

天基预警系统多体制传感器综合调度方法*

刘冰, 易泰河, 申镇, 易东云

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要:为提高天基预警系统对多目标的跟踪能力,提出扫描传感器纬度区间扫描模式和凝视传感器目标群跟踪模式,并基于此种模式设计基于聚类的扫描传感器纬度区间扫描调度方法和凝视相机目标群跟踪调度方法。由于诸多传感器的工作模式、探测频率、测量误差、视场模型均不相同,推导不同探测频率、视线误差的多传感器联合观测跟踪的克拉美-罗下界计算公式。综合运用以上方法,建立多体制传感器综合调度优化方法。仿真试验表明,该方法比传统工作模式下的系统对多目标具有更高的跟踪精度。

关键词:导弹预警卫星;多目标跟踪;传感器调度;后验克拉美-罗下界;主动段目标

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)02-018-09

Multi-model sensor management for space-based missile warning satellite system

LIU Bing, YI Taihe, SHEN Zhen, YI Dongyun

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to improve the performance of space-based missile warning system in tracking multi-target, the latitude-zone scan mode and target-group track mode were proposed for the scanner and tracker respectively. Based on these modes, the scan sensor and track sensor management algorithms were proposed. For the multi-model sensors, their working mode, the scanning frequency, the measurement error and the field-of-view differ from each other, an observation tracking Cramer-Rao formula was derived. Finally, a multi-model sensor management algorithm based on the above methods was proposed. Results show that the proposed algorithm has a higher tracking accuracy for multi-target than the system in traditional working mode.

Key words: missile warning satellite; multi-target tracking; sensor management; posterior Cramer-Rao lower bound; target in boost-phase

预警卫星系统可以提供弹道导弹发射点、射向、落点等早期预警信息,为反导拦截提供引导^[1]。目前美国建立有完整的预警卫星系统,包括4~5颗天基红外系统同步轨道卫星(Space Based Infrared System-GEostationary Orbit, SBIRS-GEO)^[2],上面装备以每秒0.5~1帧的频率进行南北扫描的大视场线阵扫描传感器和对目标进行高精度高频探测的小视场跟踪传感器;通过扫描传感器对北半球地区进行监视的两颗天基红外系统大椭圆轨道卫星(Space Based InfraRed System-Highly Elliptical Orbit, SBIRS-HEO)^[2-3];采用自旋方式对预警空域扫描的若干颗防御支援计划(Defense Support Program, DSP)预警卫星。

预警卫星传感器调度是预警卫星系统运行管理中的一个重要问题,是系统在线任务规划的关键环节,在预警卫星所监视的区域内发现有多个

导弹目标发射时显得尤其重要^[4]。文献[4-5]研究了高轨预警卫星的资源调度方法,分别采用并行禁忌遗传算法和模拟退火算法求解优化调度方案。文献[6-14]研究了低轨卫星的调度优化方法。以上的研究均假设凝视传感器仅能跟踪一个目标,而扫描传感器不可调度^[15],这样的工作模式与调度方法使系统对复杂的多目标并发场景预警能力很弱。

针对以上问题,本文提出了一种改进的预警探测模式:凝视相机调度支持对目标群的跟踪,扫描相机在不丢失目标的情况下减小扫描镜摆动范围,从而缩短摆动周期,提高对剩余导弹弹道估计精度。本文创新点主要有两点:一是提出了一种提高多目标跟踪能力的改进的传感器工作模式;二是推导了多体制传感器联合观测跟踪下的克拉美-罗(Cramer-Rao, CR)下界,可作为探测频率、

* 收稿日期:2015-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61370013)

作者简介:刘冰(1986—),男,吉林吉林人,博士研究生,E-mail:liubeing@126.com;

易东云(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:dongyunyi@sina.com

探测精度存在差异的传感器网络资源调度的目标函数,设计了高轨预警卫星情况下的多体制多传感器多目标跟踪调度优化算法,最后通过仿真算例验证其有效性和优越性。

1 改进的传感器调度模式

面向导弹探测与跟踪的天基导弹预警系统传感器工作过程如图1所示。按照预警场景中是否存在导弹目标,预警卫星传感器的工作模式可分为常规监视模式(六边形框)和目标跟踪模式(矩形框),工作模式的切换由是否探测到导弹目标而决定。当探测到新增或减少的目标时,资源调度算法需要对更新的目标集合重新计算,更新调度方案。在传统目标跟踪模式^[16]中(矩形框中第一个虚线框)仅有天基红外系统(Space Based InfraRed System, SBIRS)卫星凝视相机在 DSP 卫星或 SBIRS 卫星扫描相机引导下进行指向调度。在这种模式下,系统高精度跟踪导弹的数目不能多于凝视相机的数目,而扫描相机对其余目标进行低帧频探测。该种工作模式可以应对少量导弹发射的场景,而对多目标同时进行高精度跟踪的能力有限。

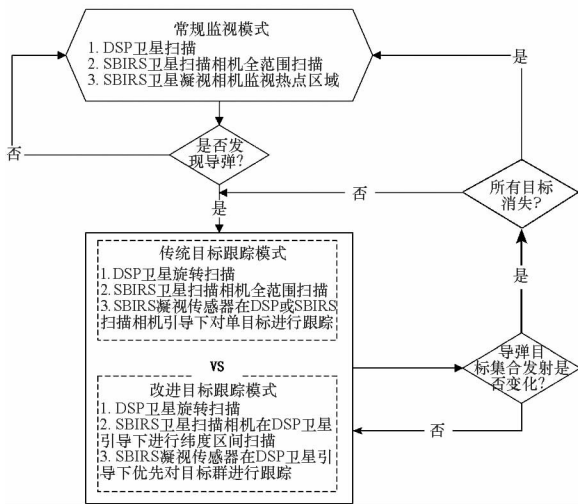


图1 天基导弹预警系统传感器工作过程
Fig.1 Working process of the sensors of the space based missile warning system

矩形框中第二个虚线框为改进目标跟踪模式,即 DSP 卫星引导 SBIRS 凝视相机指向和扫描相机进行纬度区间高频率扫描。取消凝视相机的同时仅能跟踪一个目标的约束条件,使其具有对目标群跟踪的能力。该种模式的改进有三点:一是对扫描相机进行了调度,提高了扫描相机对目标的探测频率;二是增加了凝视相机对目标群的

优先跟踪能力,提高了凝视相机跟踪目标的数目;三是可实现扫描相机和凝视相机对目标联合跟踪的优化。

图2是改进模式下传感器调度的基本思路,首先根据 DSP 卫星探测的导弹位置分布情况计算 SBIRS 卫星和导弹的可见性。然后对扫描相机和凝视相机的可行调度方案分别进行排列,并存储每种方案下的配置参数,将二者构成的笛卡儿空间作为综合调度的二维搜索空间。最后调用优化搜索算法(如遗传算法)对调度优化配置空间进行搜索,得到优化结果。

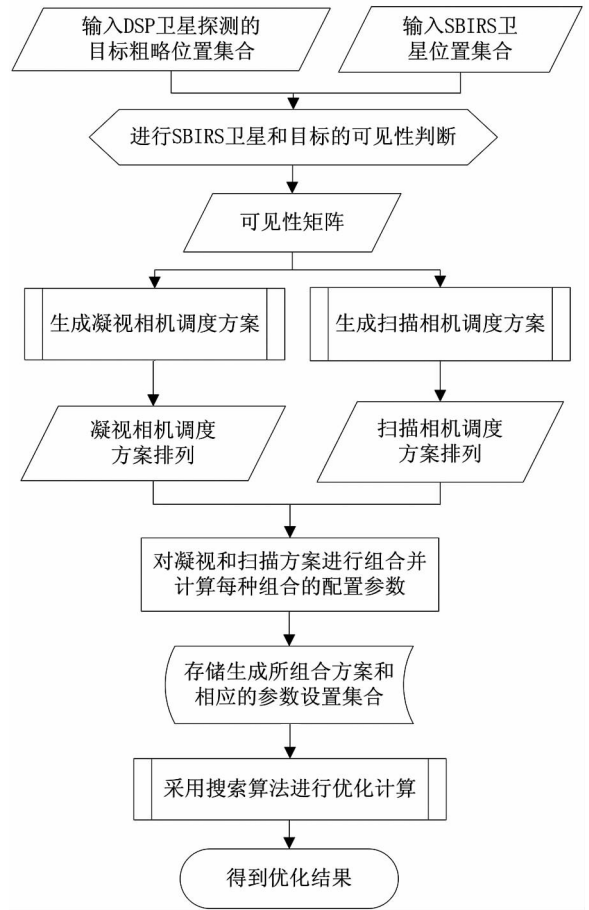


图2 调度算法流程

Fig.2 Flow of the sensor management

采用改进的调度方式可以提高系统应对复杂预警场景的能力,但调度的复杂度也大大增加。主要存在以下几个问题:

- 1) 不同传感器探测频率、视线误差均不相同,如何度量它们联合跟踪目标的跟踪精度,并将其作为调度的目标函数;
- 2) 如何生成扫描相机纬度区间扫描方案集合;
- 3) 如何生成凝视相机目标群跟踪模式下的调度方案集合。

2 多体制传感器联合跟踪精度指标

2.1 关机点状态估计性能度量

关机点的运动状态估计是预警系统输出最重要的预警信息之一。它为落点估计、目标跟踪交接提供必需的输入。因此将导弹关机点状态估计精度作为传感器优化控制的目标函数。在临近关机的几秒钟内,导弹所受地心引力的大小和方向变化很小,并假设推力加速度恒定,因此近似地认为在关机前的几秒钟内导弹做匀加速运动。运动状态可用常系数线性递推方程表示,如式(1)所示。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi \mathbf{X}_k \quad (1)$$

其中 $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k, \ddot{x}_k, \ddot{y}_k, \ddot{z}_k)^T$ 为导弹在地心地固坐标系 (Earth Centered Earth Fixed, ECEF) 下的位置、速度和加速度。状态转移矩阵为:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} h & \mathbf{I}_{3 \times 3} h^2/2 \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} h \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 \mathbf{O} 为零矩阵, h 为从上一状态递推到下一个状态的时间步长,为了保证模型截断误差控制在一定范围内,并保证传感器每次探测目标的状态都包含在状态序列之中,则需要 h 大小可变,如式(3)所示。

$$h = \min \{ h_0, t_{k+1} - kh_0 \} \quad (3)$$

其中, h_0 为最大递推步长(可人为设置),如果目标在 $k+1$ 状态时被测量,则 $k+1$ 状态对应的时刻为 t_{k+1} 。因此当目标处于 $k+1$ 状态时,观测量为:

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \begin{cases} h(\mathbf{X}_{k+1}) + \varepsilon, k+1 \text{ 状态被测量} \\ \emptyset, k+1 \text{ 状态未被测量} \end{cases} \quad (4)$$

其中观测量为目标相对于卫星的方位角 A 和俯仰角 E ,定义如下:

$$\begin{pmatrix} A \\ E \end{pmatrix} = h(l, m, n) = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{m}{l}\right) \\ \arctan\left(\frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2}}\right) \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 (l, m, n) 是卫星到目标的向量在 ECEF 坐标系下的坐标,即 $(l, m, n) = (x, y, z) - (x_s, y_s, z_s)$, (x_s, y_s, z_s) 为卫星坐标。对观测方程(5)关于目标的运动状态 \mathbf{X} 求导得:

$$\mathbf{H}^T = \nabla_{\mathbf{X}} h^T(l, m, n)$$

$$= \begin{pmatrix} -\frac{m}{l^2 + m^2} & -\frac{nl}{\sqrt{l^2 + m^2}(l^2 + m^2 + n^2)} \\ \frac{l}{l^2 + m^2} & -\frac{nl}{\sqrt{l^2 + m^2}(l^2 + m^2 + n^2)} \\ 0 & -\frac{\sqrt{l^2 + m^2}}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \\ \mathbf{O}_{6 \times 1} & \mathbf{O}_{6 \times 1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

文献[7]给出了计算观测量中包含目标运动状态 Fisher 信息量的迭代方法,如式(7)所示。

$$\mathbf{J}_{k+1} = (\mathbf{Q} + \Phi^T \mathbf{J}_k^{-1} \Phi)^{-1} + \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \quad (7)$$

其中, \mathbf{Q} 为模型误差矩阵, \mathbf{R} 为视线误差矩阵。因为式(1)未考虑模型误差,并假设式(4)中视线误差 $\varepsilon \sim (0, \sigma^2 \mathbf{I}_{2 \times 2})$,结合式(4),则式(7)可以写为:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{k+1} = (\Phi^T)^{-1} \mathbf{J}_k \Phi^{-1} + \sigma^{-2} (\mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{H}_{k+1}) \chi_{k+1} \\ \mathbf{J}_1 = \sigma^{-2} \mathbf{H}_1^T \mathbf{H}_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中 χ_k 表示目标在 k 状态时是否被测量,是为 1, 否为 0。对于高轨卫星系统,因为卫星和导弹距离远,导弹主动段较短,因此卫星和导弹相对观测几何变化很小,所以 \mathbf{H} 变化小,认为 $\mathbf{H}_1 \approx \dots \approx \mathbf{H}_n \approx \mathbf{H}$ 。设 n 状态为所有卫星观测数据所确定的最后一次观测到的状态,根据式(8),则某颗卫星观测量中包含导弹最后观测点 Fisher 信息量为:

$$\mathbf{J}_n = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^n \chi_{i-1} [(\Phi^T)^{-1}]^{i-1} \mathbf{H}^T \mathbf{H} (\Phi^T)^{i-1} \quad (9)$$

对于不同的传感器,信息矩阵可以相加,所以 m 颗观测卫星中包含的最后观测点运动状态的 Fisher 信息矩阵为 $\mathbf{FIM}_n = \sum_{j=1}^m \mathbf{J}_n^{(j)}$,其中上角标表示第 j 颗卫星的信息。用后验 CR 下界作为最后观测点运动状态协方差估计。

$$\text{Cov}(\mathbf{X}_n) \approx \mathbf{PCRLB} = (\mathbf{FIM}_n)^{-1} \quad (10)$$

由于最后的观测点并非关机点,所以需要关机时刻 t_b 进行估计,然后外推到 t_b 。如果设编号为 k 的卫星探测时间周期为 Δ_k ,则 t_b 服从 $[t_n, t_n + \min_{k=1, \dots, m} \Delta_k]$ 上的均匀分布,因此用 $\hat{t}_b = t_n + \frac{\min_{k=1, \dots, m} \Delta_k}{2}$ 作为关机时间估计。记 $\bar{\Delta} \triangleq \frac{\min_{k=1, \dots, m} \Delta_k}{2}$,设关机点的状态为 \mathbf{X}_b ,则 $\mathbf{X}_b \approx \Phi(\bar{\Delta}) \mathbf{X}_n$,所以根据式(9)、式(10)有:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\mathbf{X}_b) &\approx \Phi(\bar{\Delta}) \text{Cov}(\mathbf{X}_n) \\ &= \Phi(\bar{\Delta}) \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_j} \sigma_j^{-2} \chi_{i-1}^{(j)} [(\Phi^T)^{-1}]^{i-1} (\mathbf{H}_j^T \mathbf{H}_j (\Phi)^{i-1})^{-1} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\sigma_j, N_j, \mathbf{H}_j$ 分别表示第 j 颗卫星视线误差、对目标的探测次数、对目标的观测矩阵。通过式(11)可以对不同测量精度、采样频率下的多个传感器的联合观测跟踪性能进行估计。

2.2 面向多目标跟踪性能的目标函数

设定多传感器优化控制的目标是使多个导弹关机点状态估计性能达到最优。目标函数定义如式(12)所示。

$$C = \sum_{q=1}^n \rho_q \text{tr}[\mathbf{W}_{9 \times 9} \text{Cov}(\mathbf{X}_b^{(q)})] \quad (12)$$

其中, $\mathbf{X}_b^{(q)}$ 表示第 q 枚导弹的关机点运动状态, $\mathbf{W}_{9 \times 9}$ 为一对角矩阵,通过对角线上数值的选取可以调节位置误差、速度误差和加速度误差在目标函数中的权重。 ρ_q 为第 q 枚导弹的权重,其数值一般由发射点位置、射向、导弹类型等信息确定^[17]。在给出了传感器对多个目标的跟踪分配方案后,即可根据式(11)计算各导弹的关机点状态估计性能,然后代入式(12)计算得到系统综合跟踪性能。

下面讨论调度方案的表述方法。设系统中有 m 颗卫星,跟踪 n 个目标。可以用三个矩阵 $\mathbf{Mng}_{n \times m}, \mathbf{Err}_{n \times m}, \mathbf{T}_{n \times m}$ 表示控制方案,它们分别叫作资源分配矩阵、精度分配矩阵、周期分配矩阵。如果卫星 i 观测目标 j ,测量精度为 σ_{los} ,探测周期为 ΔT ,则三个矩阵的第 j 行第 i 列, $\mathbf{Mng}_{j,i} = 1, \mathbf{Err}_{j,i} = \sigma_{\text{los}}^{-2}, \mathbf{T}_{j,i} = \Delta T$, 否则都为 0。因此结合式(11)和式(12)得到带有资源配置方案的目标函数形式,如式(13)所示。设 Δ_b 为关机点估计所需要的最后一段观测的时间长度,式(13)中 $N_j = \langle \Delta_b / T_{j,i} \rangle$ 为第 j 号卫星用于关机点估计的观测量个数,其中尖括号“ $\langle \cdot \rangle$ ”表示取其中数字的整数部分。 $\chi_{i-1}^{(j,q)}$ 为第 j 颗卫星对第 q 个目标在 $i-1$ 状态时是否可见的判断, $\mathbf{H}(j,q)$ 为第 j 颗卫星观测第 q 个目标的测量矩阵。

$$C = \sum_{q=1}^n \rho_q \text{tr}(\mathbf{W}_{9 \times 9} \Phi(\bar{\Delta}) \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{Mng}_{q,j} \mathbf{Err}_{q,j} \chi_{i-1}^{(j,q)} \cdot [(\Phi^T)^{-1}]^{i-1} [\mathbf{H}(j,q)]^T \mathbf{H}(j,q) (\Phi)^{i-1} \right\}^{-1}) \quad (13)$$

3 约束条件模型

求解优化控制问题就是求解 $\mathbf{Mng}_{n \times m}, \mathbf{Err}_{n \times m}, \mathbf{T}_{n \times m}$ 三个矩阵,使式(13)目标函数 C 最小。下面来讨论对三个矩阵的约束条件。

3.1 控制策略一致性约束

根据 $\mathbf{Mng}_{n \times m}, \mathbf{Err}_{n \times m}, \mathbf{T}_{n \times m}$ 的定义可知三个矩阵中相同位置对应的元素应该同时为 0,或同

时不为 0,且相同位置处探测频率和视线误差要对应,即

$$\begin{cases} \mathbf{Err}_{j,i} = \sigma_{\text{stare}} \Leftrightarrow \mathbf{T}_{j,i} = \Delta T_{\text{stare}} \\ \mathbf{Err}_{j,i} = \sigma_{\text{scan}} \Leftrightarrow \mathbf{T}_{j,i} = \Delta T_{\text{scan}} \\ \mathbf{Mng}_{j,i} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{Err}_{j,i} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{T}_{j,i} = 0 \\ \mathbf{Mng}_{j,i} \neq 0 \Leftrightarrow \mathbf{Err}_{j,i} \neq 0 \Leftrightarrow \mathbf{T}_{j,i} \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

需要注意的是,全文中,下角标 stare 表示凝视相机,scan 表示扫描相机。

3.2 可见性约束

把卫星和目标之间无遮挡,距离在传感器作用范围内的情况称为卫星和目标可见。称 $\mathbf{A}_{n \times m}$ 是 m 颗卫星对 n 个目标的可见矩阵,如果对任意的 $i \in \{1, \dots, n\}$ 和 $j \in \{1, \dots, m\}$,如果第 j 颗卫星对第 i 个目标可见,则 $\mathbf{A}_{i,j} = 1$,否则等于 0。那么资源分配矩阵 \mathbf{Mng} 不能与可见矩阵 \mathbf{A} 矛盾。即

$$\mathbf{Mng}_{i,j} \leq \mathbf{A}_{i,j} \quad (15)$$

3.3 凝视相机视场约束

凝视相机可以同时跟踪多个目标,但是它们必须同时在一个视场中。即设凝视传感器的视线误差为 σ_{stare} ,集合 $S_{\text{stare}}(q) = \{j | \mathbf{Err}_{q,j} = \sigma_{\text{stare}}^{-2}\}$ 表示第 q 颗卫星凝视相机探测目标的编号集合,则 \mathbf{Err} 要满足的条件为 $S_{\text{stare}}(q)$ 中的所有目标可以同时卫星 q 的凝视相机视场中。

3.4 扫描相机约束

由于 SBIRS-geo 扫描相机对纬度带进行连续扫描,因此如果扫描相机扫描到了两个不同纬度的目标,则可扫描到这个纬度区间内的任何不被遮挡目标。设 B_k 表示第 k 个目标的纬度,集合 $S_{\text{scan}}(q) = \{j | \mathbf{Err}_{q,j} = \sigma_{\text{scan}}^{-2}\}$ 表示第 q 个卫星扫描的目标编号集合。 $\bar{S}_{\text{scan}}(q)$ 表示未被扫描的目标集合,用 B_k 表示第 k 个目标的纬度。则 $\forall k \in \bar{S}_{\text{scan}}(q), B_k > \max_{j \in S_{\text{scan}}(q)} B_j$ 或 $B_k < \min_{j \in S_{\text{scan}}(q)} B_j$ 。

3.5 扫描相机扫描周期

对于 SBIRS-geo 扫描相机,可对南北纬 80° 区间区域往复扫描,设扫描周期为 ΔT_{max} ,并假设扫描的速度在纬度上均匀,且扫描相机扫描最小纬度范围为 ΔB_{min} 。则如果扫描宽度为 ΔB (单位为 $(^\circ)$) 的纬度带,则需要的时间为:

$$\Delta T_{\text{scan}}(\Delta B) = \begin{cases} \Delta T_{\text{max}} \Delta B / 160, & \Delta B > \Delta B_{\text{min}} \\ \Delta T_{\text{max}} \Delta B_{\text{min}} / 160, & \Delta B \leq \Delta B_{\text{min}} \end{cases} \quad (16)$$

这也是扫描相机对位于该纬度带内目标的测量周期。设扫描相机对纬度分别为 B_1, B_2, \dots, B_n 的 n

个目标进行扫描,采用仅扫描它们所在纬度带的模式,可以缩短扫描周期。可令 $\Delta B = \max_{i=1, \dots, n} B_i - \min_{i=1, \dots, n} B_i + \omega$, 则根据式(16) 计算扫描周期。其中 $\omega/2$ 是保证最南和最北的观测而多留出的纬度范围,可人工设定数值。

4 综合调度模型求解

4.1 基于聚类的扫描传感器可行方案生成

扫描相机可行方案的生成包括两个过程,一是根据多目标和每颗卫星的位置计算扫描相机可行的纬度扫描范围。二是将这些可行的范围方案进行组合,生成扫描相机可行扫描方案集合。

4.1.1 基于目标纬度距离的聚类

当扫描相机的扫描范围从传统模式下的全范围扫描缩小到一个纬度区间上时,会导致卫星仅能对部分目标进行扫描,而放弃其他目标的扫描,这就意味着要对目标进行分组。分组方式是按照目标间的纬度距离进行聚类,将纬度距离近的分为一组,扫描相机选择对其中的一组进行扫描。因此采用聚类的方法生成扫描相机的扫描目标集合。流程如图 3 所示,步骤如下:

Step 1: 根据卫星和导弹位置生成可见性矩阵 $A_{n \times m}$, 其中 n 为导弹个数, m 为卫星个数, 令 $j = 1$;

Step 2: 提取第 j 颗卫星可见目标集合, 令 $k = 1$;

Step 3: 对第 j 颗卫星可见的目标根据纬度的远近聚为 k 类(聚类方法采用的是 MATLAB 所提供的聚类函数“cluster”), 存储每类中的目标编号, 根据式(16) 计算扫描相机扫描每个聚类的扫描周期并存储;

Step 4: 判断 j 是否等于卫星个数 m , 如果是, 转入 Step 7, 如果不是, 转入 Step 5;

Step 5: $k = k + 1$, 如果 $k < K$ (K 为聚类数目前限, 可人为设定) 转到 Step 3, 否则转到 Step 6;

Step 6: $j = j + 1$ 转到 Step 2;

Step 7: 将每颗卫星可选的观测目标聚类进行组合, 得到可行的扫描方案集合。

4.1.2 可行扫描方案组合

根据每个卫星对应的目标聚类集合生成所有可行方案的组合方式。设有 N_s 颗卫星, 第 i 颗卫星聚类总数为 Z_i , 则共有 $\prod_{i=1}^{N_s} Z_i$ 个可行方案。设一个扫描方案可以用一个 N_s 维向量表示, 即 $(a_1, a_2, \dots, a_{N_s})$ 。其中 $a_i, i = 1, 2, \dots, N_s$ 表示第 i 颗卫星聚类集合中第 a_i 个聚类。为得到所有的排列方式, 首先用 $N = 1, 2, \dots, N_{\max}$ 表示所有方案的代

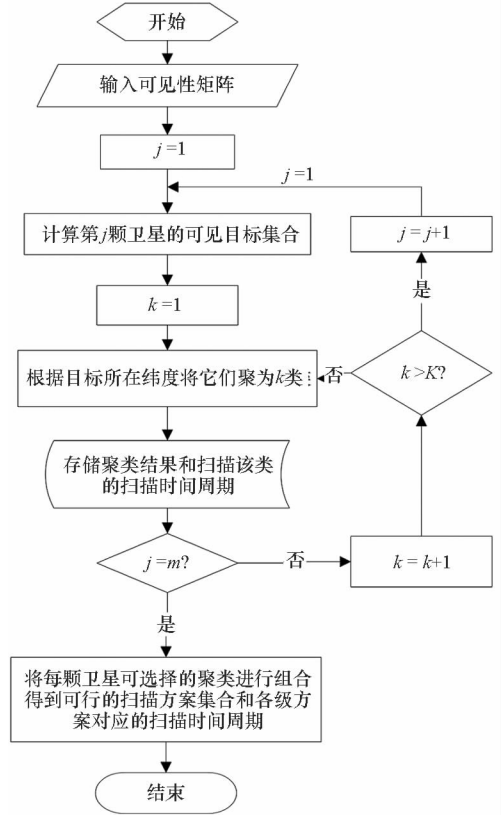


图 3 扫描相机资源分配方案生成

Fig. 3 Allocation scheme generation for scan sensor resource

号, 然后将代号转化成聚类方案向量, 这个过程可以根据图 4 的计算流程进行操作。图中 $\lfloor X \rfloor$ 表示对 X 进行下取整运算。

4.2 基于目标群跟踪的凝视相机可行方案生成

假设视场内多个目标的区分已通过图像处理算法完成, 调度算法的输入为被区分并进行编号的各个目标的俯仰角和高低角信息。

凝视相机对目标群的跟踪方式为将某个目标观测位置作为视场中心, 尽量多地在同一个视场中观测到其他多个目标。设 n 个目标的权重向量为 $P = (\rho_1, \dots, \rho_n)$, 设凝视调度方案向量 $M = (c_1, \dots, c_l)$, c_i 表示第 i 颗卫星作为视场中心目标的编号。第 i 颗卫星以目标 c_i 为视场中心可观测的其他目标集为 $S(c_i) = \{d_1, \dots, d_w\}$, d_i 表示集合中目标的编号, 集合中元素个数 w 不定。对于凝视相机的一个调度方案 M , 其可以同时跟踪的目标编号的集合为:

$$\Omega = (\bigcup_{i=1}^m S(c_i)) \cup \{c_1, \dots, c_m\} \quad (17)$$

该调度方案的效益函数为 $F(M, P) = \sum_{k \in \Omega} \rho_k$, 即调度方案的效益是此方案所能观测到的所有目标权重的和。由于凝视相机数目较少, 可以采用枚

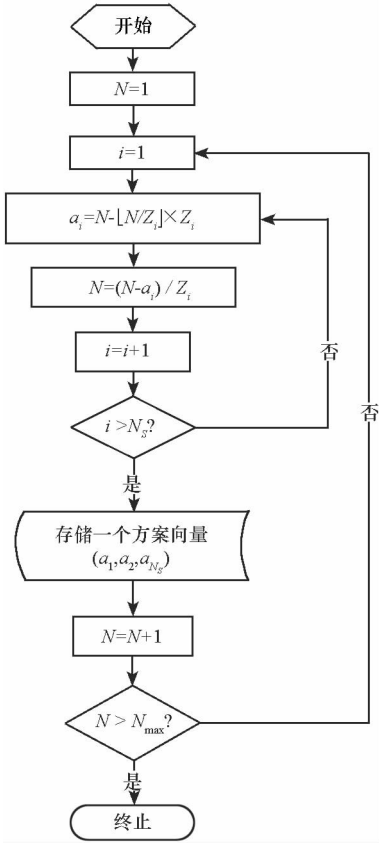


图 4 可行方案生成流程

Fig. 4 Flow of the feasible solution generation

举法对每个方案的效益进行计算,从而选出效益值最大的 N 个方案作为备选方案。

5 仿真算例

设预警星座设置如表 1 所示。DSP 卫星引导 SBIRS 卫星进行跟踪。HEO 卫星负责北极地区的导弹探测,假设无法进行扫描模式控制。

5.1 典型复杂发射场景仿真

首先验证改进模式下的调度算法对复杂发射场景预警的优越性。发射场景的设置遵循以下原则:

1) 目标数目多于凝视相机数目,每个目标跟踪优先级相同,以便验证凝视相机跟踪过饱和情况下的调度效果;

2) 目标分布既有分散的,也有聚集的,以验证调度算法是否会倾向于一次跟踪多个目标;

3) 发射区域在纬度上分布范围不能太窄,以便验证扫描相机纬度带扫描模式的有效性。

根据以上原则设在调度初始时刻,有 10 个导弹目标,位置如表 2 所示。在算例中,通过设置 W 可以使目标函数表示关机点速度的估计精度。表 2 中第 2、3 列和第 4、5 列分别为改进模式下的

表 1 卫星和传感器参数设置

Tab. 1 Parameter settings for satellite and sensor

卫星	纬度/ (°)	经度/ (°)	传感器	扫描全 周期/s	测角误差/ μrad
GEO1	0	10	扫描	2	40
			凝视	0.04	5
GEO2	0	70	扫描	2	40
			凝视	0.04	5
GEO3	0	105	扫描	2	40
			凝视	0.04	5
GEO4	0	152	扫描	2	3
			凝视	0.04	5
HEO	63	20	扫描	1	40
DSP1	0	100	扫描	10	120
DSP2	0	-140	扫描	10	120
DSP3	0	-20	扫描	10	120

调度结果和传统模式下的调度结果。传统模式指扫描相机南北全幅度扫描,由于每个目标优先级相同,所以凝视相机随机对其可见目标中的一个进行跟踪。对比计算结果,可看出优化控制的跟踪结果一致优于传统调度模式。

图 5 为上述改进模式下计算结果的观测资源分配示意图。导弹目标用圆圈表示,卫星和目标的连线表示卫星分配了探测资源给该目标。黑色虚线框表示 SBIRS-GEO 凝视相机的视场,灰色实线条带表示 SBIRS-GEO 扫描相机扫描的范围。从中可以直观地看到,凝视相机优先跟踪多目标群,扫描相机采用纬度带扫描方式,对多个目标进行了分配,既提高了扫描频率也没有丢失目标。

5.2 不确定发射场景仿真

下面验证调度算法对不确定发射场景的适应能力。设计了三类场景:

第一类为区域密集发射场景,在比较狭小的范围内有多个目标同时出现。场景生成的方式为在(180°W,180°E),(70°S,70°N)的范围内随机产生一点,以此点为中心在东西南北各 2°的区域内随机产生 1~5 个导弹目标。

第二类为多区域稀疏发射场景,即在全球范围内,多个区域同时各发射一枚导弹。场景生成的方式为在(180°W,180°E),(70°S,70°N)的范

表 2 调度结果对比

Tab.2 Results comparison between different management

导弹经纬度	调用传感器资源 (改进模式)	精度指标/(m/s) (改进模式)	调用传感器资源 (传统模式)	精度指标/(m/s) (传统模式)
37°N,120°W	HEO,DSP	3400	HEO1,DSP	3400
35.5°N,53°E	GE01 扫, GE03 凝, HEO	155	GE01 凝, GE03 扫, HEO	234
35°N,57°E	GE01 扫, GE03 凝	155	GE01 扫, GE03 扫, HEO	474
4.5°N,138.5°E	GE02 凝, GE04 扫	285	GE02 扫,GE03 扫, GE04 扫	702
1.4°N,141°E	GE02 凝, GE04 扫	285	GE02 扫,GE03 扫, GE04 扫	697
4.8°N,144.8°E	GE02 凝, GE04 扫	190	GE02 扫,GE03 扫, GE04 凝	211
24°N,131°E	GE03 扫, GE04 凝, HEO	345	GE02 扫,GE03 凝, GE04 扫	301
15°S,72°E	GE01 凝,GE02 扫,HEO	171	GE01 扫,GE02 凝,HEO	503
20°N,156.5°W	GE04 扫,DSP1	611	GE04 扫,DSP1	887
57°N,158°W	HEO,DSP1	373	HEO,DSP1	373

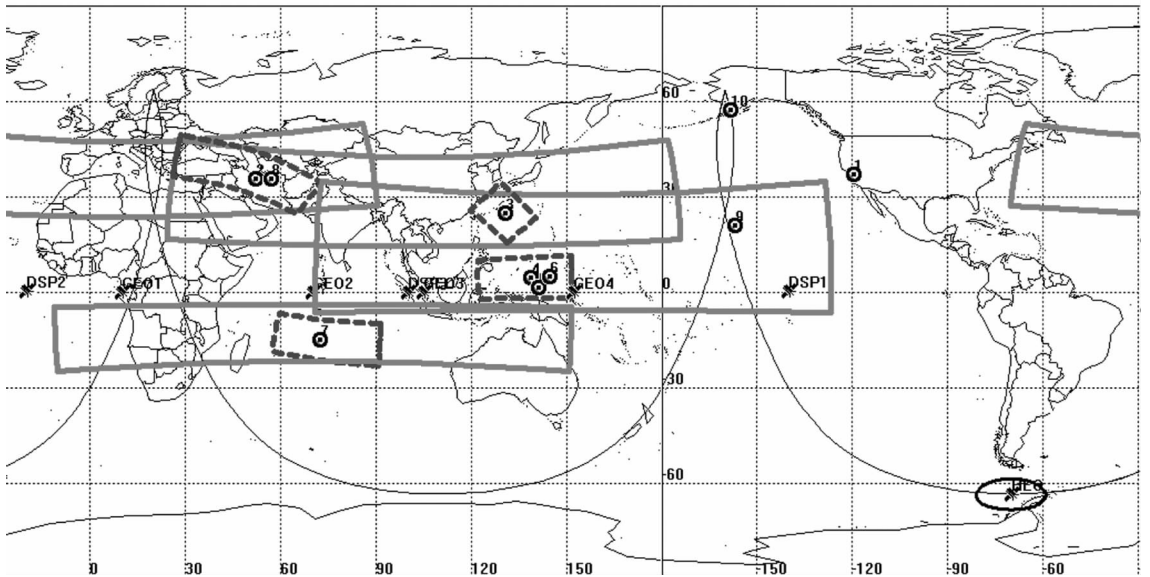


图 5 观测资源优化分配示意图

Fig.5 Sketch map for optimal sensor management

围内随机产生 8 个点,以这些点为中心在东西南北各 2°的区域内各随机产生 1 枚导弹目标。

第三类为复合式发射场景,即同时包括前两种情况。场景生成的方式为在(180°W,180°E), (70°S,70°N)的范围内随机产生 5 个点,以这些点为中心在东西南北各 2°的范围内各随机产生 1~3 个导弹目标。

在以上各类场景中采用改进模式和传统模式各做五次实验,统计的平均结果见表 3。从统计的平均结果来看,改进模式优于传统模式。

图 6 和图 7 绘制了两种模式在三类场景、五次实验中的跟踪精度和凝视相机跟踪目标个数。黑实线代表改进模式的结果,灰虚线代表传统模式结果。线上节点的不同形状代表所属场景的种类。横坐标表示五次实验的编号。从图 6 中看到,对于同一类场景,黑实线都在灰虚线以下,说明改进模式的多目标整体跟踪精度优于传统模式;从图 7 中可以看出对于同类场景,黑实线不低于灰虚线,表示改进模式下凝视相机同时跟踪的目标数目不少于传统模式。

表3 不同发射场景下的计算平均结果

Tab.3 Average results of different launch scenarios

		发射导弹个数	凝视相机跟踪个数	扫描相机平均探测时长/s	跟踪精度/(m/s)
第一类场景	改进	3.00	3.00	0.12	734.14
	传统	3.00	1.60	2.00	1820.82
第二类场景	改进	8.00	3.40	0.23	3334.14
	传统	8.00	2.80	2.00	3922.09
第三类场景	改进	9.80	6.40	0.15	1132.11
	传统	9.80	3.40	2.00	1778.11

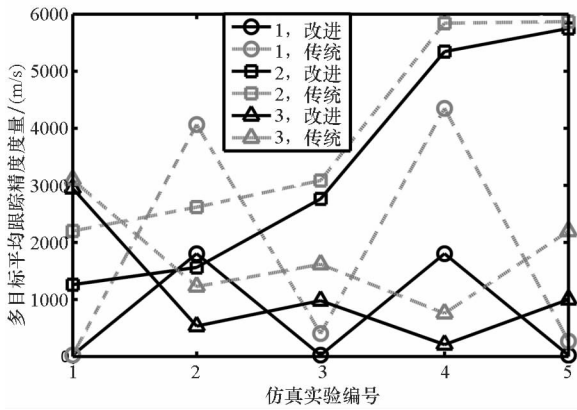


图6 两种模式下的跟踪性能

Fig.6 Target tracking performances under two different working modes

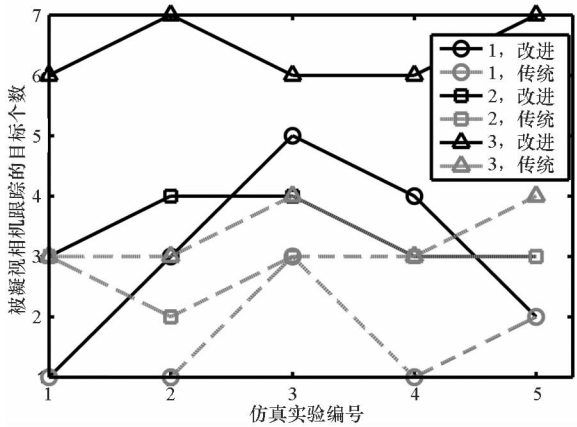


图7 两种模式下的凝视跟踪目标数目

Fig.7 Target tracking number of staring sensors under two different working modes

6 结论

通过研究不同工作体制、性能存在差异的高轨预警卫星传感器网络对多枚弹道导弹发射情况下的调度优化问题,提出扫描相机纬度区间扫描工作

模式和凝视相机跟踪多目标集群模式,并设计适应这种两种工作模式下的调度算法,从而推导出多体制传感器观测下的目标运动状态后验 CR 下界计算公式。仿真算例结果表明,该调度方法可以优化扫描相机对目标探测资源的分配,提高探测频率,优化凝视相机对目标集群的跟踪能力,且对多目标的跟踪精度较传统模式有显著提高。

本文算法面向多枚导弹并发的情况,对于多枚导弹存在一定的发射时间间隔情况并未进行深入研究,因此算法在实际应用中还有很大的提升空间。

参考文献 (References)

- [1] Andreas N S. Space-based infrared system (SBIRS) system of systems [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 1997(4): 429-438.
- [2] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 GEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 空军雷达学报, 2012, 26(6): 404-408. HU Lei, YAN Shiqiang, LIU Hui, et al. Analysis of coverage performance on US GEO early warning satellites [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(6): 404-408. (in Chinese)
- [3] 毛艺帆, 张多林, 王路. 美国 SBIRS-HEO 卫星预警能力分析[J]. 红外技术, 2014, 36(6): 467-470. MAO Yifan, ZHANG Duolin, WANG Lu. Analysis on early warning capability of USA's SBIRS-HEO satellite [J]. Infrared Technology, 2014, 36(6): 467-470. (in Chinese)
- [4] 阎志伟, 牛轶峰, 李汉铃. 基于并行禁忌遗传算法 (PTGA) 的预警卫星传感器调度研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 598-603. YAN Zhiwei, NIU Yifeng, LI Hanling. Study of sensor scheduling for early warning satellite based on parallel tabu genetic algorithm (PTGA) [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(6): 598-603. (in Chinese)
- [5] 郭浩波, 王颖龙, 曾辉. 采用遗传模拟退火算法研究导弹预警卫星传感器调度[J]. 光电与控制, 2006, 13(4): 71-74. GUO Haobo, WANG Yinglong, ZENG Hui. Sensor scheduling for missile early-warning satellite based on genetic and simulated annealing algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(4): 71-74. (in Chinese)
- [6] Liu B, Zhao Y, Yi D Y. Sensor management based on covariance control strategy for LEO satellite constellation [C]//Proceedings of Computational Intelligence and Design, International Symposium on IEEE, 2011: 282-285.
- [7] 赵砚, 张寅生, 易东云, 等. 基于 PCRLB 的低轨星座对自由段多目标的多传感器调度算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 842-850. ZHAO Yan, ZHANG Yinsheng, YI Dongyun, et al. PCRLB-based multi-sensor management for coasting-phase multi-target tracking using LEO satellite constellation [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 842-850. (in Chinese)
- [8] 任俊亮, 邢清华, 李龙跃, 等. 反导预警资源的调度策略与模型研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(3): 107-112. REN Junliang, XING Qinghua, LI Longyue, et al. Model and scheduling strategy of early warning resources schedule in missile defense operation [J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(3): 107-112. (in Chinese)

- [9] 汤绍勋, 易先清, 罗雪山. 面向预警卫星调度问题的改进粒子群算法[J]. 系统工程, 2012(1): 116-121.
TANG Shaoxun, YI Xianqing, LUO Xueshan. An improved particle swarm optimization algorithm for early warning satellites scheduling problems [J]. Systems Engineering, 2012(1): 116-121. (in Chinese)
- [10] 罗开平, 李一军. 导弹预警卫星调度问题分析[J]. 现代防御技术, 2009, 37(6): 5-10.
LUO Kaiping, LI Yijun. Analysis of the early warning satellite scheduling problem [J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(6): 5-10. (in Chinese)
- [11] 姜维, 李一军. 天基预警调度方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9): 2065-2077.
JIANG Wei, LI Yijun. The scheduling model and algorithm of space based early warning[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(9): 2065-2077. (in Chinese)
- [12] 孙新波, 汪民乐. 基于信息损失最小的预警卫星传感器调度模型[J]. 现代防御技术, 2013, 41(3): 30-33.
SUN Xinbo, WANG Minle. Sensor scheduling modeling for early warning satellite based on surveillance information loss minimized [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(3): 30-33. (in Chinese)
- [13] Hernandez M L, Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Multisensor resource deployment using posterior Cramer-Rao bounds[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 399-416.
- [14] Kalandros M. Covariance control for multi-sensor systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38(4): 1138-1157.
- [15] 何俊. 基于预警任务的天基预警资源调度方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
HE Jun. Research on resource allocation for space-based early-warning system based on early-warning task [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] 丁国振, 张占月, 郭力闻, 等. SBIRS-GEO 卫星预警探测流程及信噪比阈值建模分析[J]. 装备学院学报, 2014(5): 78-82.
DING Guozhen, ZHANG Zhanyue, GUO Liwen, et al. Simulation and analysis of workflow and signal-to-noise ratio threshold for SBIRS-GEO early warning satellite's detector[J]. Journal of Equipment Academy, 2014(5): 78-82. (in Chinese)
- [17] Lin K P, Li Y J. Target-tracked prioritization to surveille ballistic missiles [J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2009, 20(6): 1198-1206.