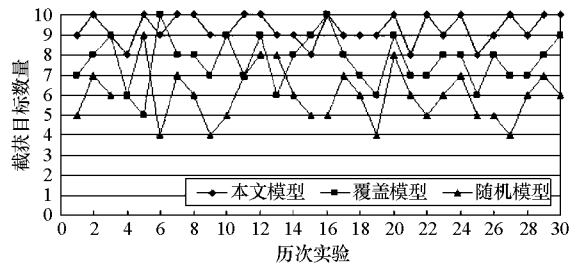


图 2 历次仿真截获目标数量
Fig. 2 The number of intercepted targets in every simulation experiment

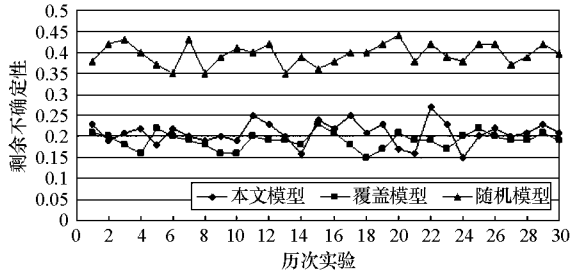


图 3 历次仿真剩余不确定性
Fig. 3 The remaining uncertainty in every simulation experiment

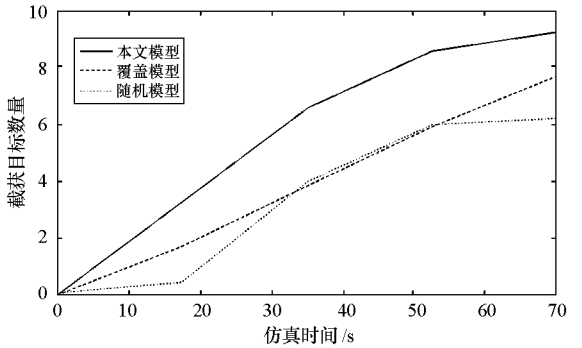


图 4 平均截获目标数量
Fig. 4 The average number of intercepted targets

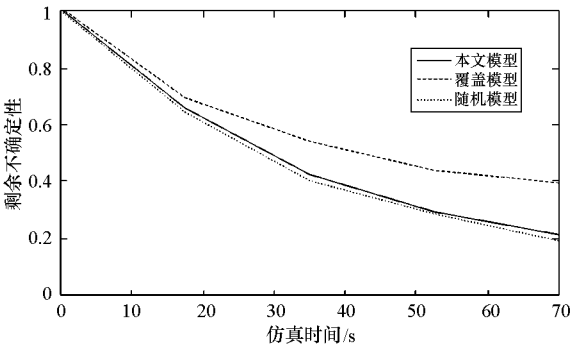


图 5 平均剩余不确定性
Fig. 5 The average remaining uncertainty

最少, 区域剩余不确定性大; 均匀覆盖模型性能居中, 能有效降低区域不确定性, 但截获目标的效率不如本文模型高。综上, 本文所提方法能够初步解决空域频域不确定条件下电磁探测卫星区域搜索问题, 且性能良好。

5 结论

针对空域频域不确定条件下电磁探测卫星规划问题进行了研究,提出了基于贝叶斯决策的多星任务规划方法,并建立了问题的规划模型,仿真显示该模型具有较好的应用性能。但是,由于本文所研究问题尚处于起步阶段,为便于研究展开所做的假设使得卫星规划难度有所降低,限制了卫星多频段、多时段开机的侦察能力,所取得的侦察效果还不能达到最佳状态。后续工作将进一步探讨更加贴近实际情况的空域频域不确定规划问题,并结合对问题有较大影响的时域不确定性加以研究;同时,目标分布的先验概率、前端截获概率、虚警概率等参数的科学性对多星协同探测方案的制定所产生的影响亦是进一步研究论证的方向。

参考文献:

- [1] BurrowBridge S. Optimal Allocation of Satellite Networks Resource [D]. Thesis of American Air Force Institute of Technology, 1999.
- [2] Globus A, Crawford J, Lohn J, et al. Scheduling Earth Observing Fleets Using Evolutionary Algorithms: Problem Description and Approach[C]//Proc. of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, NASA, 2002.
- [3] Frank J, Jonsson A, Morris R, et al. Planning and Scheduling for Fleets of Earth Observing Satellites [C]//Proc. of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space 2002, Montreal, 2002.
- [4] Morris R, Dungan J, Gasch J, et al. Coordinated Science Campaign Planning for Earth Observing Missions [C]//Proc. ESTC2004, NASA, 2004.
- [5] 慈元卓. 面向移动目标搜索的多星任务规划问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 2008.
- [6] 阮启明, 谭跃进, 李永太. 基于约束满足的多星对区域目标观测活动协同[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 238-242.
- [7] 阙渭焰, 林世山. 电子侦察卫星能力探析[J]. 卫星应用, 2004, 12(1): 45-51.
- [8] 赵玉普, 冯书兴, 白红莉. 电子侦察卫星侦察仿真预案设计与实现[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(3): 93-96.
- [9] 陈浩, 李军, 唐宇, 等. 基于动态罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 44-50.
- [10] 王迪, 祝江汉, 薛波. 基于 GA 的电子侦察卫星任务规划问题研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 53-56.
- [11] 王慧林, 黄小军, 马满好, 等. 电子侦察卫星任务调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1695-1699.
- [12] Yang Yanli, Minai Ali A, Polycarpou Marios M. Decentralized Cooperative Search in UAV's Using Opportunistic Learning[C]//Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, 2002.