

ПРЕДПОЛЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОРБИТЫ УНИВЕРСИТЕТСКОГО НАНОСПУТНИКА В ПОПУТНОМ ГРУППОВОМ ЗАПУСКЕ

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

Белорусский государственный университет

sansan@tut.by

Представлены результаты апробации метода предполетного определения орбиты университетского наноспутника BSUSat-2 в попутном групповом запуске из более чем 40 спутников, использующего историю динамики орбитальных параметров предыдущего запуска с целевого космодрома ракетоносителем «Союз 2.1б» с разгонным блоком «Фрегат».

Введение. Предполетная оценка орбитальных параметров университетского наноспутника в попутном групповом запуске проводится при отсутствии данных траекторных измерений. Это необходимо для планирования работы космического аппарата (КА) в первые сутки полета, его поиска, идентификации при групповом запуске, проведения первоначальных сеансов радиосвязи. Особенно это стало актуальным в последние годы в связи с ростом числа запусков и количества КА, участвующих в одном запуске. Существует много примеров, когда аппарат был утерян после запуска.

Методы краткосрочного предполетного прогнозирования орбиты. Для запуска первого наноспутника БГУ BSUSat-1 29 октября 2018 г. с китайского космодрома Цзюцюань двухступенчатым ракетоносителем Long March 2С были разработаны методы краткосрочного предполетного прогнозирования солнечно-синхронной и эллиптической орбиты наноспутника [1], учитывающие историю динамики полета КА предыдущих запусков с целевого космодрома, данные провайдера запуска (широта и долгота стартовой площадки, профиль полета ракеты, время запуска, наклонение, период или высота орбиты). Эти методы позволили определить вектор состояния, закон движения наноспутника BSUSat-1 на первых витках, сгенерировать TLE (two-line elements – двухстрочный набор элементов) файл начальных орбитальных данных. Это позволило радиолюбителям по всему миру спрогнозировать сеансы радиосвязи, параметры наведения антенн и доплеровский сдвиг частоты наноспутника BSUSat-1 при отсутствии информации траекторных измерений, а наземной станции приема (НСП) БГУ первой в мире принять и декодировать его телеметрию [1].

Оценка орбиты наноспутника БГУ BSUSat-2. Для попутного группового запуска второго наноспутника БГУ BSUSat-2 (CUBEBEL-2) на 27 июня 2023 г. с российского космодрома Восточный (широта $40^{\circ}58'03''$ С.Ш., долгота $100^{\circ}16'43''$ В.Д.) трехступенчатым ракетоносителем «Союз 2.1б» с разгонным блоком «Фрегат» методы предполетного прогнозирования были адаптированы. Исходные данные для солнечно-синхронной орбиты: наклонение $i = 97,67^{\circ}$; высота орбиты $H = 560,4$ км. Планируемое время запуска 11:34:49 (UTC). Для анализа был выбран космический аппарат NSL-1 (NORAD 44391) из предыдущего попутного запуска 32 КА ракетоносителем «Союз 2.1б» с разгонным блоком «Фрегат» (основная полезная нагрузка также был КА Метеор-М) с целевого космодрома на 5 июля 2019 г., время запуска 05:41:46 (UTC) на орбиту с наклонениями $i = 97.68^{\circ}$, высоты перигея $H_p = 572,5$ км, высоты апогея $H_a = 584,1$ км. Первоначальная оценка орбиты была получена методом краткосрочного предполетного прогнозирования солнечно-синхронной орбиты при попутном запуске наноспутника [1], который позволяет

для определения орбитальных параметров и прогнозирования полета в первые сутки после запуска, использовать модель кругового движения и перейти для описания движения от 6 параметрического вектора состояния к 4 параметрическому. Метод основан на численном анализе истории аргумента широты u и долготы восходящего узла Ω орбиты спутника прошлых аналогичных запусков, что позволяет найти вектор начального состояния $\mathbf{X}(t_e) = (T_e, i_e, u_e, \Omega_e)$ в момент времени эпохи t_e , соответствующий отделению наноспутника. Предполагается, что траектории полета разгонного блока «Фрегат» на этапе выведения попутной полезной нагрузки для запусков 27 июня 2023 г. (*new*) и 5 июля 2019 г. (*old*) совпадают на одинаковых временных интервалах Δt от момента старта до отделения:

$$u_{new}(\Delta t) = u_{old}(\Delta t), \quad \Omega^{new}(\Delta t) - \theta_{GST}^{new}(\Delta t) = \Omega^{old}(\Delta t) - \theta_{GST}^{old}(\Delta t),$$

где θ_{GST} – гринвичское звездное время.

Для наноспутника BSUSat-2 по известному $\Delta t = 3$ ч был получен вектор начального состояния $\mathbf{X}(t_e) = (5752 \text{ с}; 97, 67^\circ; 340,36^\circ; 229,24^\circ)$ на момент времени отделения $t_e = 14:34:49$ (UTC).

Затем была проведена предполетная оценка параметров эллиптической орбиты [1] при попутном запуске наноспутника и прогнозирование его первых пролетов над НСП на основе численного анализа истории долготы λ , широты φ нескольких наноспутников для запуска 5 июля 2019 г. На момент времени эпохи t_e , сгенерирован начальный TLE файл CUBEBEL-2 и опубликован в Интернете на сайтах радиолюбительского сообщества:

CUBEBEL-2

```
1 99163U 23178.60752041 .00009659 00000+0 70046-3 0 1231
2 99163 97.6652 229.3207 0010018 222.4731 119.2161 15.02166880 021
```

Полученный начальный TLE файл позволил успешно провести ввод в эксплуатацию наноспутника БГУ BSUSat-2, спрогнозировать сеансы радиосвязи в первые сутки полета при отсутствии внешнетраекторных измерений и данных системы NORAD. Параметры наведения антенных систем и доплеровский сдвиг частоты радиосигналов наноспутника БГУ BSUSat-2 представлены на рисунке 1. Сгенерированные параметры сеансов радиосвязи позволили успешно принять и декодировать телеметрию наноспутника БГУ BSUSat-2 на первых 3-х пролетах космического аппарата над 4-мя наземными станциями Белорусского Государственного университета, провести сеансы связи по управлению спутником, решить задачу его идентификации в групповом запуске из более 40 спутников. Также в первые сутки полета наноспутника БГУ BSUSat-2 на основе рассчитанных орбитальных параметров в формате TLE осуществлялся прием и декодирование его телеметрии на нескольких наземных станциях Международной сети SatNogs.

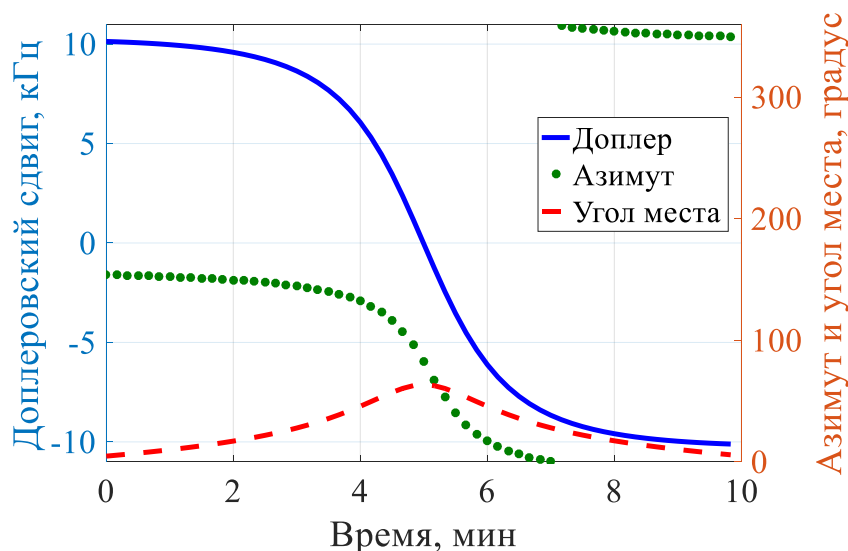


Рисунок 1 – Спрогнозированные параметры наведения антенных систем и доплеровский сдвиг частоты радиосигналов телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2 для второго пролета над Минском на интервале времени от 18:01:20 до 18:11:10 за 27 июня 2023 г.

На вторые сутки полета на основе метода определения орбиты по доплеровским измерениям в модели кругового движения и статистического анализа относительной частоты успеха параметров пролета [2] была получена оценка начального вектора состояния наноспутника БГУ BSUSat-2. Также, используя доплеровские измерения радиосигналов телеметрии наноспутника БГУ BSUSat-2, были скорректированы его орбитальные параметры в формате TLE:

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
```

Это позволило при отсутствии данных в системе NORAD успешно осуществлять сеансы связи по управлению и приему данных космического аппарата BSUSat-2.

Список литературы:

1. Orbital Parameters Pre-launch Calculation Methods for a Piggyback Launched University Small Satellite / A. Spiridonov, V. Baranova, D. Ushakov [et al.] // Proc. 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace, Pisa, Italy, 27-29 June 2022 / IEEE; edited by M. Marraconi. – Pisa, 2022. – P. 486-490.
2. Spiridonov A.A. Small Satellite Orbit Determination Using Single Pass Doppler Measurements / A.A. Spiridonov, V.A. Saetchnikov, D.V. Ushakov [et al.] // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2022. – Vol.3, № 4. – P. 162-170.