

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.071>

УДК 520.88

Е. С. Козырев¹, А. М. Кожухов², Е. С. Сибирякова¹

¹ Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

² Центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля, с. Залесцы, Дунаевецкий р-н, Хмельницкая обл., Украина

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА НЕПОДВИЖНОМ ТЕЛЕСКОПЕ

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 витков, на которых проведены наблюдения (проводок). В качестве веса проводки используется значение приоритета наблюдений объекта, которому принадлежит данный виток. Показаны результаты применения метода в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория».

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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие оптики, электроники и вычислительной техники привело к качественным изменениям в наблюдательной астрономии. Появились новые светосильные оптические схемы и высокочувствительная светоприемная аппаратура, что позволило снизить время экспозиции при наблюдениях. Кроме того, новые «быстрые» компьютеризованные монтировки, управляемые специальным программным обеспечением, позволили снизить время перехода между наблюдениями двух последовательных объектов. Современные автоматические или автоматизированные телескопы, созданные с учетом вышперечисленного, 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, в том числе и за счет исключения «человеческого фактора» при принятии решений о следующем наблюдаемом объекте. Не является в данном случае исключением и наблюдение низкоорбитальных космических объектов (НОКО).

В последние 15 лет в Украине ведутся работы в направлении создания системы ведения каталога орбит (под ведением каталога орбит подразумевается периодическое уточнение элементов орбит) НОКО оптическими средствами наблюдения. В последние несколько лет данные работы ведутся в рамках Украинской сети оптических станций (Українська мережа оптичних станцій — УМОС) [6]. Предлагаемый в данной работе алгоритм планирования наблюдений НОКО является

© Е. С. КОЗЫРЕВ, А. М. КОЖУХОВ, Е. С. СИБИРЯКОВА, 2017

составной частью этой системы и основан на многолетнем опыте наблюдений НОКО на различных телескопах Научно-исследовательского института «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО).

Имеется достаточно большое количество работ, посвященных планированию наблюдений, в том числе на удаленно управляемых телескопах или телескопах-роботах. В работах [8, 9, 14, 16] основное внимание уделяется оптимизации планирования разнородных наблюдений объектов, разбросанных по всей небесной сфере, за одну ночь, в том числе и алертных наблюдений гамма-всплесков [13]. Все данные типы наблюдений проводятся в режиме суточного ведения, а большая часть наблюдаемых объектов находится в зоне видимости телескопа значительную часть ночи. Данные условия также значительно отличаются от условий наблюдения НОКО.

Известные зарубежные работы [10, 11, 15] посвящены в основном планированию наблюдений объектов на геостационарной орбите, условия наблюдения которых также серьезно отличаются от условий наблюдения НОКО.

В докладах, посвященных российской Наземной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИАФН), неоднократно упоминалось об использовании специально разработанных алгоритмов планирования наблюдений объектов на геостационарной и высокоэллиптических орбитах [3, 4, 7]. Однако работ с описанием данных алгоритмов найдено не было. Также не было найдено описаний методов планирования наблюдений НОКО для автоматических или автоматизированных телескопов. Таким образом, целью данной работы является разработка вычислительного метода планирования наблюдений НОКО для автоматизированного или автоматического телескопа является актуальной.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Низкоорбитальные космические объекты обладают чрезвычайно высокой скоростью видимого движения по небесной сфере (до $2^\circ/\text{с}$), и находятся в зоне видимости телескопа в основном не более 10 мин. 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.

Позиционные наблюдения околоземных космических объектов в УМОС производятся следующими методами [6]: суточным ведением, сопровождением по видимой траектории, накоплением кадров со смещением и в режиме синхронного переноса заряда. Суточное ведение практически не применяется при наблюдениях НОКО. При сопровождении телескоп движется вместе с наблюдаемым НОКО, постоянно удерживая его в поле зрения. Последние два метода используются при наблюдениях на неподвижном телескопе [1, 12]. 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, разделенных достаточно значительным интервалом.

Таким образом, при наблюдении НОКО на неподвижном телескопе производится следующая последовательность действий:

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

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

Опыт позиционных наблюдений НОКО показал, что для уточнения орбиты по наблюдениям на данном прохождении НОКО достаточно 4 — 6 точек, равномерно распределенных вдоль видимого участка орбиты. В таком случае между точками наблюдений одного прохождения остается достаточно времени для наведения в выбранные точки наблюдения других НОКО, находящихся в зоне обзора телескопа. Эта особенность наблюдений НОКО легла в основу разрабатываемого вычислительного метода.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для телескопа имеется список N прохождений (витков) НОКО ($i = 1, i, \dots, N$), доступных для на-

блюдения в данную ночь. Для каждого витка известны начальные условия, позволяющие определить время t_i^{BX} входа НОКО на i -м витке в зону видимости телескопа, время $t_i^{\text{ВЫХ}}$ выхода НОКО на i -м витке из зоны видимости, а также координаты $(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ j -й точки встречи i -го витка на заданное время наблюдения t_{ij}^{H} . Координаты точки встречи могут задаваться в экваториальной или горизонтальной системе координат, в зависимости от монтировки 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 от 0 до 999 (больше — выше). Необходимо спланировать наблюдения таким образом, чтобы взвешенная сумма витков, на которых были проведены наблюдения НОКО (проводок [6]), была максимальной:

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

где

$$u_i = \begin{cases} 1 & \text{при } n_i \geq n_{\min}, \\ 0 & \text{в ином случае,} \end{cases}$$

n_i — количество точек наблюдений НОКО на i -м витке, n_{\min} — минимально необходимое количество точек наблюдений на витке.

Следует также заметить, что определение приоритета (веса) НОКО — весьма сложная задача сама по себе, выходящая за рамки данной работы.

Приоритет объекта должен обновляться на каждую ночь; он складывается из нескольких составляющих: важность объекта с точки зрения потребителя орбитальной информации; возраст элементов орбиты; имеющиеся наблюдения за последние несколько суток; условия наблюдения на следующую ночь на разных наблюдательных пунктах (для координации наблюдений сети телескопов при наличии таковой).

Метод определения приоритетов безусловно должен зависеть от того, как этот приоритет будет использоваться в конкретном методе планирования наблюдений.

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 [2] с использованием так называемого «жадного» алгоритма.

Стратегия предлагаемого вычислительного метода заключается в следующем.

1. Если в зоне видимости только один НОКО, то он наблюдается непрерывно.

2. Если в зоне видимости несколько НОКО, то по очереди наблюдаются все, упрощенно задача планирования состоит в том, чтобы определить, какие объекты нужно наблюдать чаще.

3. На относительную частоту наблюдения конкретного НОКО влияет длительность видимого витка и его приоритет.

4. Чтобы полностью переключить наблюдения на какой-либо объект (группу объектов) используется понятие уровень приоритета: пока в зоне видимости есть объект с большим уровнем приоритета, и количество наблюдений по нему недостаточно, объекты с меньшим уровнем приоритета не наблюдаются совсем.

5. Если нет возможности получить оптимальное количество точек наблюдения для объекта, он все равно наблюдается (считается, что лучше получить по двум объектам по две точки, чем пять точек по одному объекту).

Перед описанием вычислительного метода следует дополнительно ввести несколько понятий. Пусть $\Delta t_{ij}^{\text{HAB}}$ — время наведения в j -ю точку встречи i -го витка, а Δt_{ij}^{H} — время наблюдения до

момента прохождения НОКО j -й точки встречи i -го витка. Δt_{ij}^H соответствует промежутку времени, которое НОКО на i -м витке находится в поле зрения телескопа, наведенного на j -ю точку 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 Δt_i^{opt} :

$$\Delta t_i^{opt} = \begin{cases} \frac{t_i^{BXX} - t_i^{BX}}{c}, \\ \Delta t_{min}^{opt} \text{ при } \frac{t_i^{BXX} - t_i^{BX}}{c} < \Delta t_{min}^{opt}, \\ \Delta t_{max}^{opt} \text{ при } \frac{t_i^{BXX} - t_i^{BX}}{c} > \Delta t_{max}^{opt}, \end{cases} \quad (2)$$

где c , Δt_{min}^{opt} , Δt_{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. $l = 0$, $t_{ij}^H = t_0$, $\Delta t_{ij}^{HAB} = 0$, $\Delta t_{ij}^H = 0$,

где t_0 — текущий момент времени.

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

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

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

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= f(t_{ij}^H), \quad \beta_{ij} = f(t_{ij}^H), \\ \Delta t_{ij}^{HAB} &= f(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \alpha_0, \beta_0), \\ \Delta t_{ij}^H &= f(V_{ij}^{НОКО}), \end{aligned}$$

где α_{ij} , β_{ij} — координаты точки встречи, α_0 , β_0 — текущее положение телескопа, $V_{ij}^{НОКО}$ — расчетная видимая скорость движения НОКО в j -й точке встречи i -го витка.

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

2.1.6. $l = l + 1$.

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

2.2. Расчет запаса времени Δt_{ij}^3 :

$$\Delta t_{ij}^3 = t_{ij}^H - t_0 - \Delta t_{ij}^{HAB} - \Delta t_{ij}^H.$$

2.3. Если $\Delta t_{ij}^3 \geq \Delta t_{max}^3$, то переход на п. 2.7.

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

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

2.5. Расчет коэффициента «упущенного времени» Δt_{ij}^y :

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

Переход на п. 2.7.

2.6. Виток отбрасывается, и в цикле планирования больше участия не принимает.

2.7. Следующий виток.

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

2.9. Каждый отобранный виток представляется в виде набора параметров $\Theta_{ij} = \{W_i, w_i, \Delta t_{ij}^3, \Delta t_{ij}^y\}$.

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

3.1. При отсутствии «выбранного» витка им становится текущий «виток-кандидат»: если $\Theta^B = 0$, то $\Theta^B = \Theta^K$.

Примечание: так как в дальнейшем в сравнении участвуют только два набора параметров — «выбранного» витка Θ^B и «витка-кандидата» Θ^K , то в дальнейшем изложении нижние индексы отдельных параметров витков опущены.

3.2. Если $W^B < W^K$, то $\Delta t^{3K} = \Delta t^{3K} - \Delta t^{\Phi}$, где Δt^{3K} — запас времени «кандидата», Δt^{Φ} — заданное значение запаса по времени.

3.3. Если $(\Delta t^{3B} > 0) \wedge (\Delta t^{3K} < \Delta t^{3B})$, то $\Theta^B = \Theta^K$.

3.4. Если $(\Delta t^{3B} > 0) \vee (\Delta t^{3K} > 0)$, то переход на п. 3.11.

3.5. Если $W^B < W^K$, то $\Theta^B = \Theta^K$.

3.6. Если $W^B > W^K$, то переход на п. 3.11.

3.7. Если $w^B > w^K$, то переход на п. 3.10.

3.8. Если $(w^B = w^K) \wedge (\Delta t^{yK} > \Delta t^{yB})$, то $\Theta^B = \Theta^K$.

3.9. Если $(\Delta t^{yK} > \Delta t^{yB}) \vee (\Delta t^{yK} > 0)$, то $\Theta^B = \Theta^K$.

3.10. Если $(\Delta t^{yK} > \Delta t^{yB}) \wedge (\Delta t^{yB} < \Delta t_{min}^y)$, где Δt_{min}^y — заданный минимальный коэффициент «упущенного времени», то $\Theta^B = \Theta^K$.

3.11. Выбор следующего витка.

3.12. Переход на п. 3.2.

4. Наведение телескопа в точку встречи для выбранного витка.

Константы c , Δt_{\min}^{opt} , Δt_{\max}^{opt} , Δt_{\max}^3 , Δt^{ϕ} , Δt_{\min}^y определяются индивидуально для каждого телескопа.

Следует отметить, что применяемые в данном методе подходы могут быть также использованы и при планировании наблюдений НОКО методом сопровождения по видимой траектории после некоторой модификации. Однако рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА

Описанный выше алгоритм реализован в программном комплексе управления автоматическим телескопом разработанном в НИИ НАО. Данный программный комплекс применяется для регулярных наблюдений НОКО на комплексе телескопов МОБИТЕЛ НИИ НАО [5], телескопе «Celestron» Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины. Также он применяется на телескопе «Celestron» Выгорлатской астрономической обсерватории (Словакия) и телескопе КТС Научно-исследовательского института «Астрономическая обсерватория» при Одесском национальном университете им. И. И. Мечникова. Особенностью программного комплекса является применение комбинированного метода наблюдений с использованием приборов с зарядовой связью (ПЗС) [5], наблюдения осуществляются в автоматическом режиме.

В НИИ НАО основным телескопом для координатных наблюдений НОКО является телевизионный телескоп ТВТ ($D = 48$ мм, $F = 135$ мм), оснащенный телевизионной ПЗС-камерой «Watec 902H», поле зрения составляет $2.8 \times 2.1^\circ$. Наблюдения НОКО ведутся комбинированным методом ПЗС-наблюдений с использованием способа накопления кадров со смещением [1]. При наблюдении НОКО за время его пролета 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 про-

мышленных шаговых двигателей, скорость наведения телескопа составляет $20^\circ/\text{с}$. 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, $\Delta t_{\max}^3 = 60$ 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) [6]. В течение ночи телескоп осуществляет наблюдения в среднем около 40 объектов в 70–80 проводках. До введения рассматриваемого метода данные значения составляли около 15 объектов в 20–25 проводках. Всего за 2014–2016 гг. 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 проводок. В качестве веса используется значение приоритета наблюдаемых НОКО.

2. Разработанный метод успешно применяется для регулярных наблюдений НОКО в Николаевской астрономической обсерватории, а также в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины. Его использование позволяет значительно увеличить количество проводок НОКО, наблюдаемых в среднем за ночь.

3. Результаты, полученные при разработке метода, могут быть полезны другим исследователям или группам исследователей, работающим над подобной тематикой.

4. Дальнейшие исследования могут быть направлены как на усовершенствование данного метода планирования наблюдений, так и для его обобщения на случай наблюдений НОКО в режиме сопровождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. — М.: Наука, 1975. — 359 с.
3. Молотов И. Е., Воронаев 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.
4. 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>.
5. 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.
6. Шульга О. В., Кравчук С. Г., Сибирякова Е. С. та ін. Розвиток української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколоземного космічного простору // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 3. — С. 74—82.
7. 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 [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV_Software_tools.pptx.
8. 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.
9. Duncan A. R. Observation scheduling for a network of small-aperture telescopes // Publ. Astron. Soc. Australia. — 2007. — 24, N 2. — P. 53—60.
10. Frueh C. Sensor tasking for multi-sensor space object surveillance [Электронный ресурс] // Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18—21 April 2017, published by the ESA Space Debris Office / Ed. by T. Flohrer & F. Schmitz, SDC7-paper533. — Режим доступа: <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int>.
11. Hinze A., Fiedler H., Schildknecht T. Optimal Scheduling for Geosynchronous Space Object Follow-up Observations Using a Genetic Algorithm [Электронный ресурс] / Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2016. — Режим доступа: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/Poster/Hinze.pdf>.
12. Kara I. V., Kozryyev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects // Bull. Crim. Astrophys. Observatory. — 2011. — 107. — P. 98—102.
13. Kubánek P., Jelínek M., Nekola M., et al. RTS2 — Remote Telescope System, 2nd version. // AIP Conf. Proc. — 2004. — 727. — P. 753—756. — (GAMMA-RAY BURSTS: 30 YEARS OF DISCOVERY: Gamma-Ray Burst Symposium).
14. Kubánek P., Jelínek M., Vitek S., et al. RTS2: a powerful robotic observatory manager // Adv. Proc. SPIE. Software and control for astronomy. — 2006. — 6274. — id 62741V.
15. Musci R., Schildknecht T., Ploner M., Beutler G. Orbit improvement for GTO Objects Using Follow-up Observations // Adv. Space Res. — 2005. — 35, N 7. — P. 1236—1242.
16. Steele I. A., Carter D. Control Software and Scheduling of the Liverpool Robotic Telescope // Proc. SPIE. Telescope Control Systems II. — 1997. — 3112. — P. 222—233.

Стаття надійшла до редакції 12.05.17

REFERENCES

1. Kozryyev Ye. S., Shulga O. V., Sybiryakova Ye. S. Televizionnye nabludeniia nizkoorbitalnykh kosmicheskikh ob'ektov s ispolzovaniem sposoba nakopleniia kadrov so smescheniem [TV observations of low Earth orbit objects using frame accumulation with shift]. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (3), 71—76 (2011) [in Russian].
2. Conway R. W., Maxwell W. L., Miller L. W. Teoriia raspisaniia [The scheduling theory], 359 p. (Nauka, M., 1975) [in Russian].
3. Molotov I. Ye., Voropaev V. A., Borovin G. K. Raboty IPM im. M.V. Keldysha RAN v oblasti monitoring opasnykh kosmicheskikh ob'ektov i sobytii. Vozmozhnosti povysheniia effektivnosti raboty segmenta ASPOS OKP po vysokim ob'ektam [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]. Retrieved from http://astronomer.ru/data/0231/IPM_Works.pptx. [in Russian].
4. Chetverushkin B. N. Sistema RAN dlia sbora, obrabotki I analiza informatsii o tekhnogennoi obstanovke v okolozemnom kosmicheskom prostranstve [The RAS system for collecting, processing and analyzing information on the technogenic situation in near-Earth space]. Retrieved from <http://astronomer.ru/data/0120/HTC.ppt> [in Russian].
5. Shulga O. V., Kozryyev Ye. S., Sybiryakova Ye. S., et al. Mobilnyi kompleks teleskopov NII NAO dlia nablyudeniia ob'ektov okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva [The mobile telescope complex of RI MAO for observation of

- near-earth space objects]. *Kosm. nauka tehnol.*, **18** (4), 52–58 (2012) [in Russian].
6. *Shulga O. V., Kravchuk S. G., Sybiryakova Ye. S., et al.* Rozvytok ukrainskoi merezhi optychnykh stantsii UMOS iak skladovogo elementu systemy kontrolyu navkolozemnogo kosmichnogo prostoru [Development of Ukrainian network of optical stations UMOS as component of control systems for near-Earth space]. *Kosm. nauka tehnol.*, **21** (3), 74–82 (2015) [in Ukrainian].
 7. *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. Retrieved from http://astronomer.ru/data/0179/AGAPOV_Software_tools.pptx.
 8. *Denny R. B.* Dispatch Scheduling of Automated Telescopes. *The Society for Astronomical Sciences 23rd Annual Symposium on Telescope Science. Publ. Soc. Astron. Sci.*, 35–50, (2004).
 9. *Duncan A. R.* Observation scheduling for a network of small-aperture telescopes. *Publ. Astron. Soc. Australia*, **24** (2), 53–60 (2007).
 10. *Frueh C.* Sensor tasking for multi-sensor space object surveillance. Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017, publ. by the ESA Space Debris Office, Eds T. Flohrer, F. Schmitz, SDC7-paper533. Retrieved from <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int>.
 11. *Hinze A., Fiedler H., Schildknecht T.* Optimal Scheduling for Geosynchronous Space Object Follow-up Observations Using a Genetic Algorithm. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2016*. — Retrieved from <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/Poster/Hinze.pdf>.
 12. *Kara I. V., Kozyryev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V.* NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bull. Crimean Astrophys. Observatory*, **107**, 98–102 (2011).
 13. *Kubánek P., Jelinek M., Nekola M., et al.* RTS2 — Remote Telescope System, 2nd version. *GAMMA-RAY BURSTS: 30 YEARS OF DISCOVERY: Gamma-Ray Burst Symposium. AIP Conf. Proc.*, **727**, 753–756. (2004).
 14. *Kubánek P., Jelinek M., Vitek S., et al.* RTS2: a powerful robotic observatory manager, Proc. SPIE. *Advanced Software and Control for Astronom.*, 6274, id 62741V (2006).
 15. *Musci R., Schildknecht T., Ploner M., Beutler G.* Orbit Improvement for GTO Objects Using Follow-up Observations. *Adv. Space Res.*, **35**(7), 1236–1242 (2005).
 16. *Steele I. A., Carter D.* Control software and scheduling of the liverpool robotic telescope, Proc. SPIE. *Telescope Control Systems II.*, **3112**, 222–233 (1997).

Є. С. Козирев¹, О. М. Кожухов², Є. С. Сибірякова¹

¹ Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв, Україна

² Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля, с. Залісці, Дунаєвецький р-н, Хмельницька обл., Україна

МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА НЕРУХОМОМУ ТЕЛЕСКОПІ

Запропоновано евристичний метод автоматичного планування спостережень низкоорбітальних космічних об'єктів на автоматизованому або автоматичному телескопі. Метод базується на розв'язуванні динамічної задачі теорії розкладів за критерієм максимуму зваженої суми обертів, на яких було проведено спостереження (проводок). За вагу проводки використовується значення пріоритету спостережень об'єкта, якому належить даний оберт. Показано результати застосування методу у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

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

Ye. S. Kozyrev¹, O. M. Kozhukhov², Ye. S. Sybiryakova¹

¹ Research Institute Mykolaiv Astronomical Observatory, Mykolaiv, Ukraine

² Center of Special Information Receiving and Processing and Navigating Field Control, Zalitsi, Dunaivtsi District, Khmelnytsky Region, Ukraine

METHOD FOR AUTOMATIC SCHEDULING FOR LEO OBJECT'S OBSERVATIONS AT FIXED TELESCOPE

We propose a heuristic method for automatic scheduling for Low Earth Orbit (LEO) object's observations with the automatic telescope. The method is based on the solution of the dynamic problem of scheduling theory by the criterion of the maximum weighted sum of the revolutions being observed (tracks). The priority of observation of the object to which the given track belongs is used as the track's weight. We describe an effectiveness of this method applying it to the LEO objects observations at the Research Institute «Mykolaiv Astronomical Observatory».

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