

с источниками связанных открытых данных; ранжировать угрозы и контрмеры в соответствии с универсальными метками безопасности; а также представлять контрмеры как контекстные шаблоны безопасности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Олизарович Е. В., Бражук А. И. Концептуальные основы анализа моделей информационной безопасности облачных систем класса «Инфраструктура как услуга» // Доклады БГУИР. 2019. №. 6. С. 12–19.
2. Brazhuk A., Olizarovich E. Framework for ontology-driven threat modelling of modern computer systems // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8, №. 2. P. 14–20.
3. Sion L. et al. Solution-aware data flow diagrams for security threat modeling // SAC'18: Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing. 2018. P. 1425–1432. DOI: 10.1145/3167132.3167285
4. Berger B.J., Sohr K., Koschke R. Automatically extracting threats from extended data flow diagrams // ESSoS 2016: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Engineering Secure Software and Systems. 2016. P. 56–71. DOI: [10.1007/978-3-319-30806-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30806-7_4)
5. Saatkamp K. et al. An Approach to Determine and Apply Solutions to Solve Detected Problems in Restructured Deployment Models using First-order Logic // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Cloud Computing and Services Science. 2019. Vol. 1. P. 495–506. DOI: 10.5220/0007763204950506

### НАЗЕМНАЯ СТАНЦИЯ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТЫ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**А. П. Верстаковская, В. Е. Евчик, А. Г. Кезик, В. А. Саечников,  
С. А. Соловьев, А. А. Спиридонов, Д. В. Ушаков, В. Е. Черный**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
E-mail: sansan@tut.by*

Задачи надежного приема телеметрии и определения орбитальных параметров являются актуальными для сверхмалых космических аппаратов. Описаны программно-аппаратные средства построения наземной станции приема телеметрии сверхмалых космических аппаратов с возможностью определения параметров орбиты. Рассмотренная наземная станция приема позволит расширить географии приема, улучшить качество принимаемой информации, работать в автономном режиме, измерять орбитальные параметры, на практике обучать студентов технологиям приема телеметрии и определения орбит космических аппаратов.

*Ключевые слова: наземная станция; сверхмалые космические аппараты; телеметрия; определение орбиты.*

Для решения задач по управлению университетскими сверхмалыми космическими аппаратами (СМКА), слежению и проведения сеансов радиосвязи актуальными являются вопросы надежного и оперативного приема телеметрии, прогнозирования будущих положений космического аппарата (КА) [1]. Обычно из-за ограниченности бюджета для управления и приема телеметрии университетского СМКА используют единственный наземный комплекс управления (НКУ), который располагается в черте города и имеет неудовлетворительные условия приема. Кроме того, из заданной точки на земле связь с низкоорбитальным СМКА ограничена несколькими минутами 5-6 раз в день. Иногда университетский НКУ подключается к международным сетям станций приема СМКА. Примером этому может служить международная сеть станций приема «Satnogs», которая используется в качестве резервного канала связи с наноспутником БГУ CubeBel-1, запущенным в октябре 2018 г.

Для выполнения прогнозирования будущих положений СМКА для университетского НКУ обычно используется модель прогнозирования SGP 4 и в качестве входных данных орбитальные параметры в формате TLE системы NORAD (*North American Aerospace Defense Command* – Командование воздушно-космической обороны Северной Америки) [2]. TLE обновляются ежедневно, доступны бесплатно, но в долгосрочной перспективе или в случае военных конфликтов система NORAD имеет возможность отключить общий доступ к базе данных. Реже на борту СМКА для определения точных координат и скорости используют навигационный приемник [2]. Еще одним способом получения начальных данных для моделей прогнозирования движения СМКА является определение орбиты на основе измерений характеристик радиосигналов телеметрической или командной радиолинии [3]. Измеряемыми параметрами для бюджетного университетского НКУ являются время и доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала.

Предлагается для приема телеметрии и определения орбиты СМКА кроме университетского НКУ, оснащенного наземной системой навигационно-баллистического обеспечения (НБО) для измерения параметров радиосигналов и расчета вектора состояния КА, использовать мобильные наземные станции приема (НСП) с временной синхронизацией и возможностью разнесения по территории Республики Беларусь. Задачи приема и обработки телеметрии, внешнетраекторных измерений и определения орбит на стационарном университетском НКУ решаются с помощью элементов системы связи: антенн волновой канал с круговой поляризацией радиоловительского диапазона 435–438 МГц; системы приема на основе трансивера IC-9100 и системы приема на основе модуля SDR радиоприемника; поворотного устройства YAESU G-5500 с блоком

управления и программно-аппаратных средств системы НБО: GPS модуля; модуля синхронизации, измерения частоты и времени приема радиосигналов; ПО прогнозирования движения КА и характеристик радиосигналов; ПО моделирования и визуализации сценариев работы станций приема и проведения экспресс-расчета стандартной навигационно-баллистической информации; ПО приема и обработки радиосигналов телеметрии; ПО определения и уточнения орбит; системы управления базами данных.

Мобильная наземная станция приема состоит из антенны волновой канал с круговой поляризацией радиолучительского диапазона 435–438 МГц (или всенаправленной «квадрифилярной» антенны); системы приема на основе модуля SDR радиоприемника; управляющего персонального компьютера на основе ноутбука; программно-аппаратных средств системы НБО. Технология приёма предполагает приём одного и того же пакета телеметрии с СМКА на всех синхронизированных НСП и за счёт обработки измерений времени приёма и частоты радиосигнала телеметрии определение его точных орбитальных параметров.

Задача определения орбитальных характеристик решается как при беззапросных сеансах связи между СМКА и НСП (при передаче от СМКА телеметрии на НСП) так и при запросных сеансах связи (при проведении баллистических измерений и проведении управления СМКА по командной радиолинии от НСП). В зависимости от выполняемой задачи определения орбит наземная система НБО может проводить измерения орбит СМКА как с первоначально известными параметрами орбит (режим слежения), так и орбит с первоначально неизвестными параметрами (режим всенаправленного поиска). При измерениях в режиме слежения используются, орбитальные элементы из базы данных системы NORAD или собственной базы данных. ПО прогнозирования движения КА по известным параметрам орбит рассчитывает сеансы радиосвязи, предполагаемые параметры следящих систем поворотных устройств, частоты принимаемых радиосигналов. Основная решаемая задача – это проверка параметров орбиты СМКА и ее уточнение. Используется метод дифференциальной коррекции орбитальных параметров по доплеровскому сдвигу частоты принимаемого радиосигнала. При измерениях орбит СМКА в режиме всенаправленного поиска частота целевого спутника ищется в пределах радиолучительского диапазона 435–445 МГц, определяются отличительные признаки радиосигналов пакетов телеметрии (частота следования пакетов, наличие меток и т.д.), по результатам измерений на нескольких витках оценивается частота радиосигнала, период СМКА, максимальная длительность пролета над НСП, проводятся оценки допустимого предела ошибки измерений. При начальном опре-

делении параметров орбиты СМКА используются алгоритмы на основе модели невозмущенного движения с целью обработки измерений на одном пролете над НСП или на основе простейших моделей возмущенного движения при обработке измерений на нескольких пролетах над НСП.

На рис. 1 представлена структура мобильной версии НСП. Разработанный экспериментальный образец мобильной НСП тестировался при приеме телеметрии и измерении орбит СМКА с различной периодичностью передачи пакетов телеметрии. В проведенных экспериментах были измерены времена приема и частоты радиосигналов телеметрии СМКА CubeBel-1 (измерения на одном пролете) и LUOJIA-1 01 (измерения на нескольких пролетах). Радиосигналы телеметрии после преобразования на промежуточную частоту в модуле SDR радиоприемника поступали на вход модуля синхронизации, измерения частоты и времени для дальнейшей обработки. GPS модуль принимал радиосигналы навигационных КА и на вход модуля синхронизации, измерения частоты и времени передавал импульсные сигналы 1PPS, синхронизированные со шкалой времени UTC, текущие отсчеты системного времени GPS и точные координаты приемных антенн и NMEA пакеты. На выходе модуля синхронизации, измерения частоты и времени приема формировались время и частота принимаемых радиосигналов телеметрии, которые передавались в управляющий ПК для дальнейшей обработки в ПО определения и уточнения орбит. Данные измерения по доплеровскому сдвигу частоты на моменты приема телеметрии сравнивались с результатами моделирования на основе SGP 4 модели по начальным данным в формате TLE. Было показано, что экспериментальные данные по доплеровскому сдвигу частоты хорошо согласуются с данными моделирования. Было проведено начальное определение параметров орбит СМКА. По расчетным параметрам орбит СМКА была проведена оценка точности прогнозирования угла места, азимута КА и доплеровского сдвига частоты радиосигналов телеметрии. Абсолютные ошибки прогнозирования угла места и азимута не превосходили  $3^\circ$ , абсолютная ошибка прогнозирования доплеровского сдвига частоты не превосходила 150 Гц, что является достаточным для успешного приема радиосигналов телеметрии и их декодирования.

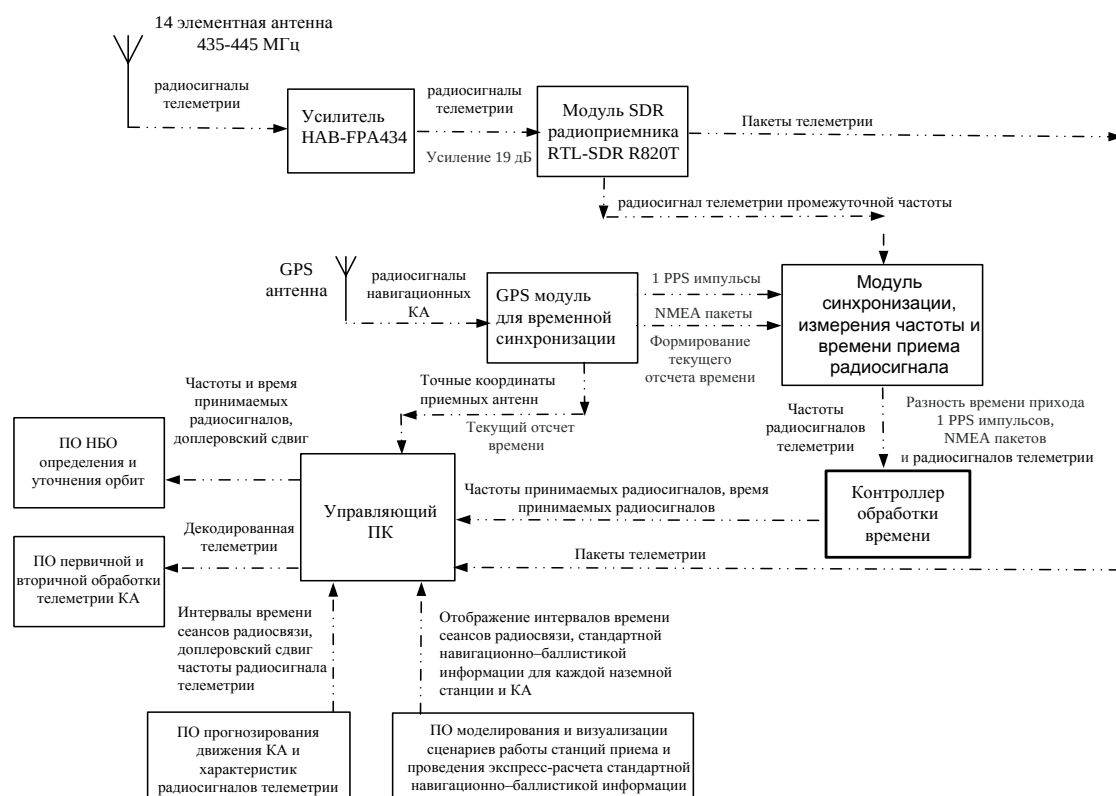


Рис. 1. Структура НСП телеметрии и определения орбиты орбит СМКА

Использование мобильных НСП для приема телеметрии СМКА позволит увеличить географию приема, улучшить качество приема за счет возможности работы за пределами городской «зашумленной» среды, проводить работу в автономном режиме, самостоятельно получать орбитальные параметры на основе обработки измерений, на практике обучать студентов технологиям определения орбит КА.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты. Минск: БГУ, 2012. 159 с.
2. Спиридонов А. А., Саечников В. А., Ушаков Д. В. // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 4. С. 331–340.
3. Sakamoto Y., Yotsumoto K., Sameshima K., et al. Methods for the orbit determination of tethered satellites in the project QPS // Acta Astronautica. 2008. Vol. 62. P. 151–158.