

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ БОРТОВЫМ НАВИГАЦИОННЫМ ПРИЁМНИКОМ НАНОСПУТНИКА CUBEVEL-1

**Д. А. Шибкова, В. С. Баранова, С. В. Василенко, С. Н. Семенович,
В. Е. Черный, А. А. Спиридонов, Д. В. Ушаков, В. А. Саечников**

*БГУ, Минск, Республика Беларусь
E-mail:sansan@tut.by*

Рассмотрены особенности применения навигационных приемников для сверхмалых космических аппаратов. Представлены данные верификации измерений навигационного приемника наноспутника БГУ CubeVel-1 за сутки полёта. Выявлено, что максимальные ошибки определения местоположения и скорости наноспутника БГУ CubeVel-1 на интервале наблюдений были меньше, чем у наноспутник Aalto-1, имеющего схожие орбитальные параметры.

Ключевые слова: навигационный приёмник, сверхмалый космический аппарат, наноспутник.

По мере развития сверхмалых космических аппаратов (СМКА) и повышением уровня сложности выполняемых ими научных задач, ужесточаются и требования к точности определения спутника на орбите [1]. Для более точной обработки принимаемых данных с датчиков, цифровых камер и научной аппаратуры, необходима точная навигационно-временная привязка. Также крайне важно знать траекторию движения СМКА, когда и где он будет проходить над определённой точкой, чтобы включить целевую аппаратуру или изменить ее режим работы. Кроме того, системы СМКА имеют ограничения по массе, габаритам и потребляемой мощности [2]. Навигационные приёмники на борту СМКА используются не только для определения точных координат и скорости, но и для решения научных задач, например, спектральное зондирование Земли или радиозатменное зондирование ионосферы. Эти приемники в отличие от гражданских должны выдерживать воздействия со стороны космической среды: тепловые, вакуумные, радиационные и вибрационные нагрузки.

Для навигационного приёмника СМКА характерна прерывистая работа в течении нескольких минут, с паузами до нескольких часов из-за низкой энергетики. Кроме того, в выключенном состоянии вся используемая электроника поглощает меньшие дозы радиации. Для снижения затрат на энергопотребление и вычислительные ресурсы, обработка навигационных данных часто проводится на Земле. Также необходимо учитывать задержку и доплеровский сдвиг частот при поиске сигнала, который увеличивается в 8 раз по сравнению с наземным приёмником (для наземных приёмников доплеровский сдвиг частот составляет ± 5 кГц, а для низко-

орбитального СМКА – ± 40 кГц). Для каждого навигационного спутника важным будет результат предсказания диапазона этих параметров в данной точке орбиты, это может существенным образом уменьшить время «холодного» старта навигационного приёмника СМКА, которое составляет порядка 90–120 с.

С целью сравнительного анализа точности решения навигационно-временного определения (НВО) рассмотрим навигационный приёмник (подсистема GPS) финского наноспутника Aalto-1, имеющий схожие орбитальные параметры (высота орбиты 505 км, наклонение $97,44^\circ$) с наноспутником БГУ CubeBel-1. Данный спутник требует более точного позиционирования и временной синхронизации для работы полезной нагрузки: мультиспектральной камеры, радиационного датчика и электростатической тросовой тормозящей системы. Кроме того, с помощью навигационного приёмника на Aalto-1 предусмотрен эксперимент по радиозатменному зондированию ионосферы. Для работы со спутниками системы GPS приёмник использует параллельный прием и обработку 12 каналов (C/A код) на частоте L1 1572.42 МГц. Эксплуатация приемника показала, что время первого измерения после холодного запуска варьировалось от 50 с до 3,5 мин. При использовании только точек с суммарным геометрическим снижением точности по местоположению и времени (GDOP) < 3 достигнута точность определения местоположения не хуже 100 м, а скорости около 20 м/с. При GDOP > 3 значения ошибки положения не превосходили 1 км, а скорости 100 м/с [3].

Для решения задач точного позиционирования и временной синхронизации бортовых систем и полезной нагрузки на борту наноспутника БГУ CubeBel-1 используется российский навигационный приёмник МНП-М6. Он позволяет проводить параллельный приём и обработку сигналов ГЛОНАСС (СТ-код), GPS (C/A-код) и SBAS по 24 каналам, вычисления текущих географических координат (широты, долготы, высоты), вектора скорости с частотой от 1 до 0,05 Гц. При реальном сигнале мощностью до -160 дБВт максимальное время «горячего» старта составляет 5 с, «холодного» старта – 50 с.

Для верификации экспериментальных данных бортового навигационного приёмника наноспутника БГУ CubeBel-1 в первые месяцы полета разработана численная модель имитации его работы по начальным орбитальным параметрам в формате TLE системы NORAD, которая позволяла моделировать решение задачи навигационно-временного определения; «сырые» данные измерений (псевдодальность, псевдодоплер); орбитальные параметры каждого навигационного КА в топоцентрической системе координат СМКА. В табл.1 представлены диапазоны изменения ошибок определения широты $\Delta\varphi$, долготы $\Delta\lambda$, высоты ΔH , модуля скоро-

сти Δv наноспутника CubeBel-1 по данным измерения навигационного приёмника в сравнении с численными расчетами по SGP модели и начальным орбитальным параметрам в формате TLE на трех пролетах над университетской наземной станцией за период от 18.02.2019 г. до 19.02.2019 г. При этом в 80% точках измерения GDOP был меньше 6, что соответствует хорошим условиям для решения задачи НВО. На рис. 1 представлена динамика ошибки определения долготы и широты, а на рис.2 – высоты и модуля скорости наноспутника CubeBel-1. Как видно из табл. 1, максимальная ошибка определения широты за период наблюдений составила не более $0,18^\circ$, при этом, на первых двух пролетах она уменьшалась со скоростью $2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{с}$. Максимальная ошибка определения долготы за период наблюдений не превосходила $0,012^\circ$, при этом на двух пролетах наблюдался небольшой рост со скоростью $4 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{с}$. Ошибки высоты и скорости были максимальны сразу после включения приемника и затем уменьшались, при этом максимальная ΔH не хуже 394 м, а Δv не более 45 м/с.

Таблица 1

Ошибки определения широты, долготы, высоты, модуля скорости

Дата	Время измерения	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\Delta\lambda, ^\circ$	$\Delta H, \text{ м}$	$\Delta v, \text{ м/с}$
18.02	17:34:24 – 17:37:13	0,12 – 0,16	$2 \cdot 10^{-4}$ – 0,008	354–394	33–41
19.02	15:43:23 – 15:47:52	0,10 – 0,16	$1 \cdot 10^{-4}$ – 0,012	105–162	37–40
19.02	17:16:12 – 17:17:07	0,17 – 0,18	$2 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-3}$	256–289	43–45

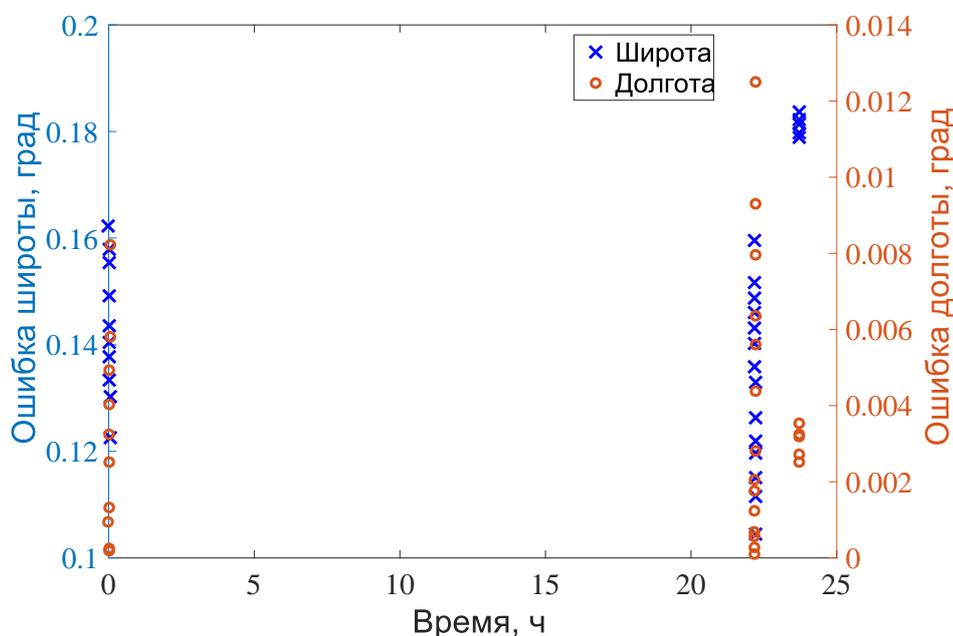


Рис. 1. Динамика ошибки определения долготы и широты наноспутника CubeBel-1 по данным измерения навигационного приёмника для трех пролетов

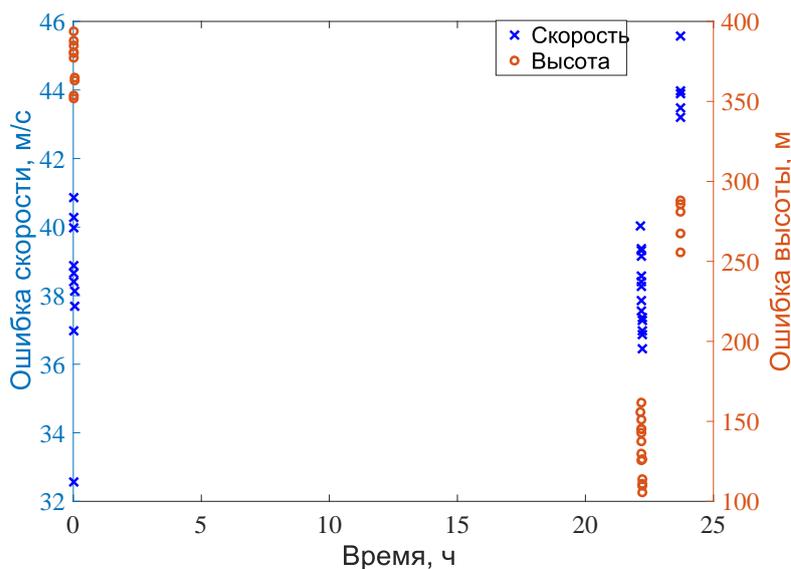


Рис.2. Динамика ошибки определения высоты и модуля скорости наноспутника CubeBel-1 по данным измерения навигационного приёмника для трех пролетов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности применения навигационных приемников для сверхмалых космических аппаратов. Результаты численного моделирования измерений широты, долготы, высоты, модуля скорости бортового навигационного приёмника наноспутника БГУ CubeBel-1 на трех пролетах над университетской наземной станцией за период от 18.02.2019 г. до 19.02.2019 г. показали, что наибольшие ошибки позиционирования: по широте не более $0,18^\circ$; по долготе не более $0,012^\circ$; по высоте не более 394 м. В то время как модуль скорости наноспутника БГУ CubeBel-1 определялся не хуже 45 м/с. Выявлено, что максимальные ошибки определения местоположения и скорости наноспутника БГУ CubeBel-1 на интервале наблюдений были меньше чем у наноспутник Aalto-1 (ошибка определения положения не превосходила 1 км, а скорости – 100 м/с).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Saetchnikov V., Semenovich S., Spiridonov A., et al. BSUSat-1 – Research educational lab - one year in orbit. //Proceedings of IEEE 2020 International Workshop on Metrology for AeroSpace, 2020. P. 111-116. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160137.
2. Спиридонов А. А., Саечников В. А., Ушаков Д. В. Моделирование работы навигационного приёмника для сверхмалого космического аппарата. // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 4. С. 331–340.
3. Mughal M.R., Praks J. et al. Aalto-1, multi-payload cubesat: In-orbit results and lessons // Acta Astron. 2021. Vol. 187. P.557-568. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.11.044