

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ

А.А. Петрукович¹, А.А. Чернышов¹, Д.В. Чугунин¹, С.Е. Андреевский¹, М.М. Могилевский¹,
А.А. Синевич¹, А.М. Падохин², И.В. Белоконов³

¹Институт космических исследований РАН

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева

achernyshov@iki.rssi.ru

Свойства и динамические характеристики ионосферы меняются в зависимости от геомагнитной широты. Существуют области, где поведение ионосферы имеет свои естественные особенности и которые необходимо исследовать для понимания физических механизмов, приводящие к этим процессам, а также для их предсказания. Например, неоднородности полярной границы аврорального овала, общие характеристики неоднородности авроральной области во время полярных сияний, касп/клефт, патчи полярной шапки, языки ионизации, поляризационный джет (SAID) и субавроральные поляризационные потоки (SAPS), появление так называемой SAR-дуги (красная дуга), F-рассеяние (F-spread), появление спорадического Es-слоя, экваториальная аномалия, образование плазменных пузырей (баблов) в экваториальной зоне. Интерес представляют также активные эксперименты, в которых производится управляемое воздействие на ионосферу Земли. Наиболее действенными методами активного воздействия являются радиофизические средства: нагревные стенды и мощные наземные низкочастотные передатчики (ОНЧ-передатчики). Исследования пространственно-временной изменчивости верхней атмосферы, ионосферы и околоземного космического пространства (ОКП) важны не только с точки зрения изучения физики протекающих здесь процессов, но и для различных прикладных задач, связанных с ионосферным распространением радиоволн - загоризонтной радиолокации, КВ связи, спутниковой навигации.

В связи с сильной изменчивостью среды в широком диапазоне масштабов главную роль среди методов исследования играют методы дистанционного зондирования, позволяющие получать информацию в реальном времени. На современном этапе развития техники спутникового зондирования возможно получать информацию об ионосфере и ОКП в широком диапазоне положений приемопередающих систем, что позволяет свести широкий класс задач дистанционного зондирования к томографической постановке [Куницын и др. 2007]. В широком смысле слова под томографией понимают восстановление многомерного распределения (поля) некоторой физической величины по набору его проекций или преобразований. Использование низкоорбитальных спутников, время пролета которых над наблюдательной системой достаточно невелико (~15 мин.) позволяет исключить из рассмотрения временную динамику ионосферы за время пролета спутника и восстанавливать «моментальные» распределения электронной концентрации в плоскости пролета спутника и наблюдательной системы. Временное разрешение в таком случае определяется временем между двумя последовательными пролетами используемых для зондирования спутников над наблюдательной системой. В случае использования средне и высокоорбитальных спутников, например GNSS, задача усложняется и требует учета временной динамики ионосферы. Методами низкоорбитальной томографии возможно получать двумерные

сечения электронной концентрации в ионосфере на интервале времени пролета космического аппарата ~10-20 минут.

Низкоорбитальная РТ является достаточно мощным и действенным методом зондирования и мониторинга состояния ионосферы. Даже измерения в одной точке на поверхности Земли позволяют проводить исследования неоднородной структуры ионосферы. Одноточечную систему можно использовать для определения местонахождения отдельных рассеивателей в верхней атмосфере и размеров неоднородностей в направлении движения спутника. Если использовать цепочку приемных станций вдоль проекций на Землю орбиты спутника, то томографический подход позволяет определить двумерную структуру крупномасштабных неоднородностей электронной плотности, а также двумерный срез дисперсии флуктуаций электронной плотности. При наличии нескольких линеек приемников, расположенных на расстояниях порядка нескольких сотен километров друг от друга, можно восстанавливать трехмерную структуру ионосферы [Кунцын и др. 2010]. Основным недостатком низкоорбитальной РТ является необходимость создания систем со многими цепочками (линейками) приемных станций. Однако в настоящее время наблюдается острая нехватка современных космических аппаратов на низких полярных орбитах, оснащенных многочастотными когерентными радиомаяками для регулярного и систематического проведения необходимых измерений в средних и высоких широтах на существующих цепочках приемных пунктов. Следует отметить, что это не только российская, но и общемировая проблема. В связи с этим техническая задача выведения новых низкоорбитальных спутниковых радиомаяков на полярную орбиту становится весьма актуальной. Она может быть решена в том числе за счет использования нескольких космических аппаратов малой размерности типа CubeSat (базовый размер с габаритами 10x10x10 см получил название 1U). Основным преимуществом таких спутников является то, что их можно значительно быстрее разработать и изготовить. Другим важным преимуществом спутников малой размерности является их относительно малая стоимость по сравнению с большими и сложными космическими аппаратами. Использование нескольких CubeSat дает возможность проводить одновременные измерения в разных точках космического пространства и получать объемную картину протекающих процессов [Чернышов и др., 2016]. Кроме того, обычно предполагается, что подобные “кубсаты” не будут долго находиться на орбите, следовательно, отпадает необходимость в дополнительных затратах на радиационную защиту спутника и можно использовать более дешевые комплектующие при их производстве. Унификация таких спутников позволяет не только удешевить и ускорить их проектирование и изготовление, но и при необходимости произвести запуск дополнительных аналогичных спутников для получения вспомогательной информации на других масштабах или для уточнения уже имеющихся данных.

В ИКИ РАН в настоящее время разработан двухчастотный радиомаяк 150/400МГц для наноспутников стандарта 3U CubeSat - модуль передатчика когерентных сигналов бортового (ПКСБ). Требования к антенным устройствам ПКСБ - два полуволновых диполя на частоты 150 и 400 МГц с входным сопротивлением фидера 50 Ом, максимум диаграммы направленности в надир. Во время функционирования прибора ПКСБ в составе космического аппарата с наземного пункта управления на борт КА загружается программа работы ПКСБ: номер канала рабочей частоты, время включения усилителей мощности (вначале пролета над наземной цепочкой приемников), время выключения усилителей мощности (в конце пролета над цепочкой приемников). В установленное время, в ПКСБ подается команда включения (номер канала частоты, включение

усилителей мощности), а затем (через 10-15 минут) команда выключения усилителей мощности. Энергопотребление определяется числом сеансов передачи сигналов за сутки. Средняя длительность сеанса передачи равна 15 мин. Для одного сеанса в сутки суточное энергопотребление полезной нагрузки составит 0,14 Вт. Максимальное число сеансов за сутки для одной цепочки приемников равно трем. В этом случае суточное потребление данного прибора составит 0,22 Вт. Температура конструкции, предназначенной для установки ПСКБ должна обеспечиваться в диапазоне от минус 10 до плюс 40 °С. Необходимость использования ЭВТИ (экранно-вакуумная теплоизоляция) определяется по результатам теплового расчета спутника.

В настоящий момент совместно с Самарским университетом готовится к запуску в 2024 году спутник формата кубсат 3U «СамСат-Маяк» с прибором ПСКБ на борту для проведения низкоорбитальной радиотомографии ионосферы. Для этого будет использоваться, в первую очередь, российская цепочка приемных станций МГУ и ПГИ от Москвы до Баренцбурга.

Необходимо отметить, что перспективные спутниковые платформы для задач томографии ионосферы и ОКП не ограничиваются малыми и сверхмалыми спутниками. В ближайшее время планируется запустить четыре спутника российского проекта "Ионосфера", предназначенных для мониторинга ОКП. Спутники будут запускаться попарно на солнечно-синхронные орбиты в плоскостях 09/21 и 03/15 местного магнитного времени (MLT) с разведением на орбите на ~ 180 градусов. На спутниках будут установлены различные научные приборы для измерения параметров ионосферной плазмы, в том числе, двухчастотный передатчик когерентных сигналов 150/400МГц МАЯК функционально аналогичный ПКСБ для низкоорбитальной радиотомографии, радиозатменный измеритель плотности плазмы ПЭС, а также ионозонд внешнего зондирования ЛАЭРТ, анализатор фоновой плазмы ЭСИП и приемные антенны ОНЧ диапазона [Petrukovich et al. 2021].

Список литературы:

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. Москва: Изд-во Физматлит, 2007.
2. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева [и др.] // УФН. 2010. Т. 180 С. 548–553. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005k.0548.
3. Подходы к исследованию мультимасштабной структуры ионосферы с использованием наноспутников / Чернышов А.А. [и др.] // Геомагнетизм и Аэрономия, 2016. Т.56 (1), С. 77-85, DOI: 10.7868/S0016794016010041.
4. Monitoring of Physical Processes in Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere in Ionosphere Space Missions / Petrukovich A.A. [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2021. V.254. N.02010, 22 p. DOI: 10.1051/epjcon.