

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ**

УДК 528.837

**Технологии мониторинга подвижных объектов
и окружающей среды с использованием
малоразмерных космических аппаратов**

А. А. Романов¹, А. А. Романов², А. С. Селиванов³, С. В. Трусов⁴, С. А. Бобровский

¹д. т. н., ^{2,3}д. т. н., профессор, ⁴к. т. н.
АО «Российские космические системы»

e-mail: romulas@mail.ru

Аннотация. Первый космический аппарат нанокласса производства АО «Российские космические системы» был запущен с борта МКС в 2005 г., его конструкция в дальнейшем послужила основой целой серии технологических аппаратов. В 2007 г. в АО «Российские космические системы» начала реализовываться программа разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения. Всего рассматривались три основные задачи: регистрация сигналов АИС морских и речных судов в космическом пространстве, мониторинг состояния ионосферной плазмы и затененное зондирование атмосферы.

В 2011 г. в АО «Российские космические системы» был разработан космический аппарат нанокласса с приемником сигналов АИС на борту. Кроме того, на предприятии был проведен ряд научно-исследовательских работ, направленных на развитие технологий мониторинга ионосферной плазмы с использованием метода радиотомографии. Был создан лабораторный образец когерентного передатчика в диапазонах 150–400 МГц для размещения на борту КА нанокласса.

Ключевые слова: наноспутник, радиотомография, АИС, мониторинг

**Russian Technologies of Monitoring
and Remote Sensing Using Nanosatellites**

A. A. Romanov¹, A. A. Romanov², A. S. Selivanov³, S. V. Trusov⁴, S. A. Bobrovsky

¹doctor of engineering science,
^{2,3}doctor of engineering science, professor,
⁴candidate of engineering science
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: romulas@mail.ru

Abstract. The first nanosatellite developed in JSC "Russian Space Systems" was: The first nanosatellite developed in JSC "Russian Space Systems" was launched in 2005 from ISS and its construction was used as the basis for the whole series of the technological satellites. The nanosatellites development program with different purposes payload onboard has being realized in JSC "Russian Space Systems" since 2007. Three main tasks have been considered in this program: AIS signals registration from marine vessels in outer space, ionosphere plasma state monitoring and atmospheric GLONASS/GPS radio occultation space-based technology.

In 2011 nanosatellite with AIS receiver onboard was developed in JSC "Russian Space Systems". In addition several research works were fulfilled in the area of ionosphere plasma monitoring technologies based on radio tomography method. It was developed laboratory model of 150–400 MHz coherent transceiver for installation onboard of nanosatellite.

Key words: nanosatellite, radio-tomography, AIS, monitoring

I. Введение

В 2005 г. российский космонавт Салижан Шарипов запустил космический аппарат нанокласса ТНС-0 с борта МКС. Этот космический аппарат был первым в АО «Российские космические системы» технологическим наноспутником, разработанным в соответствии с идеологией «спутник-прибор».

Несмотря на скромные габаритные размеры (масса КА была меньше 4 кг), ТНС-0 был создан для решения важных задач: отработки принципов управления космическими аппаратами с использованием глобальных телекоммуникационных систем, а также получения маяком системы КОСПАС-SARSAT летной квалификации. Именно после этого эксперимента маяки системы поиска и спасения стали штатным оснащением всех спускаемых модулей российских пилотируемых космических аппаратов. Успешный полет ТНС-0 показал перспективность использования наноспутников для отработки новых технологических решений.

В 2007 г. в АО «Российские космические системы» была разработана программа создания технологических наноспутников, которые предполагалось строить с использованием технической решений, апробированных на платформе ТНС-0.

В рамках программы намечается создать несколько типов КА, предназначенных для решения как технологических прикладных, так и фундаментальных научных задач. Платформу ТНС-0 планируется модифицировать, дополнив систему электропитания внешними солнечными панелями и современной системой ориентации и стабилизации, создав платформу ТНС-2.

Линейка спутников ТНС-2 будет состоять из нескольких КА, предназначенных для решения следующих задач: управление КА с использованием телекоммуникационных сетей, исследование способов управления КА нанокласса (в кооперации с ИПМ им. М. В. Келдыша и ZARM (Германия)), испытания микродвигательных установок (в кооперации с НИИПМЭ МАИ и ЕКА), изучение параметров ионосферы над зонами аномальной грозовой активности и структуры ионосферных токовых систем (в кооперации с организациями РАН), а также радиозатменное зондирование атмосферы

и ионосферы сигналами ГЛОНАСС/GPS (в кооперации с ИРЭ РАН).

Кроме того, была разработана уникальная платформа и создан лабораторный образец наноспутника ТНС-1, со стабилизацией аппарата, осуществляемой при помощи вращения, предназначенного для съемки поверхности Земли со средним пространственным разрешением.

Несмотря на богатый опыт специалистов предприятия в создании собственных платформ нанокласса, в 2010 г. АО «Российские космические системы» начал разрабатывать бортовую аппаратуру приема сигналов АИС, предназначенную для размещения на 3-элементной платформе типа CubeSat. В настоящее время КА «КосмоАИС», построенный на базе этой платформы, проходит последние этапы наземной экспериментальной отработки.

В результате проведенных исследований специалистами Общества было показано, что платформе CubeSat можно использовать для решения достаточно широкого круга задач мониторинга подстилающей поверхности и атмосферы Земли. Был проработан облик полезной нагрузки: малоразмерного передатчика когерентных сигналов для восстановления характеристик ионосферной плазмы, а также малоразмерного радиометра, предназначенного для изучения аномалий уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы.

Представленное исследование посвящено обобщению более чем 10-летнего опыта разработки космических аппаратов нанокласса в АО «Российские космические системы».

II. КА ТНС-0 и КА ТНС-1

Первый технологический наноспутник (ТНС-0) [1,2] имел минимальную функциональность и массу около 4,5 кг без устройства отделения. Его основной задачей было проведение эксперимента по изучению возможности использования спутниковой связи «Глобалстар» для управления и получения целевой и телеметрической информации КА на наземном комплексе управления.

На рис. 1 показан внешний вид ТНС-0. Его структура представляет собой цилиндрическую ферму с диаметром 170 мм и длиной 250 мм.



Рис. 1. ТНС-0 в собранном состоянии (слева), ТНС-0 со снятым стальным корпусом (справа)

Структура закрыта металлическим кожухом, покрашенным в разные цвета (белый и черный) для обеспечения пассивной терморегуляции. Соотношение ширины белых и черных полос позволяет поддерживать среднюю температуру внутри корпуса космического аппарата на уровне 20 °С.

Антенные системы для аппаратуры «Глобалстар» и КОСПАС–SARSAT установлены на верхней грани спутника. На противоположной грани аппарата предусмотрена специальная ручка для осуществления запуска ТНС-0 космонавтом с борта МКС. Также предусмотрен специальный тумблер для включения питания КА и соответствующий индикатор готовности.

Для обеспечения возможности независимого контроля состояния КА на орбите в состав аппаратуры был введен маяк системы КОСПАС–SARSAT.

ТНС-0 был оснащен пассивной системой магнитной стабилизации, которая позволяла ему ориентироваться вдоль одной из осей по линии магнитного поля. КА оснащался литий-ионными аккумуляторами совокупной емкостью до 10 А/ч, внешние солнечные панели в системе электропитания не использовались. Расчетный срок активного существования в подобной конфигурации должен был составить порядка 3 мес, что было вполне достаточно для выполнения всей программы летных испытаний.

ТНС-0 был запущен в 2005 г., и вся программа его летных испытаний была успешно завершена. После 4 мес месяцев работы его аккумулятор был полностью разряжен, а еще через пару месяцев он сгорел в плотных слоях атмосферы.

Второй технологический КА — ТНС-1 [1, 2] обладает более сложной конфигурацией и большей массой: 7,5 кг. Конструкция аппарата представляет собой диск диаметром 500 мм. Он спроектирован с учетом того, что штатным режимом его стабилизации будет режим медленного вращения вокруг оси, перпендикулярной плоскости КА, а поверхность, обклеенная панелями, будет направлена на Солнце. На противоположной стороне будет размещена бортовая аппаратура: модем системы «Глобалстар», элементы системы ориентации и стабилизации, две цифровые фотокамеры для наблюдения поверхности Земли, а также цифровая радиолиния, функционирующая на частоте 1,7 ГГц.

Предполагается, что КА будет функционировать в непрерывном режиме с перекрытием кадров съемки стандарта RGB. Пространственное разрешение с низкой орбиты должно составить около 100 м при полосе захвата 259 км. Ожидается, что КА будет запущен на солнечно-синхронную орбиту с высотой порядка 650 км.



Рис. 2. ТНС-1 со стороны солнечных панелей, внешний вид (слева); ТНС-1 со стороны бортовой аппаратуры, внешний вид (справа)

На рис. 2 представлен внешний вид макета КА ТНС-1.

III. КА ТНС-2

Логичное продолжение конструкции платформ технологических наноспутников ТНС-0 — модификация систем электропитания и ориентации. Следующим поколением КА является ТНС-0 № 2, СЭП которого дополнен внешними солнечными панелями для обеспечения циклов зарядки аккумуляторных батарей.

По сути, конструкция аппарата не претерпела серьезных изменений по сравнению с ТНС-0, структура его представляет собой цилиндрическую ферму прежних размеров. Система электропитания может обеспечить среднюю мощность на уровне 5 Вт, а также кратковременную пиковую нагрузку около 18 Вт. Предусматриваются 4 независимые шины питания, 30 входов для различных телеметрических датчиков. Пропускная способность телеметрической радиолинии составляет 6–7 кбит/с.

На рис. 3 приведен внешний вид спутника ТНС-0 № 2.

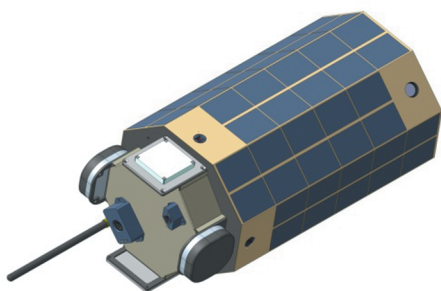


Рис. 3. Внешний вид сборки КА ТНС-0 № 2

Потенциала платформы ТНС-0 № 2 достаточно для продолжения программы экспериментов, направленных на изучение проблем управления космическими аппаратами при использовании глобальных телекоммуникационных сетей, начало которым положил успешный запуск ТНС-0.

С другой стороны, для размещения на борту ТНС-0 № 2 создается прибор для проведения фундаментальных исследований. Совместно с организациями РАН готовится аппаратура и эксперимент по изучению явлений грозовой активности и токов, индуцированных в атмосфере Земли.

Кроме того, совместно с ИПМ им. М. В. Келдыша и институтом ZARM (Германия) на базе ТНС-0 № 2 создается образовательный космический аппарат, который будет использоваться для обучения студентов, а также для проведения исследований по различным алгоритмам управления космическими объектами.

Последующей модернизацией конструкции ТНС-0 № 2 должно стать внедрение активной трехосной системы ориентации и стабилизации (платформа после модернизации получит следующий

индекс — ТНС-2), что позволит существенно расширить область применения технологической платформы.

С учетом улучшенных технических характеристик ТНС-2 может использоваться для решения более серьезных технологических и научно-практических задач. В кооперации с НИИ ПМЭ МАИ и организациями ЕКА предполагается провести эксперимент по отработке базовой функциональности микродвигательных установок для применения на КА подобного класса.

Предварительные исследования, изложенные в работах [3], предлагают рассмотреть применение платформы ТНС-2 в качестве основы для создания космического сегмента системы затменного зондирования атмосферы и ионосферы Земли с использованием сигналов ГНСС.

На борту КА «Радиомет» предполагается использовать перспективную аппаратуру радиозатменного зондирования атмосферы, которая вместе с АФУ весит порядка 1500 г. Как показывает ориентировочная массовая сводка систем КА, общий вес подобного аппарата не превысит 10 кг.

Использование платформы типа ТНС-2 в качестве основной при создании систем мониторинга атмосферы на базе метода радиозатменного зондирования позволит существенно сократить затраты на разработку и развертывание космического сегмента.

IV. КА «RadSat»

С учетом развития технологий производства инфракрасных детекторов в течение последнего десятилетия появилось поколение неохлаждаемых болометрических тепловых приемников, на базе которых может быть построен радиометр космического базирования.

Компанией Ulis серийно производятся ИК-приемники [4] со следующими характеристиками: диапазон регистрируемого излучения — 8–14 мкм, чувствительность (NETD) — 40 мК, потребление — не более 110 мВт. Размер матрицы — 384 × 288 элемента.

С учетом характеристик приемной матрицы был проработан облик перспективного радиометра, предназначенного для размещения на борту КА нанокласса. Особенностью 3-элементной платформы

типа CubeSat в данном случае было ограничение на объем для размещения полезной нагрузки, равное 1 элементу, что составляет $10 \times 10 \times 10$ см (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид КА «RadSat» (проект)

Предварительное проектирование прибора показало, что с учетом необходимости размещения оборудования и электроники обработки данных с матрицы внешние габариты подобного устройства не будут более $7,2 \times 7,2 \times 8,5$ см, а общее энергопотребление полезной нагрузки составит не более 3 Вт.

Максимальное пространственное разрешение радиометра на низкой орбите с высотой до 850 км составляет 250–300 м. Для решения задачи мониторинга аномалий уходящей длинноволновой радиации достаточно пространственного разрешения 1–3 км, максимальная полоса захвата составит от 380 до 1200 км в зависимости от пространственного разрешения.

К сожалению, для расчета уходящей длинноволновой радиации с учетом измерений предлагаемого радиометра придется воспользоваться технологиями, применяемыми к информации, получаемой, например, с космических аппаратов серии NPOES [5]. Тем не менее, у компании MDL существуют разработки неохлаждаемых болометрических матриц, которые способны регистрировать излучение в широком диапазоне от 2 до 50 мкм [6]. При условии их потенциальной доступности на коммерческом рынке концепция радиометра может быть пересмотрена для использования этого приемника.

Наиболее сложной проблемой на этапе предварительного проектирования является необходимость сброса информации, полученной с радиометра, на наземную станцию с учетом ограничения по скорости передачи штатной радиолинии КА «RadSat» — 9600 бит/с.

Учитывая размеры матрицы, а также радиометрические разрешение 8 бит, получим, что размер одного кадра не превысит 900 кбит. С учетом среднего времени сеанса связи с космическим аппаратом возможностей радиолинии будет достаточно для передачи 4–5 изображений.

Бесспорно, оценки, представленные в данной работе, достаточно концептуальны. Тем не менее, при условии использования энергоэффективной платформы, оснащенной радиолинией с большой пропускной способностью, КА с радиометром в качестве полезной нагрузки микро- или даже нанокласса может быть разработан в самой ближайшей перспективе.

V. КА «EConSat»

Общеизвестно, что ионосфера является хорошим индикатором процессов, проходящих в атмосфере и литосфере Земли [7]. Ионосферная плазма в том числе существенно влияет на характеристики проходящих через ионосферу радиоволн, поэтому оценка ее состояния важна для решения не только теоретических и фундаментальных, но и практических задач. Существенная изменчивость ионосферы предъявляет дополнительные требования к системам мониторинга, а также к специальным средствам контроля ее состояния с точки зрения пространственного и временного разрешения.

Один из немногих способов изучения вертикальных распределений электронной концентрации ионосферы на основе спутниковых радиосигналов — метод радиотомографии ионосферы. Метод ионосферной радиотомографии предполагает обработку фазовых характеристик когерентных сигналов навигационных спутников первого поколения или специализированных аппаратов в диапазонах 150/400 МГц на размещенных в регионе исследования наземных станциях [8].

В рамках информационной технологии восстановления вертикальных разрезов электронной концентрации ионосферы, разработанной специалистами АО «Российские космические системы», используется модификация томографического подхода, получившая название «метод фазоразностной томографии» [9]. Его эффективность была подтверждена в результате специальных экспериментов, которые были проведены в дальневосточном регионе Российской Федерации [10, 11].

К сожалению, количество спутников, излучающих необходимый сигнал для исследований ионосферы, неуклонно падает, достаточно остро встает вопрос восполнения орбитальной группировки, сигналы которой можно было бы использовать для мониторинга состояния ионосферы Земли.

В результате научных исследований и предварительных проработок специалистами АО «Российские космические системы» был создан прототип когерентного передатчика в диапазоне 150/400 МГц для размещения на платформе типа CubeSat (рис. 5).

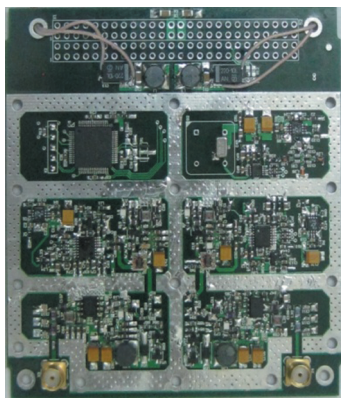


Рис. 5. Внешний вид лабораторного образца передатчика когерентных сигналов

Основные характеристики передатчика: общая потребляемая мощность не более 5 Вт, выходная мощность канала 150 МГц — 0,5 Вт, выходная мощность канала 400 МГц — 1,5 Вт, масса 300 г, габаритные размеры — 100 × 100 × 10 мм. Предусмотрено 8 литер частот для излучения в каждом из частотных каналов.

Предварительный облик КА «EConSat» представлен на рис. 6. В соответствии с представленным составом видно, что используется стандартная

3-элементная структура платформы типа CubeSat со стандартным набором служебных подсистем.

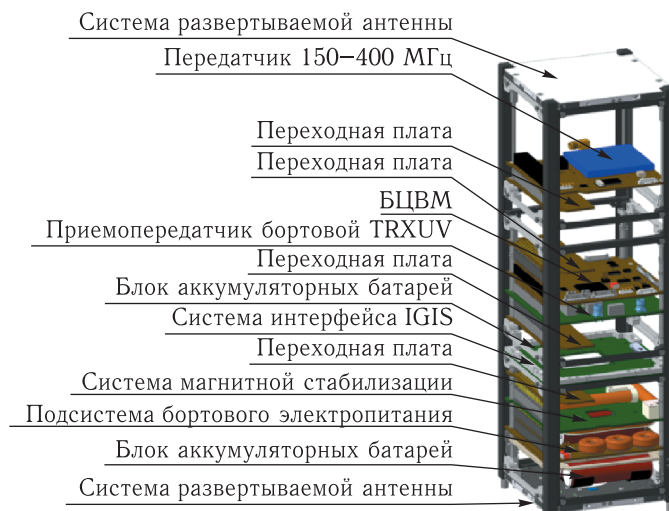


Рис. 6. Внешний вид КА «EConSat» (проект)

В составе спутника не предполагается использования маховичной системы ориентации и стабилизации, поскольку возможностей трехосной магнитной системы стабилизации будет достаточно при условии применения всенаправленной антенны на наземной томографической станции.

В результате предварительных расчетов и проведенного в результате исследований макетирования показано, что возможностей 3-элементной платформы типа CubeSat достаточно для создания аппарата с ионосферным маяком на борту.

В перспективе использование подобных разработок в системах геофизического мониторинга позволит восполнить пробелы, вызванные долгим сроком разработки и изготовления космических аппаратов, предназначенных для исследований состояния ионосферы и магнитосферы Земли.

VI. КА «CosmoAIS»

АИС является системой мониторинга морских и речных судов [11], использующей принцип временного разделения при доступе к каналу связи. Схема Time Division Multiple Access (TDMA) [12] применяется при организации обмена данными между судами для предотвращения столкновений между ними. АИС-стандарт включает в себя 27 сообщений, но наиболее часто используются первые

три типа сообщений, содержащих навигационную информацию. Длина таких сообщений достигает 256 бит, что соответствует величине слота, выделенного для передачи одного сообщения АИС. Скорость передачи сообщений — 9600 бит/с. Информация АИС передается в двух частотных каналах, 161,975 МГц и 162,025 МГц, с использованием модуляции GMSK [13], ширина полосы — 25 кГц.

Специалистами АО «Российские космические системы» был разработан КА «CosmoAIS» (рис. 7) для мониторинга сигналов АИС в космическом пространстве. КА «CosmoAIS» спроектирован на базе 3-элементной структуры CubeSat с размерами $30 \times 10 \times 10$ см и общей массой 3 кг. Платформа включает несколько стандартных подсистем: электропитания, которая состоит из шин питания 3,3 В и 5 В, дополнительных аккумуляторов емкостью 7800 Ач и солнечных панелей; ориентации и стабилизации, трансивер, интерфейсные платы, 3 типа антенн (1× ОВЧ для приемника АИС, 1× ОВЧ для передатчика радиолинии КА, 1× УВЧ для приемника КА) и бортовой компьютер.

Для передачи информации от полезной нагрузки, а также для передачи команд подсистемам используется шина I2C со скоростью передачи данных 100 Кбит/с.

Подсистема определения ориентации состоит из датчика Солнца и магнитометра, система стаби-

лизации построена на магнитных катушках. Спутниковый трансивер может функционировать в полностью дуплексном режиме, скорость передачи со спутника составляет 9600 бит/с, скорость передачи на КА — 1200 бит/с, протокол передачи информации — AX-25.

Бортовая аппаратура приема сигналов АИС может работать в 4 частотных каналах: 156,775 МГц, 156,825 МГц, 161,975 МГц, 162,025 МГц, что делает возможным ее использование с учетом перспективного развития судовых терминалов системы. Общее энергопотребление прибора не превышает 2 Вт, а чувствительность приемника — не менее 117 дБмВт.

Функционально приемник (рис. 8) состоит из частотного селектора с малошумящим усилителем, обеспечивающим аналоговый прием информации, а также цифровой части обработки сигналов, построенной на базе ПЛИС Xilinx.



Рис. 7. Внешний вид КА «CosmoAIS»

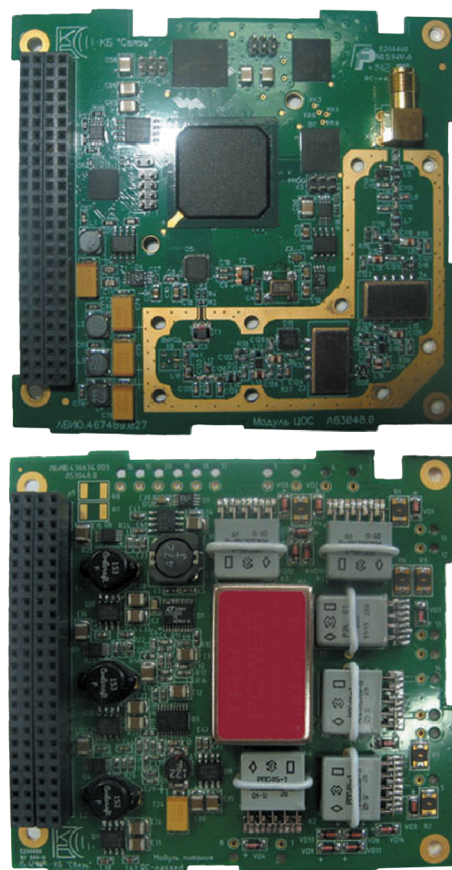


Рис. 8. Внешний вид бортовой аппаратуры приема сигналов АИС КА «CosmoAIS»

Бортовая аппаратура может работать в двух режимах: записи спектра исходного сигнала и декодирования сообщений АИС. На борту КА нанокласса приемник в основном будет работать в режиме непосредственного декодирования пакетов, поскольку пропускной способности радиолинии, а также возможностей подсистемы электропитания явно недостаточно для передачи записанных спектров большого объема.

Кроме того, предполагается, что КА «CosmoAIS» будет функционировать над заранее определенными акваториями в течение 10–15 мин с последующим сбросом информации на наземные станции в Москве или Южно-Сахалинске.

В 2013 г. была завершена наземная экспериментальная отработка КА «CosmoAIS» и в 2015–2016 гг. предполагается осуществить его запуск совместно с другим космическим аппаратом.

VII. Заключение

В заключение необходимо отметить, что в АО «Российские космические системы» ведется серьезная работа по созданию широкого ряда космических аппаратов нанокласса как на платформе собственной конструкции типа ТНС, так и на базе платформы типа CubeSat.

Платформа ТНС, на базе которой был построен первый КА нанокласса в корпорации, получила летную квалификацию в 2005 г. Был проведен эксперимент, направленный на проведение испытаний маяка системы КОСПАС–SARSAT в условиях космического пространства. Передатчик показал себя с самой лучшей стороны и в настоящее время входит в комплекс штатной аппаратуры на спускаемых модулях пилотируемых кораблей.

Развитие платформы ТНС предполагается в расширении ее функциональных возможностей путем модернизации систем электропитания и ориентации. При условии успешной модернизации платформы будет создан перспективный КА нанокласса ТНС-2, на базе которого уже сейчас предполагается провести несколько технологических экспериментов. В перспективе ТНС-2 может быть использован в космических орбитальных группировках мониторинга атмосферы и ионосферы Земли.

Существенным потенциалом обладает платформа космических аппаратов нанокласса типа CubeSat. Специалистами Общества создан лабораторный образец передатчика когерентного излучения в диапазонах 150–400 МГц, который необходим при исследовании состояния ионосферной плазмы методом томографического зондирования. В результате проработки концепции КА EConSat-1 была показана принципиальная возможность создания спутника для осуществления томографических исследований ионосферы.

На базе разработанных технических решений в перспективе может быть создана орбитальная группировка, которая позволит проводить исследования ионосферы практически без использования наземных томографических станций.

С учетом постоянно растущих технических возможностей в ближайшей перспективе можно говорить о появлении наноспутников для мониторинга одного из важнейших параметров радиационного баланса Земли — уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы.

Был проработан облик перспективного космического аппарата на базе платформы CubeSat с малоразмерным радиометром на борту. Радиометр предполагается разрабатывать на базе неохлаждаемой балометрической матрицы, что существенно снижает требования к эксплуатационным характеристикам несущей платформы КА.

Проблема мониторинга сигналов АИС также может решаться с использованием космических аппаратов нанокласса. В результате реализации специального проекта был разработан КА «CosmoAIS» с бортовой аппаратурой регистрации сигналов от морских и речных судов. Запуск КА «CosmoAIS» запланирован на 2015–2016 гг.

Широкое применение платформ нанокласса при решении различных научных и народнохозяйственных задач предъявляет все более жесткие требования к основным служебным подсистемам платформ ориентации и стабилизации и особенно радиолинии передачи информации. С учетом большого опыта АО «Российские космические системы» в создании бортовых подсистем, а также на базе решений, разработанных для платформы ТНС, в ближайшей перспективе может быть создано новое поколение аппаратуры передачи информации

с пропускной способностью до 0,65 Мбит/с и потреблением не более 4–5 Вт.

Адаптация аппаратуры для размещения на платформах типа CubeSat существенно расширит области применения космических аппаратов этого класса и позволит выйти на динамично развивающийся международный коммерческий рынок служебных подсистем.

Список литературы

1. Селиванов А.С., Урличич Ю.М., Хромов О.Е. Семейство технологических наноспутников для экспериментальных исследований. Сб. трудов IV Международной конференции-выставки «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация», 31 мая–4 июня 2004 г., г. Королев. Росавиакосмос, кн. 3, с. 34–35.
2. Panzyrny O.A. Hard-and software of the technological nanosatellite TNS-0, 5th Symposium on Small Satellites for Earth Observation, April 4–8, Berlin — IAA-B5-1404.
3. Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Pavelyev A., Yakovlev O. Concept of space system for global radio occultation monitoring of lower atmosphere and ionosphere based on super-small satellites with GLONASS/GPS navigation signal receivers. United Nations/Austria/European Space Agency Symposium on Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and land Cover. Austria, Graz, 9–12 September (2008).
4. Официальный сайт «Ulis»: <http://www.ulis-ir.com>
5. Hansen J. et al. Earth's energy imbalance: confirmation and implications // Science, 2005, vol. 308, p. 1431–1435.
6. Официальный сайт MDL: <http://microdevices.jpl.nasa.gov/capabilities/superconducting-devices/tes-bolometers.php>
7. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
8. Pulinets S.A., Romanov A.A., Urlichich U.M., Romanov A.A., Doda L.N., Ouzounov D. The first results of the pilot project on complex diagnosis of the earthquakes precursors on Sakhalin Island // Geomagnetism and Aeronomy, 2009, vol. 49, № 1, p. 123–132.
9. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
10. Романов А.А., Трусов С.В., Новиков А.В., Романов А.А. Сравнение данных радиотомографии ионосферы на средних широтах с данными ионозонда, затменного зондирования и моделей ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей. Вып. 6. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2009, с. 296–303.
11. IEC 62320-1-am1: Amendment 1 — Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Automatic identification system (AIS). Part 1: AIS Base Stations — Minimum operational and performance requirements, methods of testing and required test results, Edition 1.0, IEC, October 2008.
12. IEC 62287-1: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Class B shipborne equipment of the automatic identification system (AIS) — Part 1: Carrier-sense time division multiple access (CSTDMA) techniques, Edition 1.0, IEC, March 2006.
13. Murota K., Hirade K. GMSK modulation for digital mobile radio telephony // IEEE Transactions on Communications, 1981, vol. COM-29, № 7, p. 1044–1050.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность Ю. М. Гектину за предоставленные материалы и помощь при подготовке статьи.