

## Опыт наблюдения малого КА «М. Решетнев» на лазерной станции в Иркутске

© В. М. Владимиров<sup>1</sup>, Г. И. Модестова<sup>2</sup>, В. А. Емельянов<sup>2</sup>,  
А. И. Дмитроца<sup>3</sup>, Е. Г. Лапухин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> ООО НПФ «Электрон», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», республика  
Крым, Россия

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический  
университет», г. Красноярск, Россия

Дано описание получения файлов целеуказаний для выполнения лазерной локации спутника «М. Решетнев» и преобразования их в формат, совместимый с программным обеспечением лазерной установки ММКОС «Сажень-ТМ». Описаны результаты успешных наблюдений спутника на ММКОС «Сажень-ТМ» в Иркутске с применением полученных файлов целеуказаний.

**Ключевые слова:** лазерная локация спутников, целеуказания, формат CPF, малый космический аппарат «М. Решетнев», измерение дальности до спутника.

### Цель работы

Целью работы является разработка и опробование на малогабаритной модульной квантово-оптической системе (ММКОС) «Сажень-ТМ» в Иркутске [1] независимой программы подготовки файлов целеуказаний (ЦУ) для локации малого космического аппарата (МКА) «М. Решетнев».

### Объект локации

Малый космический аппарат «Михаил Решетнев» («Юбилейный-2», рис. 1) запущен с космодрома «Плесецк» 28 июля 2012 г. Аппарат был выведен на орбиту попутным грузом при запуске штатных аппаратов «Гонец-М».



Рис. 1. Внешний вид МКА «М. Решетнев» и внешний вид платформы с уголковыми отражателями, установленной на нем

Космический аппарат «Михаил Решетнев» («МиР») создавался как спутник научно-экспериментального назначения для испытаний в условиях космоса различных разработок сотрудников и студентов ОАО «ИСС», ООО НПФ «Электрон», СибГАУ и смежных организаций.

На спутнике установлена платформа с 12 уголковыми отражателями (рис. 1), для возможности определения топоцентрических дальностей спутника посредством лазерной локации. Диаметр вписанной окружности в уголковый отражатель составляет 27 мм. Общая геометрическая поверхность уголковых отражателей не менее 6870 мм<sup>2</sup>. Благодаря трехосной магнито-гравитационной ориентации спутника, платформа с уголковыми отражателями постоянно ориентирована в точку надира.

МКА «М. Решетнев» на эпоху UTC 2017-02-01 03:15:30 имел следующие усредненные элементы орбиты:

- большая полуось — 7874 км;                      — долгота восходящего угла — 49.019°;
- перигей/апогей — 1483/1508 км;            — средняя аномалия — 31.868°;
- эксцентриситет — 0.0016079;                — среднее движение — 12.4257 об/сут;
- аргумент перигея — 328.143°;                — период обращения — 115.89 мин.
- наклонение — 82.473°;

#### **Место локации, инструмент**

Локация спутника выполнена в Восточно-Сибирском филиале ФГУП ВНИИФТРИ г. Иркутска на установке «Сажень-МТ» в варианте исполнения КОС, разработанной в ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Опорно-поворотное устройство «Сажень-ТМ» смонтировано на специальном высокостабильном пилоне и находится под защитой укрытия; пульт управления устройством расположен в аппаратной на расстоянии 25 метров от пилона (рис. 2).



Рис. 2. Установка ММКОС «Сажень-ТМ» и пульт управления

### **Методика и программа расчета направления на спутник**

Для определения положения спутника в декартовой небесной инерциальной системе координат используются баллистические модели SGP4 и SDP4 [2]. Точность расчета по данным моделям оценивается в 2 км [3].

Программа расчета положения целевого спутника написана на языке программирования JAVA в среде программирования NetBeans IDE8.2. Код программы написан с использованием возможностей библиотеки «Orekit» [4]. По результатам расчета программа формирует файлы ЦУ двух видов:

- ЦУ формируются в оригинальном российском формате для каждого периода видимости спутника (прохода) над точкой наблюдения;
- ЦУ формируются в международном стандарте CPF [5]. Методика расчета целеуказаний в формате CPF предложена и реализована А. И. Дмитроцей (Крымская астрофизическая обсерватория РАН).

Программа расчета также формирует файл прогноза проходов спутника над пунктом локации. В файле прогноза для каждого расчетного момента времени содержится следующая информация: моменты времени в шкале UTC, номер дня в формате MJD, азимут, угол места, дальность, прямое восхождение и склонение спутника, фаза спутника, время суток на расчетный момент (день, ночь или сумерки), признак освещенности спутника, координаты и скорость спутника в инерциальной системе координат.

Для проверки правильности расчетов были проведены оптические наблюдения спутника и получены ПЗС-снимки (рис. 3) на телескопе диаметром 400 мм, с фокусным расстоянием 915 мм. ПЗС-снимки получены с экспозицией 0.5 с при часовом ведении телескопа. За это

время спутник оставил трек длиной  $\sim 5'$ . Для отождествления звезд использовался звездный каталог USNO A2.0. Несоответствие рассчитанного положения спутника с наблюдаемым составило  $\sim 5'$ .

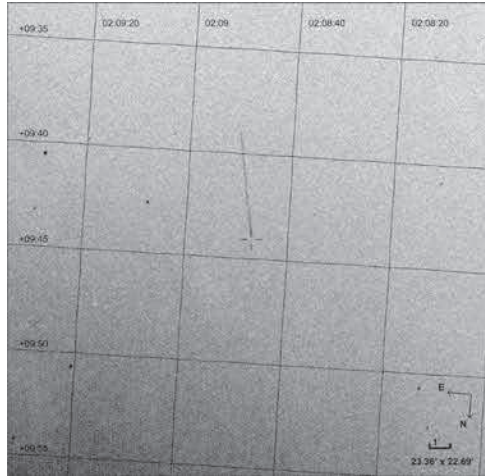


Рис. 3. Трек МКА «М. Решетнев»

### **Лазерная локация МКА «Михаил Решетнев»**

На установке ММКОС «Сажень-ТМ» иркутского пункта лазерной локации выполнена проверка правильности расчета ЦУ для экспериментального спутника и соответствие ЦУ, рассчитанных по экспериментальной программе и полученных с применением штатного программного обеспечения ММКОС. Была проведена контрольная локация трех спутников ГЛОНАСС по штатным и экспериментальным ЦУ. Результаты локации показали, что отклонение истинного положения наблюдаемых спутников от предвычисленного находится в пределах аппаратно-программных ошибок позиционирования.

За две недели экспериментальных наблюдений (с 13 по 27 марта 2017 г.) выполнено 6 успешных наблюдений МКА «М. Решетнев». Необходимо отметить, что при выполнении наблюдений параметры программы измерения дальности (ширина и задержка стробов, сигнальные пороги) оставались штатными, что свидетельствует о корректном выполнении расчета ЦУ. Все зарегистрированные прохождения МКА «М. Решетнев» обработаны штатной программой первичной обработки наблюдений, СКО разности измеренной и предвычисленной дальностей после аппроксимации полиномом не превышает 36 мм. Сводные результаты наблюдений приведены в таблице.

Результаты наблюдений МКА «М. Решетнев»  
на иркутской станции лазерной локации

| Дата       | Номер КА | Время начала | Время окончания | Кол-во измерений (исх. / ост.) | СКО (мм) | Углы элевации |
|------------|----------|--------------|-----------------|--------------------------------|----------|---------------|
| 13.03.2017 | 802      | 10:45:14     | 10:52:43        | 5453 / 5023                    | 32       | 40–85–49      |
| 13.03.2017 | 802      | 20:48:33     | 20:56:01        | 361 / 355                      | 32       | 37–59–37      |
| 15.03.2017 | 802      | 21:07:44     | 21:14:05        | 1348 / 1283                    | 32       | 42–78–51      |
| 23.03.2017 | 802      | 20:26:23     | 20:29:28        | 7430 / 7316                    | 32       | 42–81–81      |
| 25.03.2017 | 802      | 20:44:14     | 20:49:02        | 11910 / 11684                  | 31       | 31–64–64      |
| 27.03.2017 | 802      | 19:10:22     | 19:11:53        | 2973 / 2906                    | 36       | 54–54–52      |

Окно программы измерения дальности при наблюдениях МКА «М. Решетнев» 25 марта 2017 г. приведено на рис. 4, окно программы обработки сырых данных того же сеанса изображено на рис. 5.

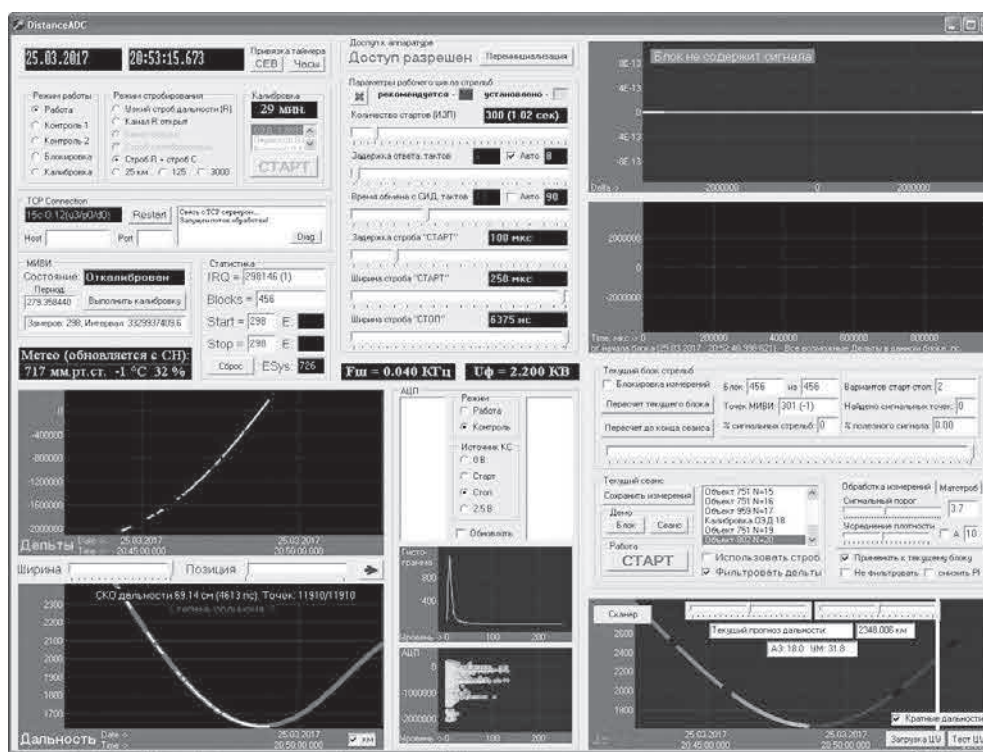


Рис. 4. Окно программы измерения дальности при наблюдениях МКА «М. Решетнев»

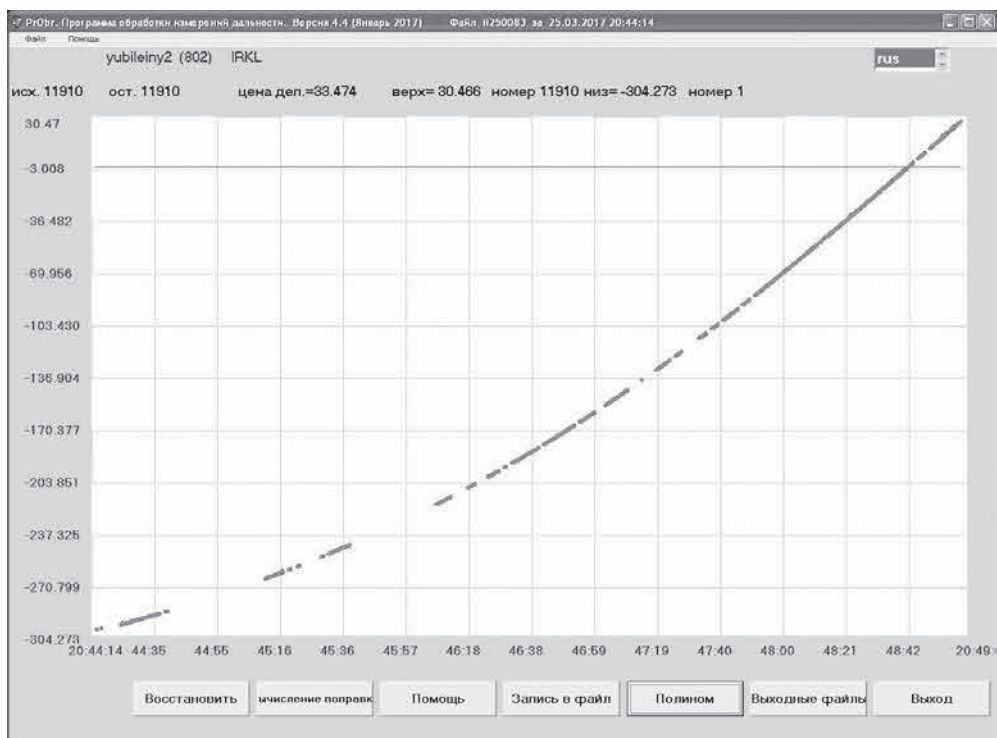


Рис. 5. Окно обработки результатов наблюдений МКА «М. Решетнев» (сырые данные)

## Результаты

Представленная и опробованная на ММКОС в Иркутске независимая программа подготовки ЦУ может быть использована для локации как экспериментальных, так и учебных спутников, отсутствующих в списке штатных спутников российских и международных программ, ЦУ для которых подготавливаются крупными аналитическими центрами.

## Литература

1. Емельянов В. А., Модестова Г. И., Капленко В. В., Игнатенко И. Ю. Опыт эксплуатации новой лазерной станции в Иркутске // Измерительная техника. — 2016. — № 3.
2. Spacetrack Report No. 3: Models for Propagation of NORAD Element Sets, Felix R. Hoots, Ronald L. Roehrich, December 1980. Compiled and distributed by TS Kelso, 31 December 1988. Available from archive.afit.af.mil.
3. Vallado D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications (Fourth Edition). Microcosm Press: 2013.

4. Orekit: An accurate and efficient core layer for space flight dynamics applications. URL: <https://www.orekit.org/> (дата доступа: 04.02.2017).

5. Consolidated Prediction Format (CPF). URL: [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data\\_and\\_products/formats/cpf.html](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data_and_products/formats/cpf.html) (дата доступа: 06.02.2017).

### **Experience in the Observation of the Small Spacecraft «M. Reshetnev» at the Laser Station in Irkutsk**

**V. M. Vladimirov, G. I. Modestova, V. A. Emelyanov, A. I. Dmitrota,  
E. G. Lapukhin**

The way to create prediction files for the laser ranging of the «M. Reshetnev» satellite and to transform them into a format compatible with the software of the MMKOS «Sazhen TM» laser ranging station is given. The article describes the results of successful satellite observations at the MMKOS «Sazhen TM» in Irkutsk using the mentioned prediction files.

**Keywords:** satellite laser ranging, prediction file, CPF format, small spacecraft «M. Reshetnev».