Коррекция орбиты наноспутника BSUSat-2 по доплеровским измерениям

А. А. Спиридонов, В. С. Баранова, В. Е. Черный, В. Е. Евчик, И. А. Шалатонин, С. В. Лешкевич, С. Н. Семенович, Д. В. Ушаков, В. А. Саечников

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: spirid@bsu.by

Рассмотрены верификация и уточнение орбитальных параметров по доплеровским измерениям радиосигналов телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2 в первые дни полета после запуска. Представлены результаты обработки доплеровских измерений радиосигналов несколькими наземными станциями приема БГУ и Международной сети радиолюбителей Satnogs. Получен скорректированный TLE файл наноспутника БГУ BSUSat-2, который позволил в течении первых 10 суток полета успешно принимать и декодировать его телеметрию в отсутствии орбитальных параметров в базе данных системы NORAD.

Ключевые слова: наноспутник; коррекция орбиты; доплеровские измерения; TLE файл.

Orbit correction of the nanosatellite BSUSat-2 using Doppler measurements

A. A. Spiridonov, V. S. Baranova, V. E. Cherny, V. E. Evchik, I. A. Shalatonin S. V. Liashkevich, S. N. Semenovich, D. V. Ushakov, V. A. Saetchnikov

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: spirid@bsu.by

The verification and correction of orbital parameters using Doppler measurements of telemetry radio signals of the BSU nanosatellite BSUSat-2 in the first days of flight after launch are considered. The results of processing Doppler measurements of radio signals by several ground stations of the BSU and the Satnogs International Network of Radio Amateurs are presented. A correction TLE file of the BGU nanosatellite BSUSat-2 was obtained, which made it possible to successfully receive and decode its telemetry during the first 10 days of the flight in the absence orbital parameters in the NORAD system database.

Keywords: nanosatellite; orbit correction; Doppler measurements; TLE file.

Введение

Для прогнозирования движения сверхмалого космического аппарата (СМКА) на одной наземной станции приема (НСП) обычно используется модели SGP с начальными орбитальными параметрами в формате TLE (two-line elements – двухстрочный набор элементов) системы NORAD [1–4]. Но в первые дни полета, TLE файлы в системе NORAD отсутствуют. Поэтому актуальной является задача определения орбитальных параметров СМКА по результатам радиотехнических [1–3] или оптических траекторных измерений [4]. Радиотехнические траекторные измерения, проводимые для СМКА, используют

обработку характеристик радиосигналов телеметрической или командной радиолинии, что упрощает аппаратную реализацию и стоимость измерительной системы. Для бюджетной НСП при проведении однопроходных пассивных доплеровских наблюдений измеряемыми параметрами являются время и доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала телеметрии [1–3].

1. Первые доплеровские наблюдения наноспутника БГУ

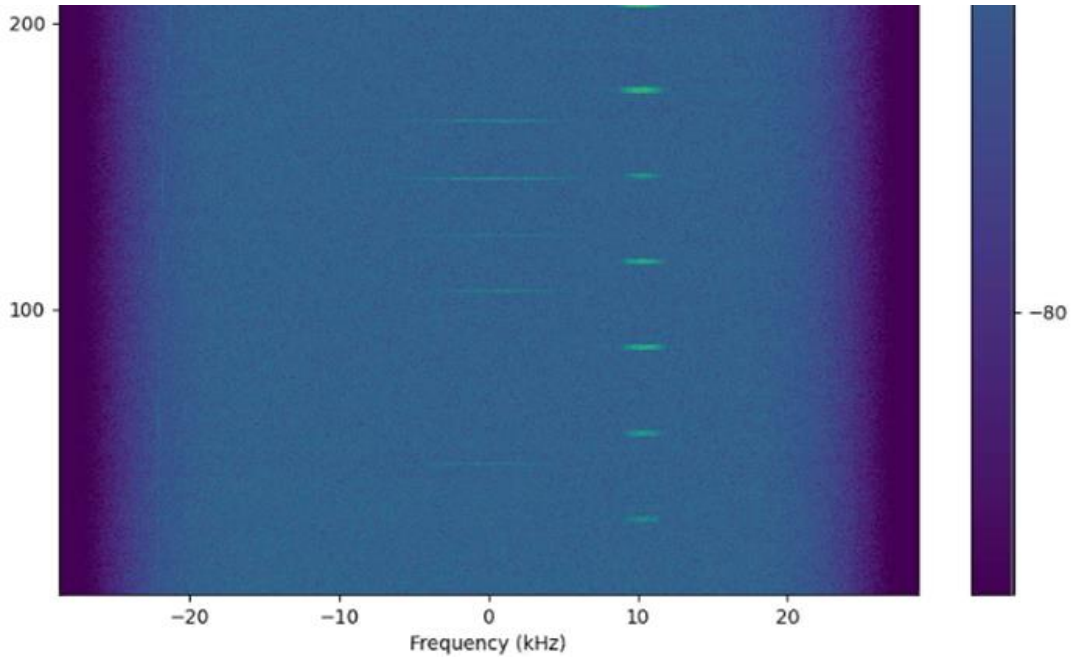
Для НСП БГУ разработан новый метод начального определения орбиты низкоорбитального неизвестного СМКА по данным доплеровских измерений радиосигнала телеметрии, отличающийся анализом координат НСП, параметров принимаемого радиосигнала для двух типов орбит (низкая солнечно-синхронная и орбита МКС) и использованием статистического анализа относительной частоты успеха параметров приема [1–3]. Наиболее вероятное значение вектора состояния в модели кругового движения для предполагаемых диапазонов изменения орбитальных параметров СМКА (период, наклонение, долгота восходящего узла, аргумент широты) в расчетный момент времени определяется по максимальной относительной частоте успеха параметров приема на основе статистической оценки угла места и доплеровского сдвига частоты. Этот метод был успешно апробирован для определения орбиты СМКА при проведении однопроходных пассивных доплеровских наблюдений и позволил без актуальных данных орбитальных параметров системы NORAD рассчитать начальный вектор состояния СМКА по данным измерений на одном [3] или нескольких пролетах над НСП [1, 2], как при групповом полете СМКА [1] в первые недели после попутного запуска так и при полете одиночного спутника [2, 3].

Методы предполетного прогнозирования орбиты СМКА были использованы для получения начального вектора состояния и орбитальных параметров в формате TLE наноспутника БГУ BSUSat-2, запущенного с космодрома Восточный 27 июня 2023 г. Сгенерированный начальный TLE файл был публикован 24 июня за несколько суток до полета на сайтах радиолюбительских сообществ, что дало возможность спрогнозировать и составить расписание наблюдений и сеансов радиосвязи для НСП Международной сети радиолюбителей Satnogs в первые сутки полета СМКА при отсутствии данных системы NORAD. 27 июня 2023 г. был спрогнозирован и проведен 1-й предварительный радиосеанс связи (с максимальным углом места 37.0°) на интервале от 15:10:51 до 15:23:00 (UTC), через полчаса после отделения спутника от разгонного блока (время отделения 14:34:49 UTC) на НСП сети радиолюбителей SatNOGS в Западной Виржинии (широта 38.353° СШ, долгота 81.687° ЗД). Анализ спектрограммы радиосигналов телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2 (номинальная частота 436,99 МГц приемопередатчика), полученной на этой НСП, показал, что доплеровский сдвиг радиосигналов телеметрии,

принятых со спутника, соответствует расчетному значению по TLE файлу (с ошибкой не более 100 Гц).

2. Прием телеметрии НСП БГУ

Начальный TLE файл для наноспутника BSUSat-2 позволил 27 июня 2023 г. спрогнозировать и провести 1-й радиосеанс связи (с максимальным углом места 11,0°) на интервале от 16:27:12 до 16:37:08 (UTC), 2-й радиосеанс связи (с максимальным углом места 61,0°) на интервале от 18:00:00 до 18:12:37 (UTC) и 3-й радиосеанс связи (с максимальным углом места 18,0°) на интервале от 19:35:55 до 19:47:20 (UTC), на четырех наземных станциях приема БГУ. Из анализа спектрограммы радиосигналов телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2, записанной на интервале от 18:00:00 до 18:12:37 (UTC) и показанной на рисунке, видно, что доплеровский сдвиг радиосигналов, полученных со спутника, соответствует расчетному по TLE файлу с ошибкой не более 50 Гц.



Спектрограмма радиосигналов телеметрии (с включенной компенсацией доплеровского сдвига) наноспутника БГУ BSUSat-2 (полосы посередине экрана), записанная на НСП БГУ на интервале радиосеанса связи от 18:00:00 до 18:12:37 (UTC) 27 июня 2023 г.

Так как радиосигналы телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2 расположены практически посередине спектрограммы (с включенной компенсацией доплеровского сдвига-центр спектрограммы соответствует номинальной частоте 436,99 МГц приемопередатчика BSUSat-2). Для дополнительного подтверждения правильности сгенерированного начального TLE файла оценивались частоты принимаемых радиосигналов наноспутника NANOZOND-1

(RS49S), смещенные относительно центра спектрограммы на 10 кГц (номинальная частота 437,00 МГц приемопередатчика наноспутника NANOZOND-1 отличается от номинальной частоты 436,99 МГц приемопередатчика наноспутника БГУ на 10 кГц).

Разработанный метод определения орбиты СМКА по доплеровским измерениям на основе модели кругового движения и статистического анализа относительной частоты успеха параметров пролета позволил на вторые сутки полета независимо определить орбитальные параметры наноспутника БГУ BSUSat-2 (CubeBel-2). Методом дифференциальной коррекции по доплеровским измерениям радиосигналов телеметрии сгенерированный начальный TLE файл был уточнен и опубликован на сайтах радиолюбительских сообществ:

CUBEBEL-2
1 99163U 23178.60752041 .00009659 00000-0 70046-3 0 1232
2 99163 97.6652 229.3207 0010018 222.4731 119.2161 15.02666880 026

Таким образом, в первые две недели полета, до первой публикации TLE файла BSUSat-2 в базе данных системы NORAD (07.07.2023 г.), проводилась коррекция орбитальных параметров наноспутника БГУ BSUSat-2 (CubeBel-2) на основе обработки данных доплеровских измерений Это позволило четырем наземным станциям приема БГУ и десяткам наземных станций сети Satnogs успешно принимать и декодировать информацию с наноспутника BSUSat-2. Также 7 июля наноспутник БГУ BSUSat-2 был идентифицирован под своим именем в международных базах данных орбитальных параметров космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Small satellite identification for multi-payload launch using Doppler measurements/ A. Spiridonov [et al.] // Proc. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Milan, Italy, 19-21 June 2023 / IEEE; edited by M. Marracci. Milan, 2023. P. 540–544.
2. Small satellite orbit determination using the university ground station / A. A. Spiridonov [et al.] // Proc. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, Pisa, Italy, 22-24 June 2020 / IEEE; edited by A. Buffi and M. Marracci. Pisa, 2020. P. 117–121.
3. Small satellite orbit determination using single pass doppler measurements / A. A. Spiridonov [et al.] // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. 2022. Vol. 3, № 4. P. 162-170.
4. University mobile optical surveillance system for low-Earth space object orbit determination / A. A. Spiridonov [et al.] // Proc. 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Pisa, Italy, 27-29 June 2022 / IEEE; edited by M. Marracci. Pisa, 2022. P. 566–570.