

基于多应用巡天望远镜阵的近地天体巡天规划模型研究*

庄彧怡^{1,2†} 平一鼎^{1‡} 赵海斌¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 近地小行星(Near-Earth Asteroids, NEAs)对全球安全构成威胁已成共识,对其探测具有重大意义.多应用巡天望远镜阵(Multi-Application Survey Telescope Array, MASTA)具有的大视场、多望远镜、较大口径等特点非常契合小行星探测的需求,它的加入可显著提升我国的近地小行星探测能力.为发挥MASTA的近地小行星探测优势,提出了一种近地天体巡天策略,并基于整数线性规划方法,提出了巡天规划模型.为评估该模型的表现以及在此模型下MASTA的近地小行星探测效能,通过扩充样本建立了观测目标集,并进行了一年的近地天体巡天仿真.仿真结果表明:巡天规划模型能够较好地满足MASTA近地天体巡天的需求;能够优化近地天体巡天项目的观测资源配置,兼顾MASTA的其他科学目标;MASTA一年探测的近地小行星数量可达其预估样本的1.29%.

关键词 望远镜, 近地小行星, 巡天, 优化算法, 方法: 分析

中图分类号: P185; **文献标识码**: A

1 引言

近地天体指近日点距离 $q \leq 1.3$ au的太阳系小天体,其中小行星是最主要的组成部分.近地小行星的轨道可能会与地球轨道相交,对全球安全构成潜在威胁,因此对其探测具有重大意义.大视场望远镜广域巡天是探测近地小行星的主要手段.在全球各个巡天计划中,LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research)^[1]、CSS (Catalina Sky Survey)^[2]和Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System)^[3]对近地小行星探测的贡献最大,截至目前分别发现了2671、

15474和10547颗近地小行星.我国的近地小行星搜索工作也在不断的发展中.近地天体望远镜(China Near-Earth Object Survey Telescope, CNEOST)、墨子巡天望远镜(Wide Field Survey Telescope, WFST)和BATC (Beijing-Arizona-Taipei-Connecticut)望远镜分别发现了42、7和5颗近地小行星.从国内外巡天计划的近地小行星探测数量上来看,我国的近地小行星探测能力还很不足.而MASTA (Multi-Application Survey Telescope Array)具有大视场、多望远镜、较强的暗弱天体探测能力等特点,非常契合小行星探测的需求,它的加入预计能够显著提升我国的近地小行星探测能力.

2024-03-13收到原稿, 2024-05-22收到修改稿

*国家重点研发计划项目(2023YFA1608100), 空间碎片与近地小行星防御科研项目(KJSP2020020204)及小行星基金会资助

[†]zxzzxz061702@163.com

[‡]ydping@pmo.ac.cn

要充分发挥MASTA在近地小行星探测上的潜力, 还需要合适的近地天体巡天策略和规划方法. 巡天策略是为提高巡天计划效能所制定的策略, 具体而言就是需要在怎样的天区范围、重访频率和曝光深度下进行巡天. 对于小行星这类特定目标的搜索, 在制定巡天策略时还需要考虑到一些重要因素, 概括起来主要是以下两点: 第一, 在选择巡天范围时要考虑到小行星观测的优势天区; 第二, 曝光深度与巡天面积随曝光时间变化且成反比, 需要选择合适的曝光时间^[4]. 对此, 目前国际上主要的小行星观测计划采用了不同的巡天策略: LINEAR每月搜索一次整个可视天空, 部分天区每月搜索多次, 在每个观测夜, 对每个天区曝光5次, 每次曝光相隔30 min, 曝光时间为5 s到30 s, 极限星等可以达到19.2等^[1]; CSS利用两台不同望远镜每晚分别搜索1000 deg²和4000 deg²的可视天空, 对每个天区曝光4次, 每次曝光30 s, 两台望远镜的极限星等分别能够达到21.5等和19.5等^[2]; Pan-STARRS的3 π 巡天对整个可视天空进行搜索, 对g、r、i、z、y中的各波段每年进行4次访问, 在每个观测夜, 对每个天区曝光2次, 曝光时间为30 s到60 s, 极限星等可以达到22等^[3].

巡天规划是对巡天策略的具体实现, 将基于巡天策略生成的观测任务按照适当的时间和观测条件分配给不同的望远镜, 以提高观测效率. 巡天规划通常基于动态调度和预先规划两类方法实现. 动态调度能够实时响应动态变化的观测条件以得到下一个观测任务, 主要包括贪心算法和机器学习算法. 利物浦望远镜的调度系统就采用了贪心算法^[5], 而HST (Hubble Space Telescope)^[6]和LSST (Large Synoptic Survey Telescope)^[7]则分别采用了人工神经网络和强化学习方法. 预先规划则基于优化算法为一段时间内的观测任务提前规划出最佳观测列表, 例如整数线性规划方法. LCOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network)^[8]和ZTF (The Zwicky Transient Facility)^[9]均采用了整数线性规划方法, 其中ZTF规划模型是在LCOGT规划模型的启发下提出的一种新模型. ZTF规划模

型能够结合与观测条件相关的先验信息来寻求最佳观测列表, 它可以实现的目标包括优化曝光序列、提高观测质量等. 该模型为MASTA巡天规划模型的设计提供了思路, 但还无法完全适应MASTA的需求. 这是因为MASTA是一套多望远镜、多科学目标的设备, 可实现比ZTF更多的观测模式, 例如:

1. MASTA具备同一时间执行多个任务或者策略的可能性;
2. MASTA的不同科学目标存在合并的可能性;
3. 执行不同科学目标的观测或任务的望远镜数量可灵活组合.

因此, 为了充分发挥MASTA的这些特点, 在分配给近地天体巡天的观测时间和资源有限的前提下, 相比于ZTF, MASTA近地天体巡天规划模型还需要遵循以下原则, 主要包括:

1. 保证小行星观测的优势天区被优先观测;
2. 尽可能多地观测新的天区, 扩大小行星搜索面积;
3. 根据观测条件随时间的变化情况, 在观测条件较好的时间段投入更多望远镜;
4. 优化近地天体巡天使用的望远镜总数量和观测总时长, 节约观测资源.

基于以上原则, 本文提出了一种MASTA近地天体巡天策略和巡天规划模型, 并通过扩充近地小行星样本建立了观测目标集, 利用仿真的方法, 评估了巡天规划模型的表现以及MASTA在此规划模型下的近地小行星探测效能.

2 MASTA简介

MASTA由分布在青海冷湖(北纬38.58°、东经93.88°、海拔3800 m)和云南大姚(北纬25.68°、东经101.05°、海拔2500 m)两个站点的各20台望远镜组成, 每台望远镜均为主焦点望远镜, 其主要参数见表1. 本文基于MASTA的冷湖站部分进行仿真, 而冷湖站的主要测站参数则如表2所示.

表 1 MASTA主要参数

Table 1 The main parameters of MASTA

Parameter	Value
Aperture/mm	710
f Number	f/1.7
Optical Structure	prime
FOV/deg ²	3.75 × 3.75
Detector Type	Back-illuminated sCMOS
Image Resolution	8120 × 8120
QE (Quantum Efficiency)	90%
Pixel Scale/''	1.67
Readout Noise/(e ⁻¹ · p ⁻¹)	3.0
Readout Rate/fps	20.0 MAX
Dark Current Noise/ (e ⁻¹ · p ⁻¹ · s ⁻¹)	< 0.05 @ -25°C
Band/nm	400~900
Astrometric Precision/''	≤ 0.1
Photometric Precision/mag	≤ 0.01

表 2 测站参数(冷湖)

Table 2 The parameters of LengHu site

Parameter	Value
Location ^a	38.58° N, 93.88° E, 3800 m
Seeing/''	0.85
Sky Brightness/mag	21~22
Observation Night Coefficient ^b	0.8
Wind Speed/(m · s ⁻¹)	0~15

^a <http://lenghu.china-vo.org>;

^b The observation night coefficient refers to the ratio of the number of observable nights to the total number of nights in a year.

3 巡天策略与规划模型

3.1 小行星观测的优势天区

小行星观测的优势天区是小行星最容易被发

现的区域. 想要寻找观测优势天区, 就需要了解小行星的空间分布、运动规律、视亮度等信息, Stokes等^[1]和赵海斌^[4]的主要研究结果如下:

第一, 在冲日点附近观测是探测小行星最有效的方法. 这是因为在冲附近, 随着观测位置冲日角距 λ' (小行星与冲日点之间的日心黄经差, $\lambda' = \lambda - \lambda_0$, λ 为小行星的日心黄经, λ_0 为冲日点日心黄经)变大, 一方面近地小行星与主带小行星之间视运动速度的差别越来越小, 二者越来越难以区分; 另一方面, 地球速度的叠加优势也在逐渐减弱.

第二, 小行星的亮度极大位置在冲以及黄道面附近, 因此对黄道附近的冲日点进行观测是探测到小行星的最佳机会.

第三, 当观测系统的探测能力足够强时, 离开冲较远处, 冲日角距 λ' 约 $\pm 120^\circ$ 的地方近地小行星的视向数密度最大, 所以发现近地小行星的概率也最大.

通过上述研究结果, 可以得到小行星观测的基本原则如下:

1. 冲日附近 30° ($|\lambda'| < 15^\circ$)、黄道附近 20° ($|\beta| < 10^\circ$)的天区为近地天体最佳观测位置, 需要重点观测, 用天区A表示;

2. 太阳以东(λ' 约 -120°)和太阳以西(λ' 约 $+120^\circ$)且在黄道附近的两块天区为近地天体密集区域, 需要重点观测, 分别用天区B和C表示;

3. 根据测站地理位置和观测时间得到的高度角大于 20° 的天区为本地天区, 在观测资源充足的情况下, 对这片天区进行搜索.

图1给出了在小行星观测基本原则中定义的各类天区. 这里的天区划分最小单元采用矩形形式, 根据MASTA的望远镜视场大小, 将其定义为赤经方向 3.5° 、赤纬方向 3.5° 的小矩形.

考虑到MASTA是一个具有多科学目标的天文观测设备, 所以本文希望上述观测原则中的天区A、天区B和天区C都能在1 h内观测完, 在此过程中也进行本地天区巡天, 这样就得到了如下基本的MASTA近地天体巡天策略:

1. 在天文昏影终, 对天区B在60 min内访问3次, 每次访问相隔10~20 min, 本地天区访问1次;

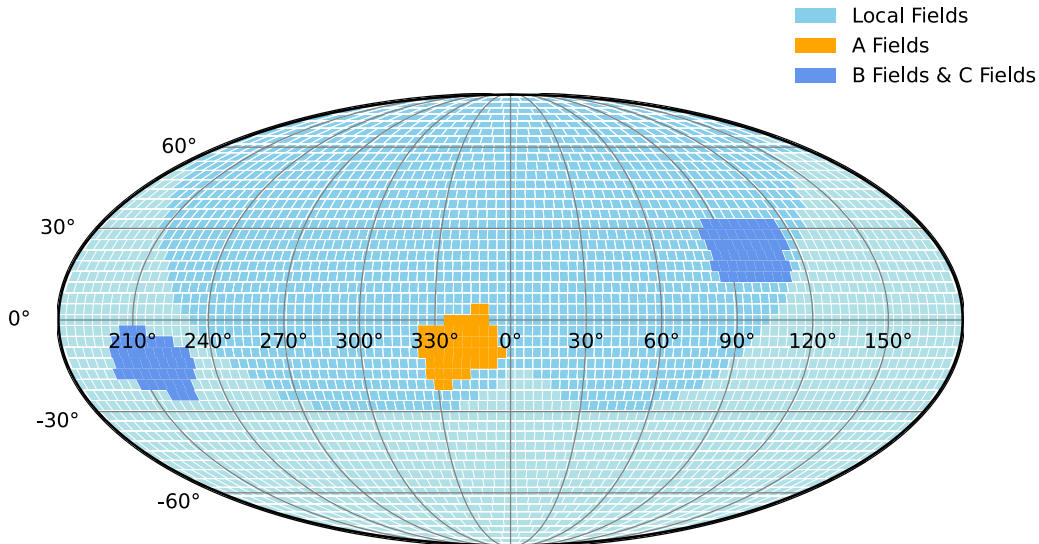


图 1 MASTA近地天体巡天的天区划分示意图

Fig. 1 Sky map for the division of fields in the near-Earth object survey of MASTA

2. 在子夜前后时间段, 对天区A在60 min内访问3次, 每次访问相隔10~20 min, 本地天区访问1次;

3. 在天文晨光始, 对天区C在60 min内访问3次, 每次访问相隔10~20 min, 本地天区访问1次.

该巡天策略能够兼顾很多其他的科学目标, 例如超新星的搜索, 因此可以实现近地天体巡天与其他科学目标的合并.

3.2 巡天速率与曝光时间

曝光深度与巡天面积随曝光时间变化并且成反比, 为了最大化巡天效率, 需要选择一个适当的曝光时间. 本文引入了巡天速率度量FOM (Figure of Merit)来优化曝光时间的选择, 该度量综合了巡天的深度和面积, 其表达式为^[10]:

$$\begin{aligned} \text{FOM} &= R_{S/N}^2 \Omega_{\text{fov}} t_{\text{exp}} + t_{\text{OH}} 10^{0.8m} \\ &\propto \frac{\Omega_{\text{fov}}}{t_{\text{exp}} + t_{\text{OH}}} 10^{0.8m_{\text{lim}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $R_{S/N}$ 为信噪比, Ω_{fov} 是望远镜视场, t_{exp} 是曝光时间, t_{OH} 是观测准备时间, m 是视星等, m_{lim} 表示极限星等. (1)式结合了与巡天面积相关的 $\frac{\Omega_{\text{fov}}}{t_{\text{exp}} + t_{\text{OH}}}$ 和表征曝光深度的极限星等 m_{lim} , 是一个与曝光时间相关的巡天速率度量. 此外, 由于极

限星等取决于观测波段、天区、大气质量和天光背景亮度, 所以巡天速率FOM还包含了许多影响图像质量的因素, 因此也能用于表征对某天区的观测质量. 本文根据表1和表2中给出的望远镜和测站参数, 通过(1)式计算出了MASTA的理论极限星等及巡天速率FOM, 结果如图2所示.

图2中两张子图分别展示了理论极限星等随曝光时间 t_{exp} 的变化以及巡天速率度量FOM对观测准备时间 t_{OH} 和曝光时间 t_{exp} 的依赖关系. 从图中可以看出, 观测准备时间 t_{OH} 越长, 巡天速率FOM越偏小; 同时, 巡天速率FOM随曝光时间 t_{exp} 的增长单调递增. 经过测试后可知, MASTA望远镜转动最小步长需要的时间大约为5 s. 从图2来看, 当把5 s设为观测准备时间时, 40 s到60 s是巡天速率FOM增长趋缓的区间, 所以对MASTA而言可以选择40 s到60 s的曝光时间. 此外, 根据之前的近地天体巡天项目, 探测能力达到20等时就可以有一些很好的发现^[11]. 如图2所示, 在冷湖优良的观测条件下, 当曝光时间为40 s时, MASTA的理论极限探测能力可以达到21.3等, 因此将曝光时间设为40 s较为合适. 为应对天气等随时间变化的因素带来的影响, 还可在40 s的基础上做相应调整.

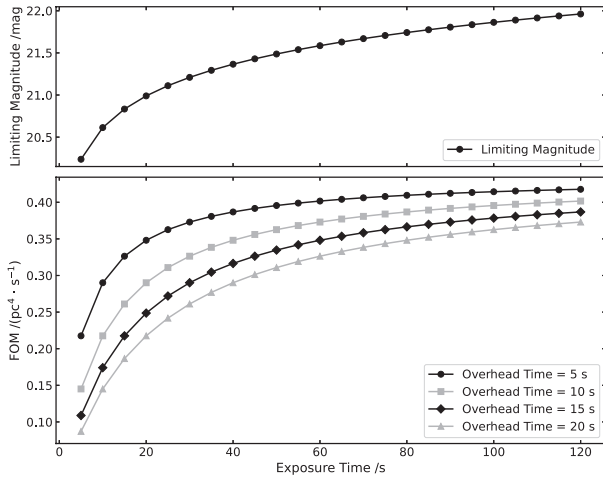


图2 理论极限星等和巡天速率FOM (不同观测准备时间下)随曝光时间的变化(pc: 秒差距)

Fig. 2 The variation of theoretical limiting magnitude and FOM (under different overhead times) with exposure time (pc: parsec)

3.3 巡天规划模型

本文首先将20台望远镜的3个观测时段划分成若干个时间块, 每个时间块的长度为 t_{block} , 将由所有时间块组成的时间块集合设置为 T . 由所有观测任务组成的集合则设置为 I , 其中由天区A、天区B和天区C的观测任务组成的集合设置为 I_1 、由本地天区的观测任务组成的集合设置为 I_2 . 由所有望远镜组成的集合设置为 J . 时间块长度 t_{block} 和望远镜总数 $\text{card}(J)$ 均为可变参数, 对其优化就可以实现对使用的观测总时长和望远镜总数的优化. 此外, 为了保证小行星观测的优势天区被优先观测, 规划模型需要先验指定不同类型天区的优先级. 所以对任意一个观测任务 $i \in I$, 都能得到它的优先级 P_i 、曝光次数 k_i 以及由所有可用时间块组成的集合 S_i . 这样就可以定义出整数线性规划问题的决策变量: 当任务 $i \in I$ 在望远镜 $j \in J$ 的时间块 $t \in T$ 上被执行时, $x_{ijt} = 1$; 否则, $x_{ijt} = 0$.

由于本文希望将更高的图像质量加入模型的偏好中, 所以利用巡天速率度量FOM, 通过(1)式求出任意一个观测任务 $i \in I$ 在时间块 $t \in T$ 被执行时的权重 V_{it} . 目标函数被设置为以任务优先级和巡天速率为权重的对所有望远镜的一切观测时段上曝

光数量的加权求和:

$$\min \sum_{i \in I} \left[1 - \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (P_i + V_{it}) x_{ijt} \right]. \quad (2)$$

模型还需要设置以下约束条件:

1. 任意一个优势天区的观测任务, 在任意一个可用的时间块上, 至多被执行1次:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \leq 1, \forall i \in I_1, \forall t \in S_i; \quad (3)$$

2. 任意一个优势天区的观测任务, 在所有可用的时间块上, 需要被执行 k_i 次:

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in S_i} x_{ijt} = k_i, \forall i \in I_1; \quad (4)$$

3. 任意一个本地天区的观测任务, 在所有可用的时间块上, 至多被执行1次:

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in S_i} x_{ijt} \leq 1, \forall i \in I_2; \quad (5)$$

4. 分配给每台望远镜的每个时间块的任务总时间不得超过时间块长度:

$$\sum_{i \in I} (t_{\text{exp},i} + t_{\text{OH},i}) x_{ijt} \leq t_{\text{block}}, \forall t \in T, \forall j \in J. \quad (6)$$

这里的 $t_{\text{exp},i}$ 和 $t_{\text{OH},i}$ 分别表示观测任务 $i \in I$ 的曝光时间和观测准备时间.

当前的模型只能得到分配给每台望远镜各个时间块上的所有曝光, 还没有对时间块内的曝光进行排序, 所以模型中的观测准备时间均使用基准值5 s. 而对时间块内的曝光进行排序本质上是求解一个旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)^[12]. 该问题的最优解就是产生最小总旋转距离的曝光序列.

旅行商问题也同样可以建立整数线性规划模型进行精确求解. 为了降低计算复杂度, 本文采用MTZ (Miller-Tucker-Zemlin)约束的整数线性规划模型, 公式如下^[13]:

$$\min \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N d_{mn} y_{mn},$$

$$y_{mn} \in \{0, 1\}, \forall m \in V, n \in V,$$

$$\begin{aligned}
\sum_{n=1}^N y_{mn} &= 1, \forall m \in V, \\
\sum_{m=1}^N y_{mn} &= 1, \forall n \in V, \\
y_{mm} &= 0, \forall m \in V, \\
u_m - u_n + (N-1)y_{mn} &\leq N-2, \\
\forall 2 \leq m \neq n \leq N, \\
2 \leq u_m \leq N, \forall 2 \leq m \leq N,
\end{aligned} \tag{7}$$

其中, V 表示由一个时间块上所有曝光组成的节点的集合, N 表示时间块上的总曝光次数, d_{mn} 表示从第 m 个曝光到第 n 个曝光望远镜的旋转距离, u_m 是描述路径中第 m 个节点位置的自由变量, 若次序 (m, n) 在最终的曝光序列中, 那么 $y_{mn} = 1$, 否则 $y_{mn} = 0$.

4 观测仿真的实现

4.1 仿真目标集的生成

由于目前已知的直径1 km以下的近地小行星数量是不完备的, 因此需要对MASTA近地天体巡天的仿真观测目标进行扩充^[14]. 本文以小行星中心(Minor Planet Center, MPC)发布的31345个已知的近地小行星作为原始样本, 对其进行10倍扩充.

原始样本中部分样本的观测数据和轨道数据

存在某些值缺失的情况, 所以将这些异常数据剔除, 剩余31322个小行星样本. 为保留小行星的轨道分布特性, 本文采用了10倍线性插值的方法, 对31322个小行星的轨道数据进行扩充.

Stokes等^[15]揭示了近地小行星数量 M 与直径 D 的关系, 提出了近地小行星尺度分布模型:

$$M(> D) = 942D^{-2.354}, \tag{8}$$

这里, 直径 D 的单位是km. 由(8)式可知, 该分布是一种幂律分布. 此外, 小行星的绝对星等 H 与其直径 D 和反照率 P_v 还存在以下关系, 即^[16]:

$$H = 15.618 - 5 \lg D - 2.5 \lg P_v, \tag{9}$$

反照率 P_v 在本文中取0.14^[17]. 所以为了生成符合尺度分布模型的绝对星等数据, 在直径0.01 km到50 km的范围内采用反CDF法(Inverse Cumulative Distribution Function, ICDF), 最终得到313220个绝对星等数据^[18].

图3给出了原始样本与扩充后的模拟样本在轨道根数和绝对星等上分布的比较, 其中蓝色部分表示原始样本, 橙色部分表示模拟样本. 图3 (a)、(b)和(c)分别给出了原始样本与模拟样本半长轴、偏心率和倾角分布的对比结果, 图3 (d)则反映了扩充后的绝对星等数据相对于原始数据的幂律分布趋势.

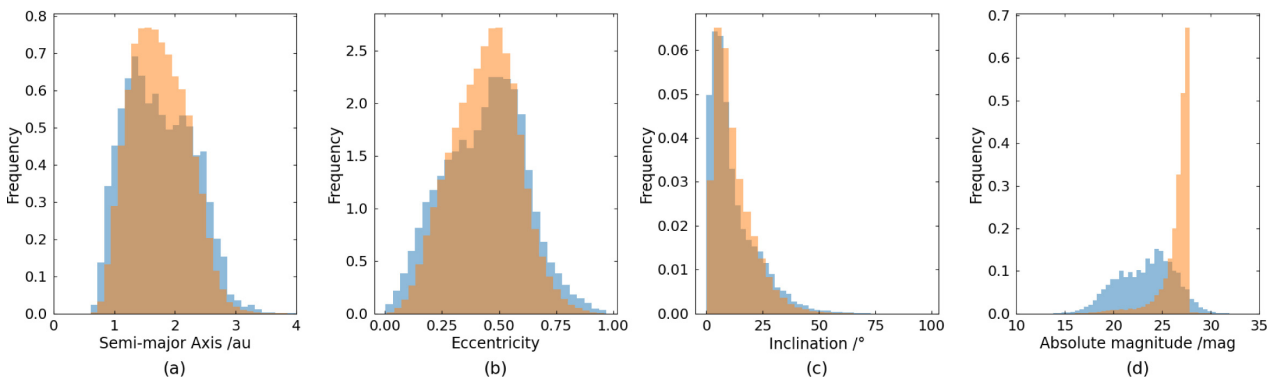


图3 小行星原始样本与模拟样本轨道根数与绝对星等分布的比较(蓝色: 原始样本, 橙色: 模拟样本)

Fig. 3 Comparison of the distribution of orbital elements and absolute magnitude between original and simulated samples of asteroids (blue: original samples, orange: simulated samples)

4.2 观测过程的仿真

量化评估MASTA的近地小行星探测效能是本文的重要目标, 而实现该目标的一种直观方法就是通过仿真得到每个观测日期内的近地小行星探测数量, 为此需要进行观测过程的仿真. 观测过程的仿真流程包括巡天规划和目标检测等环节, 具体的设计如下:

1. 通过观测日期和望远镜参数等输入数据得到当日的待完成观测任务和仿真目标集;

2. 通过望远镜巡天规划器得到当日可完成观测任务的时间表;

3. 结合当日的仿真目标集和可完成的观测任务时间表, 根据当日的巡天范围, 筛选出可观测目标;

4. 通过信噪比计算模型, 计算出每个目标的信噪比;

5. 根据检测条件即信噪比阈值, 筛选之后得到该观测夜的近地小行星检测列表.

仿真过程的流程图如图4所示:

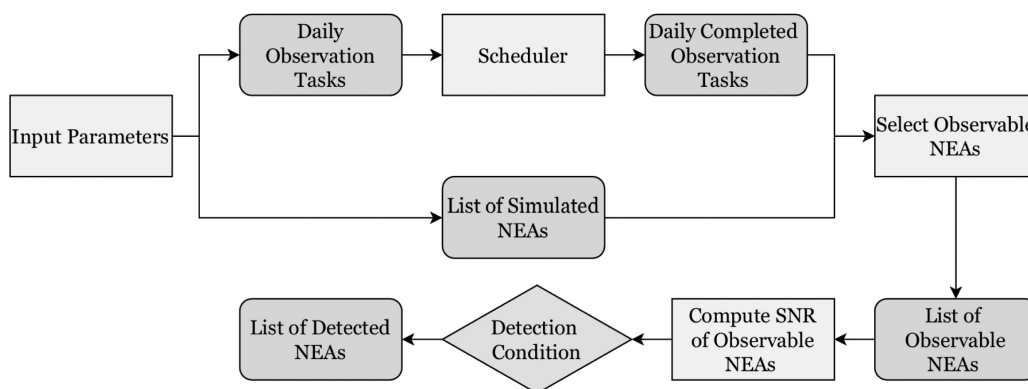


图4 观测过程仿真流程图

Fig. 4 Flowchart of simulation of observation process

4.3 结果评价方法

通过上述仿真流程, 在去除重复检测的目标后, 能够统计出一段时间内至少满足1次检测条件的目标总数, 即目标的累计检测数量. 从累计检测数量又可以进一步计算出目标的累计探测比例, 将其设为仿真结果的评价指标, 其定义是一段时间内的累计检测目标总数与仿真目标集中目标总数之比.

5 仿真结果

5.1 仿真程序的运行环境与参数设置

本文基于MASTA在冷湖站的20台望远镜进行仿真. 仿真程序用Python编写, 优化器采用了Gurobi 10.0.23. Gurobi被配置为可以使用8个线程, 即所有可用核心. 考虑望远镜中心遮挡, MASTA的有

效口径为60 cm. 根据表2可知, 冷湖站的天光背景亮度为21~22等, 在仿真程序中取21等. 其余参数如表3所示.

5.2 巡天规划模型的表现

巡天规划模型用Gurobi优化器进行求解, 得到的结果既要满足优化曝光序列这一基本目标, 又要满足第1节中提出的主要原则. 本文通过仿真对规划模型能否满足这些要求进行了检验.

图5给出了某个观测夜两次曝光之间时间间隔的分布情况. 从图5可知, 两次曝光之间的时间间隔的峰值为5 s. 根据统计, 在经过规划器的规划后, 有大约90%的曝光时间间隔为基准值5 s, 这表明规划器可以有效优化曝光序列, 减少观测过程中的非曝光时间, 提高系统整体观测效率.

观测条件是随时间变化的, 在以巡天速率FOM

作为每个天区的权重时, 相同的天区在观测条件更好的时间块上会有更高的权重, 因此巡天规划模型能够调整不同时间块上投入的望远镜数量, 在观测条件比较好的时间块上投入更多的望远镜. 图6展现了某个仿真观测夜不同的时间块上使用的望远镜数量. 该模型也会使得不同望远镜在同一个时间块观测不同的天区, 以扩大小行星搜索面积. 图7展现了某个仿真观测夜不同时间块的搜索面积.

表 3 仿真程序参数设置

Table 3 The parameters in simulation

Parameter	Value
Effective Aperture/cm	60
FOV/deg ²	3.75 × 3.75
QE	90%
Pixel Scale/''	1.67
Readout Noise/(e ⁻¹ · p ⁻¹)	3.0
Dark Current Noise/(e ⁻¹ · p ⁻¹ · s ⁻¹)	0.05
Exposure Time/s	40
Overhead Time/s	5
Sky Brightness/mag	21
Seeing/''	0.85
Atmospheric Extinction Coefficient	0.2 ^a
Observation Night Coefficient ^b	0.8

^a <http://spiff.rit.edu/richmond/signal.shtml>

^b The observation night coefficient refers to the ratio of the number of observable nights to the total number of nights in a year.

巡天规划模型还能够优先观测小行星探测的优势天区, 保证这部分天区的观测任务首先被完成. 图8给出了当望远镜数量等于5、10、15、20时, 各类任务的完成率与曝光时间的关系. 在图8的4张子图中, 随着曝光时间的增长, 优势天区任务的完成率始终保持100%, 而本地天区任务的完成率则先保持100%, 随后下降. 此外, 在图8的部分子图中出现了下降趋势呈现阶梯状的情况, 这主要是因为(3)式作为模型的约束条件导致了整数线性规划问题的可行域受限.

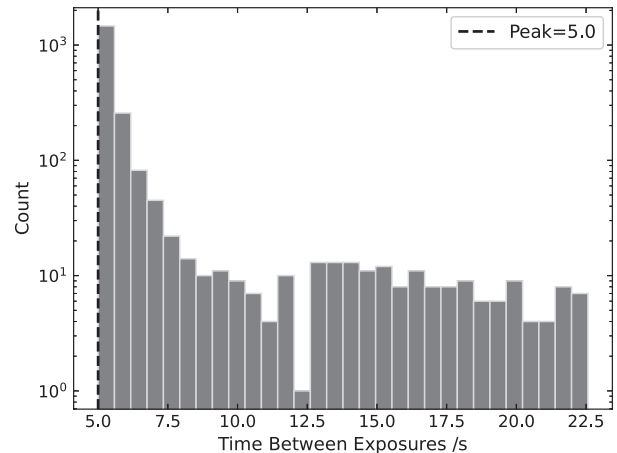


图 5 两次曝光之间的时间间隔的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of all time intervals between exposures

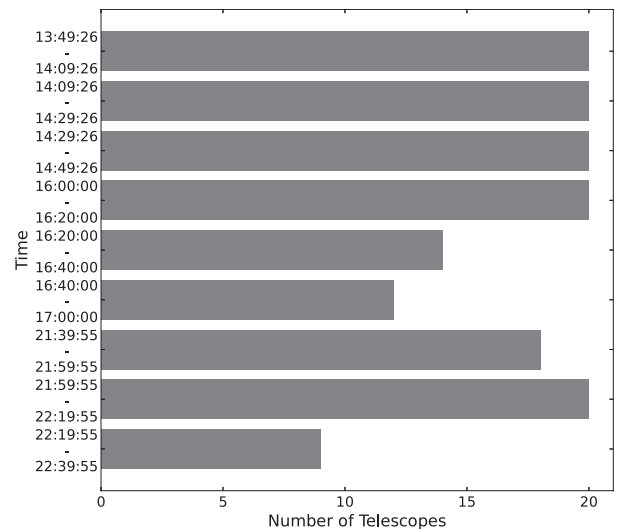


图 6 不同时间块上使用的望远镜数量

Fig. 6 Number of telescopes used on different time blocks

图8也表明在所有的近地天体巡天任务都被完成的前提下, 当曝光时间不太长时, 望远镜数量会发生冗余. 考虑到MASTA是一个多科学目标的观测设备, 需要兼顾到其他的科学任务, 为了避免望远镜资源的浪费, 就需要利用巡天规划模型, 对近地天体巡天项目使用的望远镜总数量进行优化. 表4给出了当每个观测时段的观测时长为60 min时, 不同曝光时间下近地天体巡天需要的望远镜数量下

限. 本文中仿真观测的曝光时间取40 s, 这种情况下使用10台望远镜就可以完成所有的近地天体巡天任务, 剩余10台望远镜可以用于其他的科学目标.

表 4 当观测时长为60 min时不同曝光时间下近地天体巡天需要的望远镜数量下限

Table 4 The minimum number of telescopes required for near-Earth object survey under different exposure times when the observation duration is 60 minutes

Exposure Time/s	The minimum number of telescopes
5	2
10	3
15	4
20	5
25	6
30	7
35	8
40	10
45	10
50	12
55	12
60	14

另一个重要优化方向是在使用全部20台望远镜的情况下, 利用巡天规划模型缩短近地天体巡天项目需要的总观测时长. 表5中就展现了不同曝光时间下, 当使用20台望远镜时, 近地天体巡天项目每个观测时段需要的时长下限. 当曝光时间为40 s时, 在每个观测时段MASTA只需要30 min就可以完成近地天体巡天项目的所有观测任务.

5.3 MASTA近地小行星探测效能评估

除了给出巡天规划方法在仿真中的具体表现, 本文还需要评估在采用这种巡天规划方法后MASTA的近地小行星探测效能. 本文基于生成的仿真目标集, 根据第4节中给出的仿真流程, 对2024年1月1日到2024年12月31日的292个观测夜进行观测仿真, 并对仿真结果进行统计, 然后计算相应的近地小行星累计探测比例. 最终发现: 经过全年的仿

真观测, MASTA共探测到4026个近地小行星, 累计探测比例为1.29%. 图9展现了全年各个观测日期的近地小行星累计探测比例.

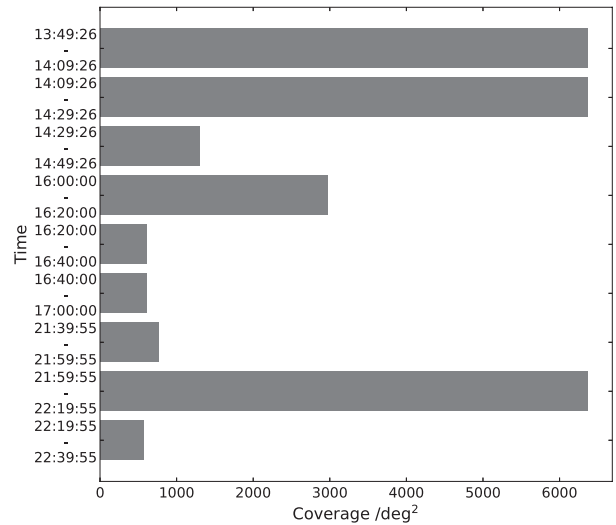


图 7 不同时间块上的搜索面积

Fig. 7 Search area on different time blocks

表 5 当使用20台望远镜时不同曝光时间下近地天体巡天每个观测时段需要的时长下限

Table 5 The minimum observation time for each observation period of near-Earth object survey under different exposure times when using 20 telescopes

Exposure Time/s	The minimum observation time/min
5	7
10	10
15	13
20	17
25	20
30	23
35	27
40	30
45	33
50	36
55	38
60	40

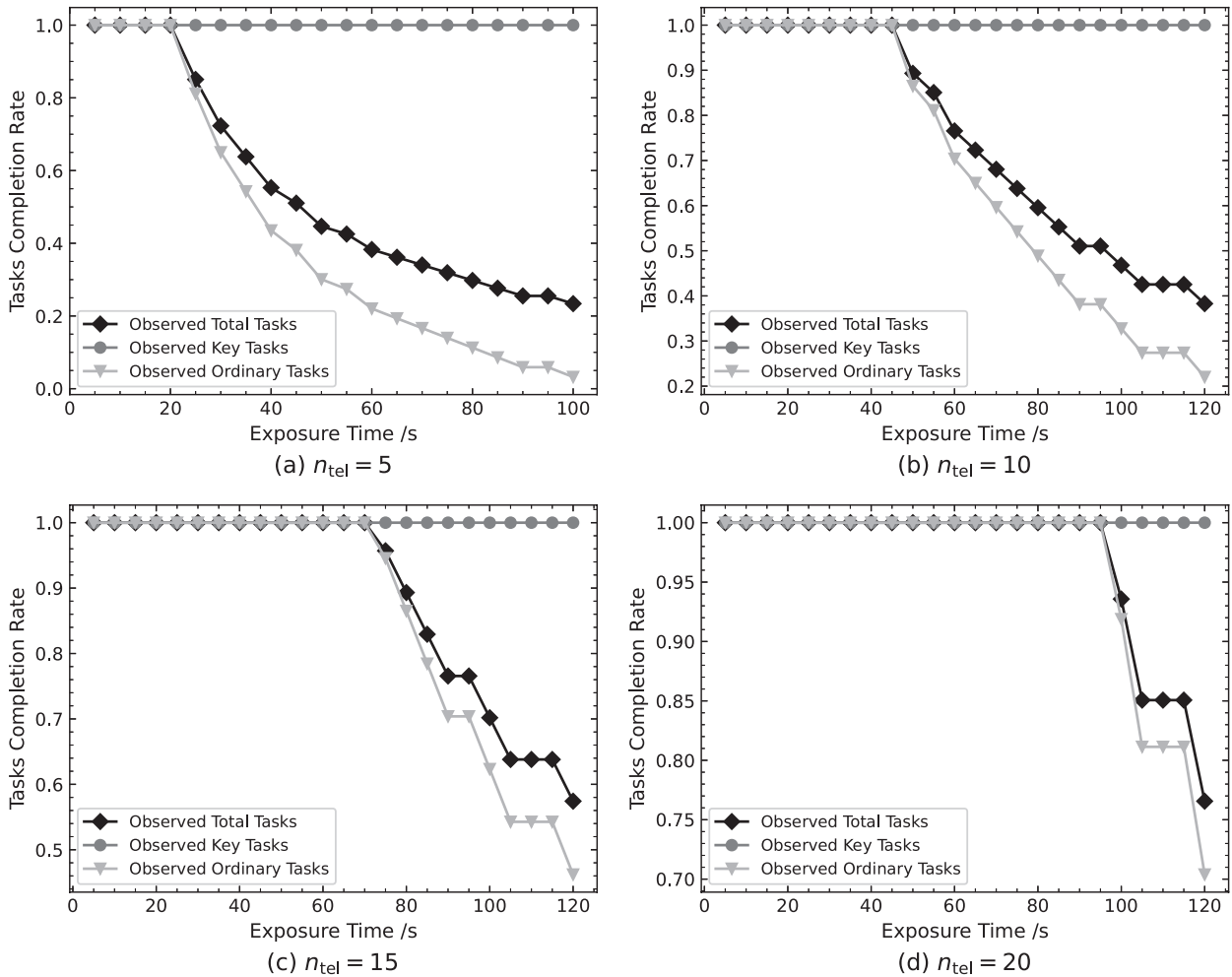


图 8 不同望远镜数量下各类任务的完成率(n_{tel} : 望远镜数量)

Fig. 8 Completion rates of various tasks under different number of telescopes (n_{tel} : number of telescopes)

图9也给出了当曝光时间为60 s时的仿真探测结果. 由图可知, 当曝光时间从40 s变为60 s时, 近地小行星的累计探测比例从1.29%上升至1.46%, 具体数量从4026增长到4559个. 值得注意的是, 这样的探测结果都是以每个观测夜的任务都能全部完成为前提的, 所以正如表4所示, 需要的望远镜数量也要从10台增加到14台.

6 总结与讨论

为了充分发挥MASTA在近地小行星探测方面的优势, 本文基于小行星的空间分布、运动规律、视星等分布和巡天速率度量FOM, 提出了MASTA

的近地天体巡天策略, 并利用整数线性规划方法建立了巡天规划模型. 本文还基于模拟的观测目标集, 通过仿真程序实现和评估了巡天规划模型, 并量化了MASTA在此模型下的近地小行星探测效能. 本文的主要结果总结如下:

1. 每个观测夜对可视天空进行3次访问并且每次访问曝光40 s是能够适应MASTA需求的巡天策略;

2. 仿真结果显示, 巡天规划模型既能够优化曝光序列, 在曝光时间为40 s时, 将大约90%的非曝光时间压缩在基准值5 s, 也能够满足MASTA近地天体巡天的特定需求, 包括小行星观测的优势天区被

优先观测、根据观测条件调整望远镜使用数量等;

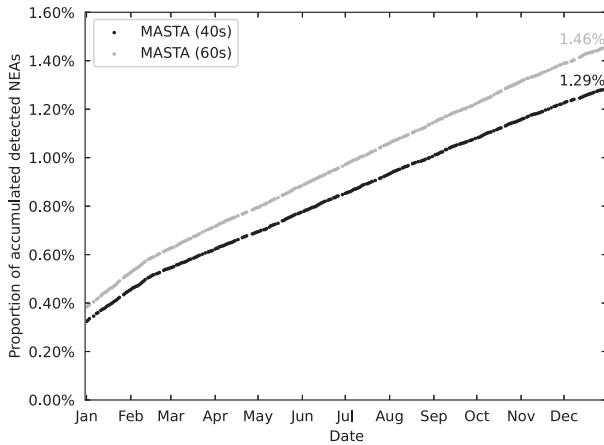


图9 不同曝光时间下全年近地小行星累计探测比例

Fig. 9 Proportion of accumulated detected NEAs in a year under different exposure times

3. 根据仿真结果, 巡天规划模型还能优化近地天体巡天项目要使用的观测资源, 在每次曝光40 s的情况下, 当分配给每个观测时段的时长为60 min时, 近地天体巡天项目需要的望远镜数量下限为10台, 而若投入全部的20台望远镜, 近地天体巡天项目每个观测时段需要的时长下限则为30 min, 剩余观测资源就可以用于其他科学目标;

4. 根据对2024年全年的观测仿真, 当曝光时间为40 s时, MASTA在此规划模型下一年可以探测到1.29%的模拟小行星样本。

本文提出的巡天规划模型不仅可以用于MASTA近地天体巡天, 还能够用于时域巡天等其他科学目标。相比于ZTF的巡天规划模型, 该模型能够有效地发挥MASTA多望远镜的优势。此外, MASTA作为多望远镜阵, 可以通过使用多台望远镜对同一天区进行同时曝光或者连续曝光的方式增加曝光深度, 在后续巡天规划模型的改进中可以进一步考虑这样的需求, 以最大化地发挥MASTA相比于其他观测设施的独特优势。

参考文献

- [1] Stokes G H, Evans J B, Larson S M. Near-Earth Asteroid Search Programs // Bottke Jr W F. Asteroids III. Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 2002: 45-54
- [2] Larson S, Brownlee J, Hergenrother C, et al. BAAS, 1998, 30: 1037
- [3] Kaiser N, Burgett W, Chambers K, et al. Ground-based and Airborne Telescopes III. Bellingham, WA: SPIE, 2010, 7733: 159
- [4] 赵海斌. 天文学报, 2010, 51: 106
- [5] Steele I A, Carter D. Telescope Control Systems II. Bellingham, WA: SPIE, 1997, 3112: 222
- [6] Johnston M. Sixth Conference on Artificial Intelligence for Applications. New York: IEEE, 1990, 1: 184
- [7] Naghib E, Yoachim P, Vanderbei R J, et al. AJ, 2019, 157: 151
- [8] Hawkins E, Baliber N, Bowman M, et al. Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III. Bellingham, WA: SPIE, 2010, 7737: 174
- [9] Bellm E C, Kulkarni S R, Barlow T, et al. PASP, 2019, 131: 068003
- [10] Tonry J L. PASP, 2011, 123: 58
- [11] Tonry J L, Denneau L, Heinze A N, et al. PASP, 2018, 130: 064505
- [12] Dantzig G B. Linear Programming and Extensions. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1963: 352-367
- [13] Miller C E, Tucker A W, Zemlin R A. JACM, 1960, 7: 326
- [14] Brown P, Spalding R E, ReVelle D O, et al. Nature, 2002, 420: 294
- [15] Stokes G H, Yeomans D K, Bottke Jr W F, et al. Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for Near-Earth Objects to Smaller Limiting Diameters. NASA Report of the Near-Earth Object Science Definition Team (2003), Washington, DC, August 22, 2003
- [16] Michelsen R, Haack H, Anderson A C, et al. International Conference on Recent Advances in Space Technologies. New York: IEEE, 2003, 2003: 247
- [17] Stokes G H, Barbee B W, Bottke Jr W F, et al. Update to Determine the Feasibility of Enhancing the Search and Characterization of NEOs. 17th Meeting of the NASA Small Bodies Assessment Group, Washington, DC, June 12-14, 2017
- [18] Vogel C R. Computational Methods for Inverse Problems. Philadelphia, Pennsylvania: SIAM, 2002: 41-58

A Near-Earth Object Survey Planning Model for Multi-Application Survey Telescope Array

ZHUANG Yu-yi^{1,2} PING Yi-ding¹ ZHAO Hai-bin¹

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT It has become a consensus that near-Earth asteroids (NEAs) threaten global security, thus the detection of them is of great significance. The Multi-Application Survey Telescope Array (MASTA) features a large field of view, multiple telescopes, and a large aperture. It is fully suitable for the needs of asteroid detection. Its addition can significantly improve domestic capabilities of detecting near-Earth asteroids. In order to give full play to MASTA's advantages in detecting near-Earth asteroids, a survey strategy is proposed, and a survey planning model is built based on the integer linear programming model. To evaluate the performance of this model and the near-Earth asteroid detection efficiency of MASTA under this model, a set of simulated asteroids is created by expanding the known near-Earth asteroid samples, and a one-year near-Earth object survey simulation is conducted. Simulation results show that the survey planning model can well meet the needs of MASTA's near-Earth object survey; it can optimize the observation resource allocation of near-Earth object survey and take into account MASTA's other scientific goals; the number of near-Earth asteroids detected by MASTA in a year can reach 1.29% of its estimated sample size.

Key words telescopes, near-earth asteroids, surveys, optimization algorithms, methods: analytical