

## Номинальная орбита космической обсерватории «Миллиметрон»

© Т. А. Сячина<sup>1</sup>, П. Р. Запевалин<sup>1</sup>, П. В. Мжельский<sup>1,2</sup>, А. Г. Рудницкий<sup>1</sup>, М. А. Щуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>НПО им. С. А. Лавочкина, г. Химки, Россия

### Реферат

Космическая обсерватория «Миллиметрон» — десятиметровый раскрываемый и охлаждаемый космический телескоп миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, особенностью которого является его работа в двух режимах: одиночного телескопа и наземно-космического интерферометра. Аппарат находится в активной стадии разработки и запустится в 2029 г. Цель проекта — изучение Вселенной: протопланетных дисков, ядер галактик, черных дыр, искажений реликтового излучения, космологических эффектов, а также решение ряда других задач, представляющих научный интерес. В процессе подготовки миссии одной из наиболее важных проблем стал выбор оптимальной номинальной орбиты для космического аппарата, которая удовлетворяла бы одновременно всем техническим требованиям и ограничениям, а вместе с этим в полной мере позволила бы решить все поставленные научные задачи.

В работе представлено описание номинальной орбиты для обсерватории «Миллиметрон», которая была получена в лаборатории баллистико-навигационного обеспечения космических проектов АКЦ ФИАН. Была выбрана орбита вокруг точки Лагранжа L2 системы «Солнце — Земля», которая имеет ряд преимуществ для космической миссии, таких как отсутствие засветки зеркала и оптимальное (u,v) заполнение в режиме интерферометра. Основным критерием для выбора орбиты являются продолжительные и успешные наблюдения двух черных дыр M87 и SGR A\*. В результате комплексного анализа и оптимизации параметров было показано, что эта орбита полностью удовлетворяет научным и техническим требованиям. Все вычисления, включая расчет эфемерид планет, гравитационного потенциала, производились на базе разработанного в лаборатории программного обеспечения.

Следует отметить, что «Миллиметрон» станет первым наземно-космическим интерферометром, который будет выполнять наблюдения в окрестностях точки Лагранжа L2 системы «Солнце — Земля» на расстоянии 1.5 млн км от Земли.

**Ключевые слова:** интерферометрия, РСДБ, баллистика, программное обеспечение, планирование наблюдений, баллистика и навигация космических аппаратов.

*Контакты для связи:* Сячина Татьяна Александровна ([syachina@asc.rssi.ru](mailto:syachina@asc.rssi.ru)).

**Для цитирования:** Сячина Т. А., Запевалин П. Р., Мжельский П. В., Рудницкий А. Г., Щуров М. А. Центр баллистико-навигационного обеспечения космических проектов АКЦ ФИАН // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 35–39.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.62.35-39>

## “Millimetron” Space Observatory Nominal Orbit

© Т. А. Syachina<sup>1</sup>, P. R. Zapevalin<sup>1</sup>, P. V. Mzhelskiy<sup>1,2</sup>, A. G. Rudnitskiy<sup>1</sup>, M. A. Shchurov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astro Space Center, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>NPO Lavochkin, Moscow, Russia

### Abstract

The space observatory "Millimetron" is a ten-meter deployable and cooled space telescope that will observe in millimeter and submillimeter wavelength ranges. The feature of the observatory is its operation in two modes: single-dish and space-ground interferometer. The spacecraft is under active development and will launch in 2029. The aim of the project is to study the Universe: protoplanetary disks, galactic nuclei, black holes, cosmic microwave background spectral distortions, cosmological effects, as well as to solve a number of other problems of scientific interest. One of the most important issues during the mission development is the choice of the optimal nominal orbit for the spacecraft, which would both satisfy all technical requirements and restrictions and fully allow solving all the scientific tasks of the program.

The paper describes the nominal orbit for "Millimetron" observatory, which was obtained in the laboratory of ballistic and navigation support for space projects of the ASC LPI. The choice fell on an orbit around the Lagrange point L2 of the Sun-Earth system, which has a number of advantages for a space mission, such as the absence of mirror illumination and optimal (u,v) coverage quality in the interferometer mode. The main criterion for choosing this orbit were long and successful observations of the two black holes M87 and SGR A\*. As a result of a comprehensive analysis and parameters optimization, it was shown that this orbit fully meets the scientific and technical requirements of the mission. All calcula-

tions, including the calculation of planetary ephemeris and gravitational potential, were made on the basis of the software developed in the laboratory.

It should be noted that "Millimetron" will be the first space-ground interferometer, which will perform observations in the vicinity of the Lagrange point L2 of the Sun-Earth system at a distance of 1.5 million km from the Earth.

**Keywords:** interferometry, VLBI, ballistics, software, observation planning, ballistics and spacecraft navigation.

*Contacts:* Tatyana A. Syachina ([syachina@asc.rssi.ru](mailto:syachina@asc.rssi.ru)).

**For citation:** Syachina T. A., Zapevalin P. R., Mzhelskiy P. V., Rudnitskiy A. G., Shchurov M. A. "Millimetron" space observatory nominal orbit // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 62. P. 35–39.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.62.35-39>

## Введение

Работа посвящена расчету номинальной орбиты космической обсерватории «Миллиметрон». «Миллиметрон» — первый в мире охлаждаемый космический телескоп субмиллиметрового, миллиметрового и дальнего инфракрасного диапазона. Цель создания обсерватории — выполнение следующих задач: изучение компактных ядер галактик, космологические исследования, поиск так называемых пребиотиков, в том числе воды. Аппарат будет работать в двух режимах: в режиме одиночного телескопа и в составе наземно-космического интерферометра, который позволяет достичь высокого углового разрешения порядка  $10^{-8}$  угл. сек (Кардашев, 2014).

В связи с разнообразием научных задач, решение которых запланировано в результате запуска аппарата, орбита космической обсерватории «Миллиметрон» должна быть в своём роде универсальной и удовлетворять большому количеству требований. Сложность поиска такой орбиты сводится к нахождению наиболее оптимальных критериев выбора типа орбиты, начального вектора состояния и приемлемых коррекций поддержания. Итоговым результатом решения этой задачи является номинальная орбита космической обсерватории.

## Ограничения и выбор орбиты

Основной трудностью выбора орбиты является наличие двух режимов работы обсерватории, каждый из которых накладывает свои технические и научные ограничения на итоговую конфигурацию орбиты. С учетом требований к бортовой системе охлаждения и терморегуляции КА однозначно было определено, что орбита аппарата должна находиться в окрестностях точки Лагранжа L2 системы «Солнце — Земля».

Были сформулированы основные критерии выбора орбитальной конфигурации для аппарата с учетом всех ограничений и требований:

1. Выход из плоскости эклиптики не должен превышать 400 тыс. км в целях максимальной видимости аппарата в наземные телескопы, расположенные на территории РФ.

2. Орбита должна обеспечивать минимальные проекции базы в режиме наземно-космического

интерферометра ( $> 0.8$  диаметров Земли) для двух основных источников: M87 и Sgr A\*.

3. Орбита также должна обеспечивать большие проекции базы в режиме наземно-космического интерферометра ( $> 100$  диаметров Земли) для различных источников, входящих в научную программу наблюдений обсерватории.

4. Должна отсутствовать засветка основного зеркала как прямым излучением от Солнца, так и отражённым от Земли и Луны, вследствие того факта, что антенне необходимо охлаждение до низких температур.

5. Поддержание устойчивой орбиты должно осуществляться в течение 10 лет.

Задача сводилась к поиску такой орбиты, которая удовлетворяет требованиям как режима одиночного телескопа, так и режима наземно-космического интерферометра. Одной из основных функций последнего является получение синтезированных изображений двух ключевых источников — сверхмассивных черных дыр M87 и Sgr A\*.

## Расчёт орбиты

В ходе исследования была выбрана гало-орбита вокруг точки L2 системы «Солнце — Земля» с учетом всех вышеуказанных требований и ограничений. Такой вариант орбиты имеет ряд преимуществ:

1. Возможность проводить наблюдения в течение всего года без засветки главного зеркала.

2. Для всех источников, входящих в научную программу наблюдений в режиме интерферометра, реализуются большие проекции баз (вплоть до 140 диаметров Земли).

3. Обеспечивается возможность проводить РСДБ-наблюдения на малых проекциях баз для двух выбранных источников.

Отдельно стоит отметить, что у подобного класса орбит существуют также и недостатки в рамках реализуемых задач:

1. Малые проекции баз реализуются только для источников, которые имеют небольшие эклиптические широты.

2. Возможность проведения интерферометрических наблюдений на малых базах появляется только один раз в год для каждого источника.

3. Сложно найти орбиту, позволяющую проводить РСДБ-картографирование для более чем двух источников в силу отсутствия необходимых малых проекций баз.

Расчет орбиты проводился в несколько этапов. Сначала было найдено аналитическое решение уравнений движения в точке L2, которое затем было уточнено численными методами, используя интегрирование методом Рунге — Кутты 7(8) порядка (Butcher, 1964). После этого было выбрано начало отсчета орбиты такое, что орбита стала удовлетворять требованию существования мини-

мальных баз для двух источников M87 и Sgr A\*. Затем эта орбита была переведена в полную модель сил, учитывающую центральное поле Земли, нецентральное поле Земли вплоть до 33 гармоники модели EGM2008 (Pavlis, et al., 2012), движение Солнца, Земли, Луны и планет солнечной системы, вычисленное по эфемеридам JPL DE431 (Giorgini, 2015), а также солнечное давление (без учёта ориентации аппарата).

Уравнение движения имеет вид

$$\ddot{\vec{r}}_s = -\frac{\mu\vec{r}_s}{|\vec{r}_s|^3} + \vec{a}_h + \sum_i \vec{a}_{pi} + \vec{a}_{sp}, \quad (1)$$

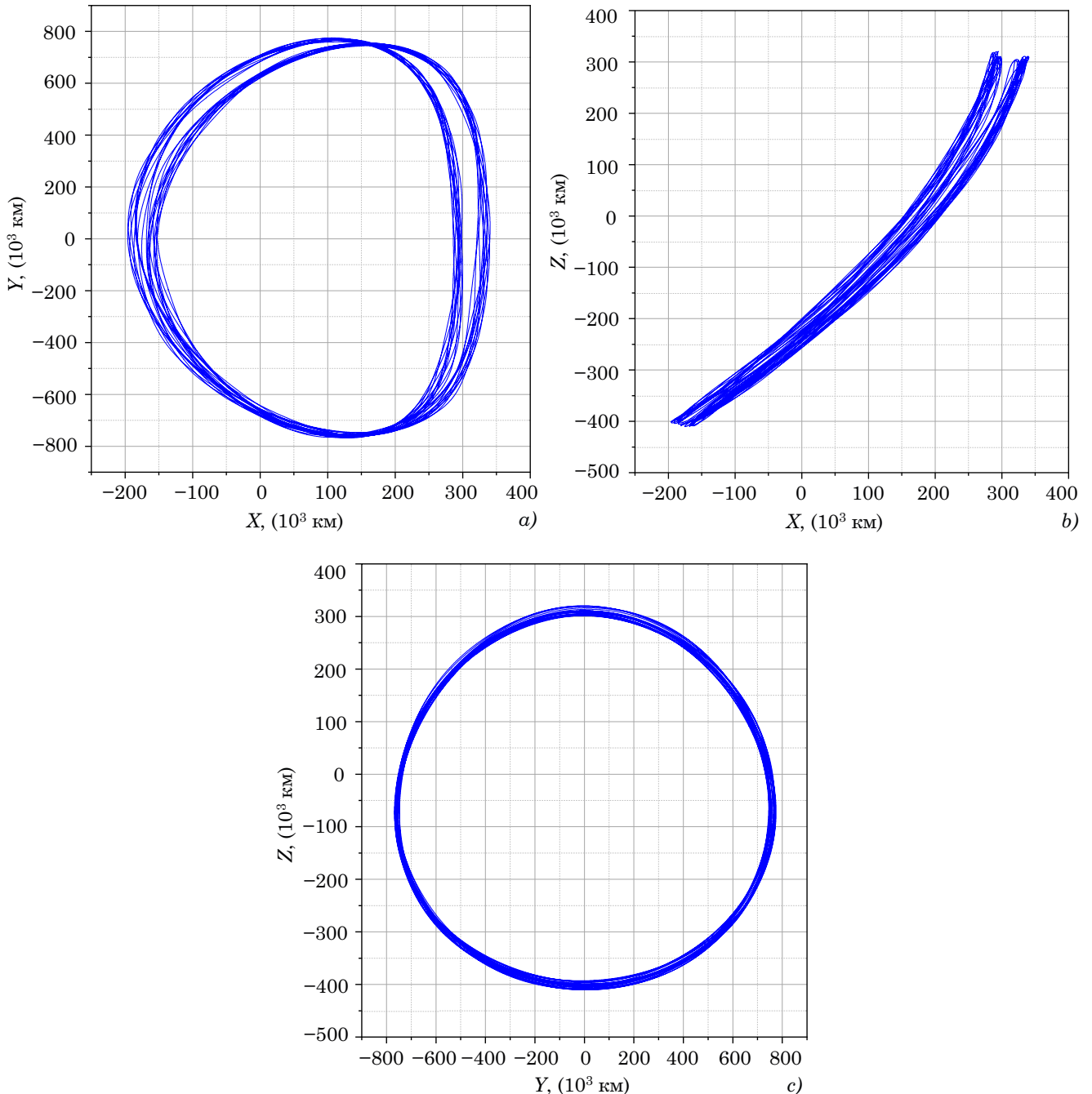


Рис. 1. Проекции (слева направо: XY, XZ и YZ) номинальной орбиты обсерватории «Миллиметрон» в системе координат с центром в точке L2 системы «Земля — Солнце»

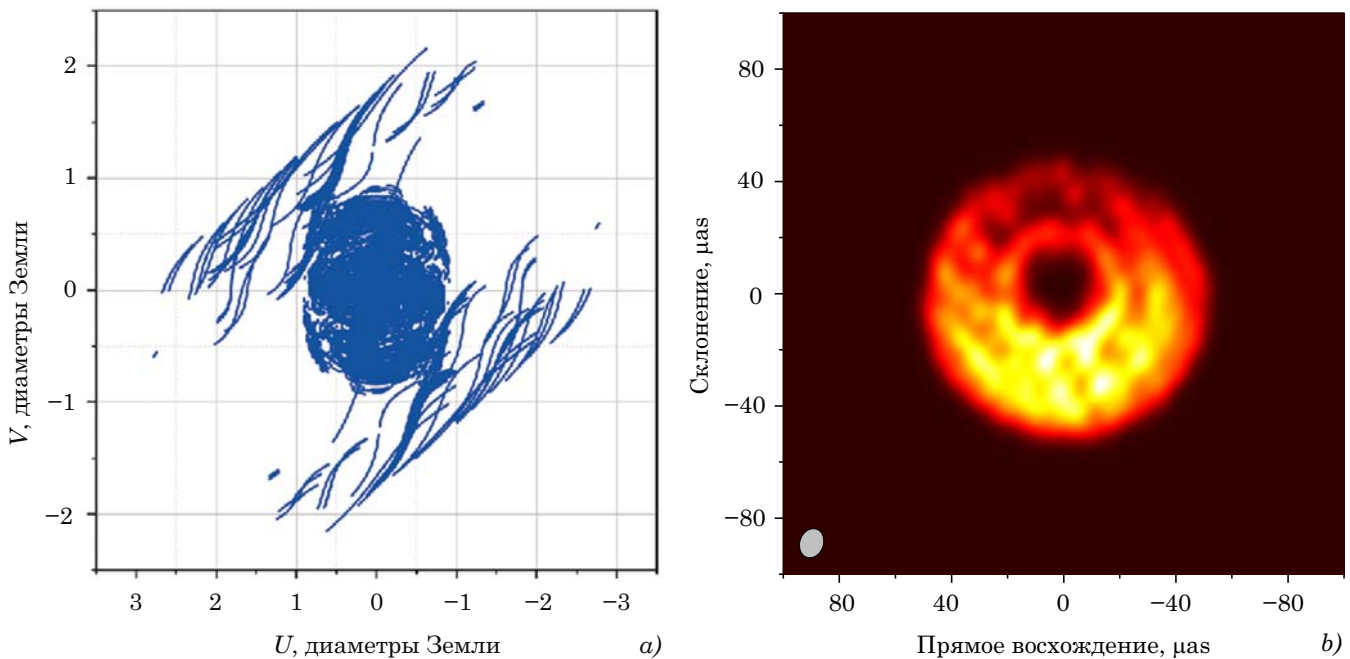


Рис. 2. *a* — заполнение  $(u, v)$  плоскости наземно-космического интерферометра «Миллиметрон» с рассчитанной номинальной орбитой и наземной поддержкой телескопов  $ngENT$ ; *b* — смоделированное синтезированное изображение для рассчитанной  $(u, v)$  плоскости источника M87 на частоте 230 ГГц

где  $\mu$  — гравитационный параметр Земли,  $\vec{r}_s$  — вектор положения космического аппарата,  $\vec{a}_n$  — возмущающее ускорение, обусловленное несферичностью Земли,  $\sum_i \vec{a}_{pi}$  — возмущающее ускорение, обусловленное присутствием других массивных тел в Солнечной системе (Луна, Солнце, планеты),  $\vec{a}_{sp}$  — возмущающее ускорение, обусловленное солнечным давлением.

Все расчеты выполнялись на базе программно-вычислительного комплекса, который полностью разрабатывается в лаборатории баллистико-навигационного обеспечения космических проектов Астрокосмического Центра ФИАН.

## Результаты

Полученные минимальные проекции баз составляют: для M87 — 14000 км (~1.2 диаметра Земли), для Sgr A\* — 5000 км (~0.8 диаметра Земли). Были также рассчитаны коррекции орбиты для устойчивого существования в течение 10 лет. Суммарный импульс коррекций не превышает 10.55 м/с за 10 лет.

Итоговый вариант номинала представлен на рис. 1*a, b, c* во вращающейся системе координат с центром в точке L2 системы «Земля — Солнце» в проекциях XY, XZ и YZ соответственно. Расчетная дата начала движения — 8 марта 2030 г. Ось X направлена от Солнца к Земле. Гало-орбиту можно характеризовать выходом из плоскости эклиптики: в среднем это 310 тыс. км. Период орбиты около 182 дней.

Далее, для проверки пригодности орбиты для наземно-космических РСДБ-наблюдений, было проведено моделирование картографирования двух источников при помощи наземно-космической сети телескопов, состоящей из космической обсерватории «Миллиметрон» и наземной сети телескопов ENT и  $ngENT$ . На рис. 2*a, b* показан пример соответствующего  $(u, v)$  заполнения и восстановленное изображение для M87 на частоте 230 ГГц. Также был рассмотрен ряд других источников, для которых также были построены заполнения  $(u, v)$ .

При данной конфигурации номинальной орбиты имеется возможность провести картографирование источника M84, который имеет схожие с M87 координаты склонения и прямого восхождения, обеспечивая таким образом присутствие малых проекций баз на соответствующем  $(u, v)$ .

Кроме этого были изучены возможности работы космической обсерватории «Миллиметрон» в режиме мгновенного снимка и в режиме многочастотного синтеза. Режим мгновенного снимка позволяет оценить параметры сверхмассивных черных дыр и изучить свойства окружающего ее вещества в динамике. Многочастотный синтез может быть использован для компенсации нестабильности, вызванной влиянием атмосферы на наземных телескопах и улучшения заполнения  $(u, v)$  плоскости с помощью низких частот.

Анализ учета ограничений на засветку космического аппарата, видимость с наземных пунктов и затенение обсерватории показал, что с учетом ограничений на ориентацию аппарата выполне-

ние интерферометрических наблюдений в режиме синтеза изображений не ограничивается. В режиме одиночного телескопа за один орбитальный период осуществляется 95 %-ное покрытие небесной сферы за исключением приполярных областей. При этом затенение аппарата полностью отсутствует, а минимальное время видимости космического аппарата одновременно с двух наземных пунктов будет составлять не менее 4 ч.

### **Заключение**

В результате выполненной работы удалось найти подходящую орбиту космической обсерватории «Миллиметрон», удовлетворяющую всем необходимым критериям, перечисленным в работе. Для найденной орбиты был проведён анализ наблюдательных возможностей обсерватории в режиме РСДБ и одиночного зеркала. В статье пред-

ставлены краткие результаты анализа, который показал, что при нахождении КА на данной орбите возможно выполнение всех заложенных в научную программу обсерватории «Миллиметрон» задач.

### **Литература**

*Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др.* Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // УФН. 2014. № 184, С. 1319–1352.

*Butcher J. C.*, Implicit Runge-Kutta processes // Mathematics of Computation. 1964. Vol. 18(85). P. 50–64.

*Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2012, Vol. 117, Iss. B4.

*Giorgini J. D.* Status of the JPL horizons ephemeris system // IAU General Assembly. 2015. Vol. 29. P. 2256293.