

**МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ  
НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА  
НЕПОДВИЖНОМ ТЕЛЕСКОПЕ**

*Е.С. Козырев<sup>1</sup>, А.М. Кожухов<sup>2</sup>, Е.С. Сибирякова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Обсерваторная 1, Николаев, Украина, 54030, тел.: +380 (512) - 56-40-40, ugeen.kozirev@gmail.com.

<sup>2</sup>Центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля, с. Залесцы, Дунаевецкий р-н, Хмельницкая обл., Украина, 32444, тел. (факс): +380-(3858) - 31-830, znvc@dzz.gov.ua, [a.m.kozhukhov@gmail.com](mailto:a.m.kozhukhov@gmail.com)

**Абстракт.** Запропоновано евристичний метод автоматичного планування спостережень низькоорбітальних космічних об'єктів на автоматизованому або автоматичному телескопі. Метод базується на рішенні динамічної задачі теорії розкладів за критерієм максимуму зваженої суми обертів, що спостерігаються. В якості ваги оберту використовується значення пріоритету спостережень об'єкта, якому належить даний оберт. Показані результати застосування методу у НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

*Ключові слова:* низькоорбітальні космічні об'єкти, позиційні оптичні спостереження, планування спостережень.

**Абстракт.** Предложен эвристический метод автоматического планирования наблюдений низкоорбитальных космических объектов на автоматизированном или автоматическом телескопе. Метод основан на решении динамической задачи теории расписаний по критерию максимума взвешенной суммы наблюдаемых витков. В качестве веса витка используется значение приоритета наблюдений объекта, которому принадлежит данный виток. Показаны результаты применения метода в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория».

*Ключевые слова:* низкоорбитальные космические объекты, позиционные оптические наблюдения, планирование наблюдений.

**Abstract.** A heuristic method for automatic scheduling for LEO object's observations at automatic mode telescope is proposed. The method is based on the solution of the dynamic problem of scheduling theory with usage the criterion of the

maximum weighted sum of the observed revolutions. The observation priority of the object to which the given revolution belongs is used as the revolution's weight. The application results of the method in the Research Institute "Mykolaiv Astronomical Observatory" are shown.

*Keywords:* LEO objects, positional optical observations, observations scheduling.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие оптики, электроники и вычислительной техники привело к качественным изменениям в наблюдательной астрономии. Современные телескопы, сконструированные по новым оптическим схемам, на компьютеризованных монтировках, оснащенные высокочувствительной светоприёмной аппаратурой, управляемые специальным программным обеспечением, могут проводить отдельные наблюдения значительно быстрее, чем это было возможно раньше. В связи с этим, все большее значение приобретает тщательное планирование наблюдений, позволяющее максимально эффективно использовать возможности современной наблюдательной техники. Не является, в данном случае, исключением и наблюдение низкоорбитальных космических объектов (НОКО).

## **АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ**

Имеется достаточно большое количество работ, посвященных планированию наблюдений, в том числе, на удаленно управляемых телескопах или телескопах-роботах. В работах [1 – 4] основное внимание уделяется оптимизации планирования разнородных наблюдений объектов, разбросанных по всей небесной сфере за одну ночь, в том числе, и алертных наблюдений гамма-всплесков [5]. Все данные типы наблюдений проводятся в режиме часового ведения, а большая часть наблюдаемых объектов находится в зоне видимости телескопа значительную часть ночи. Данные условия значительно отличаются от условий наблюдения НОКО.

В докладах, посвященных российской Наземной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН), неоднократно упоминалось об использовании специально разработанных алгоритмов планирования наблюдений объектов на геостационарной и

высокоэллиптических орбитах [6 – 8]. Однако, работ с описанием данных алгоритмов найдено не было. Также не было найдено описаний методов эффективного планирования наблюдений НОКО. Поэтому представляется целесообразной разработка вычислительного метода планирования подобных наблюдений.

## **ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ НОКО**

НОКО обладают чрезвычайно высокой скоростью видимого движения по небесной сфере (до 2 °/с.), и находятся в зоне видимости телескопа, в основном, не более 10 минут. Наблюдения НОКО обычно ведутся по заранее известному списку объектов, количество которых может достигать нескольких сотен. Следует отметить, что наблюдаемые НОКО могут обладать различным приоритетом, и это также следует учитывать при планировании наблюдений.

В зависимости от системы управления телескопа наблюдения НОКО производятся одним из двух методов: сопровождением или на неподвижном телескопе. При сопровождении телескоп движется вместе с наблюдаемым НОКО, постоянно удерживая его в поле зрения. При наблюдениях на неподвижном телескопе инструмент выводится в заранее рассчитанную точку встречи, а наблюдения НОКО проводятся при пролете его через поле зрения. Таких точек встречи для одного НОКО на витке может быть несколько. Таким образом, при наблюдении НОКО на неподвижном телескопе производится следующая последовательность действий:

- наведение телескопа в точку встречи;
- включение светоприёмной аппаратуры в заданное время, на заданный интервал;
- наведение телескопа на следующую точку встречи.

Далее в данной работе рассматривается только случай наблюдений на неподвижном телескопе.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для телескопа имеется список  $N$  проходов (витков) НОКО  $(1, \dots, i, \dots, N)$ , доступных для наблюдения в данную ночь. Для каждого витка известны начальные условия, позволяющие определить время входа НОКО на  $i$ -м витке в зону видимости телескопа  $t_i^{ex}$ , время выхода НОКО на  $i$ -м витке из зоны видимости  $t_i^{bx}$ , а также координаты  $(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$   $j$ -й точки встречи  $i$ -го витка на заданное время момента наблюдения  $t_{ij}^H$ . Координаты точки встречи могут задаваться в экваториальной или горизонтальной системе координат, в зависимости от монтажа телескопа.

Прохождения пересекаются между собой, т.е. в зоне видимости телескопа может одновременно находиться несколько НОКО. Кроме того, для каждого НОКО известен его приоритет (вес)  $w_i$ , изменяющийся в пределах от 0 до 999 (больше – выше). Необходимо спланировать наблюдения таким образом, чтобы взвешенная сумма витков, на которых были проведены наблюдения НОКО, была максимальной:

$$\sum_{i=1}^N w_i u_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\text{где } u_i = \begin{cases} 1, & \text{при } n_i \geq n_{\min}, \\ 0, & \text{в ином случае,} \end{cases} \quad n_i - \text{ количество точек наблюдений НОКО на } i -$$

м витке;  $n_{\min}$  – минимально необходимое количество точек наблюдений на витке.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Исходя из постановки задачи, необходимо составить последовательность точек встречи, привязанных ко времени, которое будет удовлетворять выражению (1). Представляется целесообразным принимать решение о следующей точке встречи после проведения наблюдений в текущей точке встречи. Сравнительно небольшой объем списка витков и возможности современной вычислительной техники позволяют провести данную операцию достаточно быстро, сведя потери времени на расчет к минимуму. Также представляется целесообразным выбор на каждом шаге для наблюдений того НОКО, находящегося в поле зрения, который имеет наибольший вес. Таким образом, разрабатываемый вычислительный метод

является решением частного случая динамической задачей теории расписаний (см., например, [9]) с использованием так называемого «жадного» алгоритма.

Перед описанием вычислительного метода следует дополнительно ввести несколько понятий. Пусть  $\Delta t_{ij}^{наб}$  – время наведения в  $j$ -ю точки встречи  $i$ -го витка, а  $\Delta t_{ij}^H$  – время наблюдения до момента прохождения НОКО  $j$ -й точки встречи  $i$ -го витка.  $\Delta t_{ij}^H$  соответствует промежутку времени, которое НОКО на  $i$ -м витке находится в поле зрения телескопа, наведенного на  $j$ -ю точки встречи, до прохождения им данной точки.

Сам вычислительный метод представляет собой следующую последовательность действий.

1. Для всех витков производится расчет исходных данных.

1.1. Вычисляется оптимальный период между наблюдениями  $\Delta t_i^{opt}$ :

$$\Delta t_i^{opt} = \begin{cases} \frac{t_i^{6blx} - t_i^{6x}}{c}; \\ \Delta t_{\min}^{opt}, \text{ при } \frac{t_i^{6blx} - t_i^{6x}}{k} < \Delta t_{\min}^{opt}; \\ \Delta t_{\max}^{opt}, \text{ при } \frac{t_i^{6blx} - t_i^{6x}}{k} > \Delta t_{\max}^{opt}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $c$ ,  $\Delta t_{\min}^{opt}$ ,  $\Delta t_{\max}^{opt}$  – заданные константы.

1.2. Определяется уровень приоритета витка  $W_i$ :

$$W_i = \begin{cases} 0, \text{ при } w_i \in [0, \dots, 9]; \\ 1, \text{ при } w_i \in [10, \dots, 99]; \\ 2, \text{ при } w_i \in [100, \dots, 999]. \end{cases}$$

2. Отбор витков, на которые может быть осуществлено наведение. Перед началом наблюдений или после проведения наблюдений в каждой последующей точке встречи для всех витков производится следующая последовательность действий.

2.1. Итерационный расчет  $t_{ij}^H$ .

2.1.1.  $\ell = 0$ ,  $t_{ij}^H = t_0$ ,  $\Delta t_{ij}^{наб} = 0$ ,  $\Delta t_{ij}^H = 0$ ,

где  $t_0$  – текущий момент времени.

2.1.2. Если  $t_{ij}^H < t_i^{ex}$ , то  $t_{ij}^H = t_i^{ex}$ .

2.1.3. Если  $t_{ij}^H > t_i^{6bx}$ , то переход на п. 2.6.

2.1.4. Расчет координат точки встречи, времени наведения и времени до момента прохождения:

$$\alpha_{ij} = f(t_{ij}^H), \beta_{ij} = f(t_{ij}^H)$$

$$\Delta t_{ij}^{Hae} = f(\alpha_{ij}, \beta_{ij}), \Delta t_{ij}^H = f(V_{ij}^{HOKO}),$$

где  $V_{ij}^{HOKO}$  – расчетная видимая скорость движения НОКО в  $j$ -й точке встречи  $i$ -го витка.

2.1.5.  $t_{ij}^H = t_0 + \Delta t_{ij}^{Hae} + \Delta t_{ij}^H$ .

2.1.6.  $\ell = \ell + 1$ .

2.1.7. Если  $\ell < m$  ( $m \geq 2$ ), то переход на п. 2.1.2.

2.2. Расчет запаса времени  $\Delta t_{ij}^3$ :  $\Delta t_{ij}^3 = t_{ij}^H - t_0 - \Delta t_{ij}^{Hae} - \Delta t_{ij}^H$ .

2.3. Если  $\Delta t_{ij}^3 \geq \Delta t_{\max}^3$ , то переход на п. 2.6.

2.4. Расчет оптимального времени следующего наблюдения на данном витке  $t_{ij}^{Hopt}$ :

Если  $j = 1$ , то  $t_{ij}^{Hopt} = t_i^{ex}$ , иначе  $t_{ij}^{Hopt} = t_{i(j-1)}^H + \Delta t_i^{opt}$ .

2.5. Расчет упущенного времени  $\Delta t_{ij}^y$ :

$$\Delta t_{ij}^y = \frac{t_{ij}^H - t_{ij}^{Hopt}}{\Delta t_i^{opt}}.$$

2.6. Следующий виток.

2.7. Виток отбрасывается и в данном цикле планирования больше участия не принимает.

2.8. Если не один виток не был отобран, то выбирается такой  $i$ -й виток, для которого  $t_i^{ex} - t_0 = \min$  и производится переход на п.4.

2.9. Каждый отобранный виток представляется в виде набора параметров  $\Theta_{ij} = \{W_i, w_i, \Delta t_{ij}^z, \Delta t_{ij}^y\}$

3. Выбор следующей точки встречи. Для всех витков, отобранных в п.2., в порядке возрастания  $t_i^{ex}$  производится следующая последовательность действий.

3.1. При отсутствии «выбранного» витка, им становится текущий виток-«кандидат»:

$\Theta^g = 0$ , то  $\Theta^g = \Theta^k$ . Примечание: т.к. в дальнейшем в сравнении участвует только два набора параметров – «выбранного» витка  $\Theta^g$  и витка-«кандидата»  $\Theta^k$ , то в дальнейшем изложении нижние индексы отдельных параметров витков опущены.

3.2. Если  $W^g < W^k$ , то

$$\Delta t^{zk} = \Delta t^{zk} - \Delta t^{\phi},$$

где  $\Delta t^{zk}$  – запас времени "кандидата";  $\Delta t^{\phi}$  – заданное значение запаса по времени.

3.3. Если  $(\Delta t^{zg} > 0) \wedge (\Delta t^{zk} < \Delta t^{zg})$ , то  $\Theta^g = \Theta^k$ .

3.4. Если  $(\Delta t^{zg} > 0) \vee (\Delta t^{zk} > 0)$ , то переход на п. 3.11.

3.5. Если  $W^g < W^k$ , то  $\Theta^g = \Theta^k$ .

3.6. Если  $W^g > W^k$ , то переход на п. 3.11.

3.7. Если  $w^g > w^k$ , то переход на п. 3.10.

3.8. Если  $(w^g = w^k) \wedge (\Delta t^{yk} > \Delta t^{yg})$ , то  $\Theta^g = \Theta^k$ .

3.9. Если  $(\Delta t^{yk} > \Delta t^{yg}) \vee (\Delta t^{yk} > 0)$ , то  $\Theta^g = \Theta^k$ .

3.10. Если  $(\Delta t^{yk} > \Delta t^{yg}) \wedge (\Delta t^{yg} < \Delta t_{\min}^y)$ , где  $\Delta t_{\min}^y$  – заданное минимальное упущенное время, то  $\Theta^g = \Theta^k$ .

3.11. Выбор следующего витка.

3.11. Переход на п. 3.2.

4. Наведение телескопа в точку встречи для выбранного витка.

Константы  $c$ ,  $\Delta t_{\min}^{opt}$ ,  $\Delta t_{\max}^{opt}$ ,  $\Delta t_{\max}^z$ ,  $\Delta t^{\phi}$ ,  $\Delta t_{\min}^y$  определяются индивидуально для каждого телескопа.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА

Описанный выше алгоритм реализован в программном комплексе управления автоматическим телескопом разработанным в НИИ “Николаевская астрономическая обсерватория” (НАО). Данный программный комплекс применяется для регулярных наблюдений НОКО на комплексе телескопов МОБИТЕЛ НАО [10], телескопе Celestron Главной астрономической обсерватории, а также установлен на телескопе Celestron Выгорлатской астрономической обсерватории (Словакия) и телескопе КТС Одесской астрономической обсерватории. Особенностью программного комплекса является применение комбинированного метода ПЗС наблюдений [10], наблюдения осуществляются в автоматическом режиме.

В НИИ НАО основным телескопом для координатных наблюдений НОКО является телевизионный телескоп ТВТ (D=48мм, F=135мм) оснащенный ТВ ПЗС-камерой Watek 902h, поле зрения составляет  $2.8^{\circ} \times 2.1^{\circ}$ . Наблюдения НОКО ведутся комбинированным методом ПЗС наблюдений с использованием способа накопления кадров со смещением [11]. При наблюдении НОКО, за время пролета НОКО через поле зрения, одновременно накапливается один кадр с изображением НОКО с экспозицией 2 – 6 с и кадр со звездами с экспозицией 6 с. Благодаря небольшим размерам телескопа и применению промышленных шаговых двигателей скорость наведения телескопа составляет  $20^{\circ}/с$ . Цикл наблюдения (наведение + экспозиция) составляет 11 – 14 с, что позволяет эффективно наблюдать одновременно несколько объектов, поэтому особо важным является эффективность автоматического планирования наблюдений. С учетом технических характеристик телескопа ТВТ используются следующие константы автоматического планирования наблюдений:  $c = 6$ ,  $\Delta t_{\min}^{opt} = 30$  с,  $\Delta t_{\max}^{opt} = 120$  с.,  $\Delta t_{\max}^z = 60$  с,  $\Delta t^{\phi} = 30$  с.,  $\Delta t_{\min}^y = -0,33$ .

Списки НОКО для наблюдения на телескопе ТВТ формируются с учетом научных задач в рамках выполнения работ Украинской сетью оптических станций (УМОС) [12]. В течение ночи телескоп осуществляет наблюдения около 40

объектов. За 2014–2016гг. на телескопе ТВТ получен массив 41 тыс. положений НОКО.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан эвристический метод автоматического планирования наблюдений НОКО оптическими инструментами в режиме «неподвижный телескоп». Выбор последующей точки встречи производится после каждого наблюдения по критерию максимума взвешенной суммы наблюдаемых витков. В качестве веса используется значение приоритета наблюдаемых НОКО.

2. Разработанный метод успешно применяется для регулярных наблюдений НОКО в Николаевской астрономической обсерватории а также Главной астрономической обсерватории. За 2014-2016гг. на телескопе ТВТ НАО получен массив 41 тыс. положений НОКО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Denny R. B. Dispatch Scheduling of Automated Telescopes // The Society for Astronomical Sciences 23rd Annual Symposium on Telescope Science. Published by the Society for Astronomical Sciences. – 2004. – P. 35–50.

2. Duncan A. R. Observation scheduling for a network of small-aperture telescopes // Publications of the Astronomical Society of Australia. – 2007. – **24**, 2. – P. 53–60.

3. Kubánek P., Jelínek M., Vítek S. et al. RTS2: a powerful robotic observatory manager // Advanced Software and Control for Astronomy. Proceedings of the SPIE. – 2006. – **6274**. – id 62741V.

4. Steele I. A., Carter D. Control Software and Scheduling of the Liverpool Robotic Telescope // Telescope Control Systems II. Proc. SPIE. – 1997. – **3112**. – P. 222–233.

5. Kubánek P., Jelínek M., Nekola M. et al. RTS2 - Remote Telescope System, 2nd version // GAMMA-RAY BURSTS: 30 YEARS OF DISCOVERY: Gamma-Ray Burst Symposium. AIP Conference Proceedings. – 2004. – **727**. – P. 753–756.

6. Молотов И.Е., Воропаев В.А., Боровин Г.К. Работы ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в области мониторинга опасных космических объектов и событий.

Возможности повышения эффективности работы сегмента АСПОС ОКП по высоким орбитам // [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://astronomer.ru/data/0231/IPM\\_Works.pptx](http://astronomer.ru/data/0231/IPM_Works.pptx).

7. Четверушкин Б.Н. Система РАН для сбора, обработки и анализа информации о техногенной обстановке в околоземном космическом пространстве // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://astronomer.ru/data/0120/HTC.ppt>.

8. Agarov V., Molotov I, Stepanyants V., Lapshin A. Tools used in KIAM space debris data center for processing and analysis of information on space debris objects obtained by the ISON network // [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV\\_Software\\_tools.pptx](http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV_Software_tools.pptx).

9. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. – М.: «Наука», 1975. – 359 с.

10. Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С. и др. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія. – 2012. – **18**, № 4. – С. 52–58.

11. Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных космических объектов с использованием способа накопления кадров со смещением // Космічна наука і технологія. – 2011. – **17**, № 3. – С. 71–76.

12. Шульга О.В., Кравчук С.Г., Сибирякова Е.С. и др. Розвиток української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколоземного космічного простору // Космічна наука і технологія. 2015. – **21**, № 3. – С. 74–82.

## REFERENCES

1. Denny R. B. Dispatch Scheduling of Automated Telescopes. *The Society for Astronomical Sciences 23rd Annual Symposium on Telescope Science. Published by the Society for Astronomical Sciences*, 35–50 (2004).

2. Duncan A. R. Observation scheduling for a network of small-aperture telescopes // *Publications of the Astronomical Society of Australia*, **24** (2), 53–60 (2007).

3. Kubánek P., Jelínek M., Vítek S. et al. RTS2: a powerful robotic observatory manager. *Advanced Software and Control for Astronomy. Proceedings of the SPIE*, **6274**, id 62741V (2006).

4. Steele I. A., Carter D. Control Software and Scheduling of the Liverpool Robotic Telescope. *Telescope Control Systems II. Proc. SPI*, **3112**, 222–233 (1997).
5. Kubánek P., Jelínek M., Nekola M. et al. RTS2 - Remote Telescope System, 2nd version. *GAMMA-RAY BURSTS: 30 YEARS OF DISCOVERY: Gamma-Ray Burst Symposium. AIP Conference Proceedings*, **727**, 753–756 (2004).
6. Molotov I. Ye, Воропаев В.А., Боровин Г.К. Works of KIAM RAS in the field of monitoring of dangerous space objects and events. The opportunities to increase the ASPOS OKP's high orbits segment efficiency. Mode of access: [http://astronomer.ru/data/0231/IPM\\_Works.pptx](http://astronomer.ru/data/0231/IPM_Works.pptx). [in Russian].
7. Chetverushkin B.N. The RAS system for collecting, processing and analyzing information on the technogenic situation in near-Earth space. Mode of access: <http://astronomer.ru/data/0120/HTC.ppt>. [in Russian].
8. Agapov V., Molotov I, Stepanyants V., Lapshin A. Tools used in KIAM space debris data center for processing and analysis of information on space debris objects obtained by the ISON network. Mode of access: [http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV\\_Software\\_tools.pptx](http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV_Software_tools.pptx).
9. Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W. The scheduling theory. – M.: «Nauka», 1975, 359 p. [in Russian]
10. Shulga O. V., Kozyryev Ye. S., Sybiryakova Ye. S. et al. The mobile telescope complex of RI MAO for observation of near-earth space objects. *Space science and technology*, **18**(4), 52–58 (2012). [in Russian].
11. Kozyryev Ye. S., Shulga O. V., Sybiryakova Ye. S. TV observations of low Earth orbit objects using frame accumulation with shift. *Space science and technology*, **17** (3), 71–76 (2011). [in Russian].
12. Shulga O. V., Kravchuk S. G., Sybiryakova Ye. S. et al. Development of Ukrainian network of optical stations UMOS as component of control systems for near-Earth space. *Space science and technology*, **21** (3), 74–82(2015). [in Ukrainian].