
ДИАГНОСТИКА СПЕКТРА ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО АНАЛИЗАТОРА RFA

Х. РОТКЕЛЬ, М. МОРАВСКИ, М. КШЕВСКИ, Г.В. ЛИЗУНОВ

Научные задачи

Ионосфера Земли привлекает внимание учёных не только в своём существенном качестве — как газоплазменная оболочка планеты, одна из геосфер, — но и как природная лаборатория, в которой реализуются труднодостижимые на Земле физические условия. Волновые процессы в ионосфере охватывают широчайший диапазон пространственных и временных масштабов: от сантиметров (дебаевский радиус ионосферной плазмы) до планетарных размеров, от долей герц (альфвеновские волны) до полутора десятка мегагерц (ленгмюровские колебания). Введение прибора RFA в состав научной аппаратуры, созданной для проекта «Ионосат-Микро», преследует целью измерение полного спектра ионосферных волн. Данные эксперимента предполагается использовать для изучения следующих явлений.

Турбулентность ионосферной плазмы

Элементарным процессом, лежащим в основе генерации плазменной турбулентности, является взаимодействие «волна — частица». Это взаимодействие создаёт канал обмена энергией и импульсом между электромагнитным полем и плазменной средой и перераспределяет энергию по ансамблю волн и частиц. Как показывает опыт, турбулентность присутствует в ионосфере всегда (обычно это слабая турбулентность, хотя документированы наблюдения локализованных зон сильной турбулентности, например, в дугах полярных сияний [1]). Турбулентность накладывает отпечаток на всю картину ионосферной динамики — спектральный состав радиоэмиссий, процессы переноса (диффузию, вязкость и теплопроводность, характеризуемых аномальными транспортными коэффициентами), нагрев и ускорение заряженных частиц и пр. [1].

Важной чертой ионосферных плазменных процессов является связь возмущений различных масштабов. Иногда наблюдаются очень сложные цепочки связанных событий. В качестве примера рассмотрим генезис одного из наиболее грандиозных геокосмических явлений — полярного сияния [2–6]. Согласно современным представлениям, источник авроральных процессов

находится в ночном секторе магнитосферы, где происходит возбуждение локальных, поперечных к магнитному полю Земли электрических токов. Их замыкание через магнитосопряжённую ионосферу порождает глобальную магнитосферно-ионосферную электрическую цепь, сила тока в которой достигает значительных величин (например, в электроструях сильных полярных сияний сила тока составляет 1...10 кА, а возмущение магнитного поля Земли 50...500 нТ). Под действием плазменных неустойчивостей в токнесущей магнитной силовой трубке развивается ионно-звуковая турбулентность, приводящая к генерации аномального сопротивления плазмы и/или двойных электрических слоёв [7, 8] (согласно другим гипотезам — инерционных альфвеновских волн [9, 10]). Эти процессы индуцируют продольное электрическое поле, под действием которого происходит ускорение части заряженных частиц до энергий 10...30 кэВ. Бомбардируя атмосферу энергичные магнитосферные частицы порождают полярное сияние, а в ионосферной плазме — плазменно-пучковую неустойчивость. В дугах сильных полярных сияний регистрируется генерация ленгмюровских колебаний и связанная с этим ВЧ турбулентность [1, 11].

На рис. 1 (см. на цветной вклейке) представлен пример регистрации на спутнике «Polar» структуры авроральных электрических токов, втекающих и вытекающих из ионосферы. С использованием модели магнитного поля Земли OVT-2 эта структура привязана к географическим и магнитным координатам. На рисунок нанесён синхронный снимок полярного сияния в ультрафиолетовом спектре, полученный на спутнике NOAA. Коллаж показывает взаимную обусловленность процессов — авроральной электроструи, полярного сияния и связующего их, вторгающегося вдоль магнитных силовых линий пучка электронов (Н.В. Хотяинцев, частное сообщение, 2002).

Радиогало ионосферы

Наблюдения широкополосных электромагнитных излучений на борту низкоорбитальных спутников «Интеркосмос-19», «Космос-1809», «Активный», АПЭКС, КОРОНАС-И свидетельствует об усилении волновой активности ионосферы над Европой и Азией [12, 13]. Характерный пример планетарного распределения волнового поля представлен на рис. 2 (см. на цветной вклейке). Над всей Евразией рост интенсивности радиоэмиссий достигает ~ 20 дБ.

Согласно [14], яркость радиогало ионосферы возрастает под действием сугубо техногенного эффекта — работы ширококвещательных радиостанций. Гипотетическая последовательность событий при этом следующая: сигналы земных радиостанций воздействуют на радиационные пояса Земли, вызывая ускорение и выведение в конус потерь энергичных электронов. Возникающие таким образом потоки высыпающихся частиц вторгаются на ионосферные высотные уровни, где они испытывают рассеяние на турбулентных флуктуа-

циях плазмы и высвечивают широкополосное тормозное излучение, регистрируемое в космических экспериментах.

Физические процессы, связанные с грозовой активностью

Та же цепочка взаимодействий, что и в предыдущем пункте, но теперь на ионосферу воздействуют вистлерные волны, излучаемые молниевыми разрядами. Регистрация в проекте «Ионосат-Микро» ионосферных радиоэмиссий ОНЧ диапазона (вистлеры) и одновременно ВЧ диапазона (излучение при рассеянии выпадающих частиц радиационных поясов) позволит исследовать связь указанных процессов.

Глобальное распределение волнового поля в ионосфере

Провалы плотности плазмы, связанные с морфологической структурой ионосферы (такие как среднеширотный провал, плазменные «баблы» и т.д.) демонстрируют повышенную волновую активность. Иногда наблюдается чёткая локализация вкраплений плазменной турбулентности внутри плазменных неоднородностей (см. [14]). Для изучения этой связи в проекте «Ионосат-Микро» предлагается провести совместный анализ спектров ионосферных эмиссий (по данным измерений инструментом RFA) и распределения концентрации плазмы в ионосфере (по данным инструмента DE).

Анализатор спектра RFA

Радиочастотный анализатор RFA (Radio Frequency Analyzer) является прибором для измерения трех компонент электрического поля в частотном диапазоне 50,0 кГц–15 МГц. Прибор состоит из двух основных частей:

1. Радиоприемник и блок управления (RFA-E);
2. Трёхкомпонентная электрическая антенна (RFA-AE).

Модуль RFA-E расположен в приборном отсеке, как правило во внутренней части космического аппарата, тогда как антенна RFA-AE должна быть установлена снаружи на проводящей части корпуса спутника или на выносной штанге на некотором удалении от него. Основные характеристики RFA представлены в таблице 1.

RFA допускает два типа измерений. В первом случае прибором выдаются динамические Фурье-спектры составляющих электрического поля, а во втором — их волновые формы.

После включения, RFA автоматически выполняет внутренние процедуры тестирования и формирует первый служебный ТМ блок, после чего, также автоматически, начинается цикл измерений. Режим построения спектров (SPECTRUM) выполняется по умолчанию. Данные измерений (один спектральный набор за один цикл) сохраняются во внутренней памяти, компонуется в пакеты и затем передаются в систему телеметрии.



Возможны следующие режимы функционирования RFA:

1. OFF: питание прибора полностью выключено. После включения питания процессоры перезагружаются;
2. STANDBY: энергосберегающий режим — генерируются только служебные (НК, от HouseKeeping) пакеты и/или научные данные, которые передаются из буфера в систему телеметрии;
3. SPECTRUM: рабочий режим (по умолчанию).
4. WAVE: рабочий режим.
5. MONITORING: режим ограничения потока данных — только некоторые спектры или компрессированные данные.
6. CALIBRATION: режим внутренней калибровки датчиков.

Блок контроля RFA основан на 32-битном микропроцессоре, осуществляющем одновременно весь цикл управления прибором и обработки данных.

Таблица 1

Основные характеристики RFA

Параметры	Значения
<i>Основные</i>	
Масса, кг	1,1 ($\pm 0,2$)
Мощность, Вт	10,0 (+20 % / -30 %) — полное включение ~2,5 (+25 % / -50 %) — режим ожидания или дежурный режим (TM Dump)
Напряжение питания, В	28,0 (± 4)
Размеры, мм	190,0 × 160,0 × 92,0 (будут уточняться)
<i>Функциональные</i>	
Количество каналов	3
Диапазон частот	50,0 кГц—15,0 МГц
Спектральное разрешение	~1,0 кГц (в диапазоне 50—1000 кГц) ~20,0 кГц (в диапазоне 1,0—15,0 МГц)
Разрешение по времени	25,0 нс
Динамический диапазон	80,0 дБ — спектральный режим (будет уточняться) 65,0 дБ — волновой режим
<i>Рабочие</i>	
Дискретные команды	нет
Телеметрический (ТМ)/ тестовый (ТС) интерфейс	RS 422 (будет уточняться)
ТС поток	2—3 команды в течение одной сессии/орбиты
ТС длина пакета	16 байт (будет уточняться)
ТМ поток	~2—4 Кбайт/с
ТМ длина пакета	256 байт (будет уточняться)
Внутренний буфер памяти	2 Мбайт (минимум 10 мин непрерывных измерений)

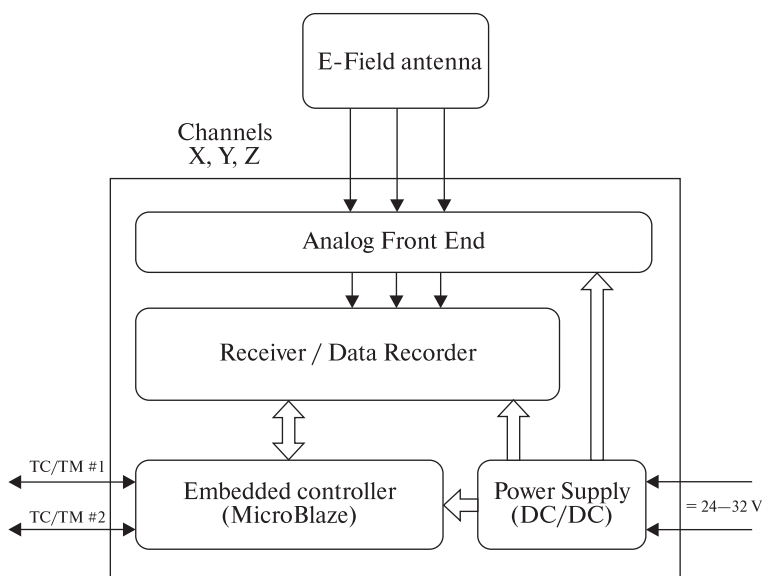


Рис. 3. Функциональная схема RFA

Внутреннее программное обеспечение служит для выполнения следующих операций:

1. Сбор данных — построение спектров измеренных составляющих электрического поля и накопление данных в буферной памяти;
2. Синхронизация процессов измерения и установка меток времени;
3. Форматирование и сжатие данных, сбор и хранение пакетов телеметрии во внутреннем ТМ-буфере;
4. Служебный (НК) мониторинг — сбор служебных данных (тестирование напряжения и температуры), подготовка пакетов служебной информации;
5. Управление телеметрией — отправка сформированных пакетов телеметрической информации в подсистему телеметрии;
6. Тестирование — получение пакетов командной телеметрии с проверкой на достоверность и последующим их выполнением или запретом на отсылку;
7. Контроль состояния прибора — контроль исполнения команд, изменяющих режимы работы прибора, а также контроль таблиц его состояния;
8. Управление энергопотреблением прибора.

Функциональная диаграмма RFA показана рис. 3. На рис. 4 (см. на цветной вкладке) представлена фотография блока RFA-E. Толщина стенок корпуса блока 1,5 мм.

Три дипольные антенны блока RFA-AE предназначены для детектирования электрического поля плазменных волн в радиочастотном диапазоне. Антенны соединены с низкошумящими предусилителями, служащими для согла-

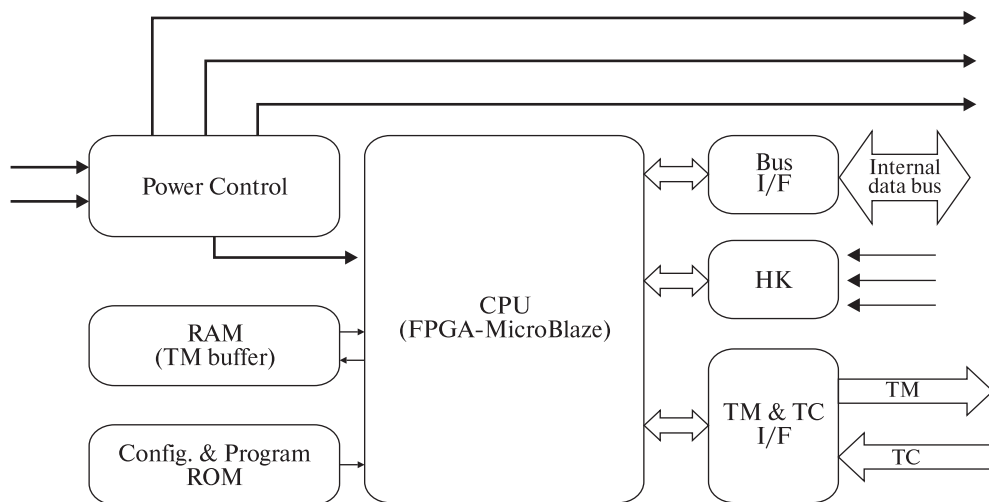


Рис. 6. Функциональная схема блока управления

сования переменного импеданса антенн в ионосферной плазме с импедансом соединительного кабеля ($Z = 50$ Ом). Для получения относительно хорошего отношения сигнал/шум и предупреждения искажения сигнала коэффициент усиления выбран фиксированным (~ 10 дБ). Далее сигналы поступают на аналоговый внешний интерфейс, откуда после фильтрации (для избегания эффекта наложения спектров) передаются в модуль записи волновых данных WRC.

Антенны выполнены в виде бериллиево-бронзовых трубчатых конструкций длиной 1,5 м, диаметром 6 мм и толщиной 0,05 мм, которые разворачиваются в рабочее положение миниатюрным шаговым двигателем. Преимуществами такой конструкции являются ее малая масса (375 г вместе с предусилителями и двигателем) и компактность в сложенном состоянии (диаметр 200 мм, высота 90 мм). Фотография антенного блока представлена на рис. 4 (см. на цветной вкладке). В таблице 2 указана масса узлов RFA.

Блок управления RFA (рис. 6) обеспечивает трехканальное 12 битное аналого-цифровое преобразование сигналов. Каждый аналоговый канал включает в себя входной усилитель, служащий для разделения и симметрирования сигналов,

Таблица 2

Масса прибора и его основных узлов

Масса	Всего, г
Электронный блок (RFA-E)	1100,0 (± 200)
Блок антенн (RFA-AE)	200,0 (± 20)
Проводные соединения	100,0 (± 50)
Масса RFA	1400,0 (± 270)

а также сдвига уровня напряжений для согласования со входом АЦП. Данные в цифровой форме временно поступают во внутренний буфер. Затем они обрабатываются, анализируются и сжимаются в бортовом процессоре обработки сигналов. В зависимости от текущего режима работы и используемого алгоритма выходные данные могут быть в виде: исходных или сжатых волновых форм, наборов чисел (вычисленных волновых мод), полного спектра или сжатого набора спектральных мод. Сбор и преобразование данных контролируются аппаратной логикой, реализованной в FPGA (Field-Programmable Gate Array), в соответствии с предварительно запрограммированным режимом работы. Бортовая память может использоваться как кольцевой буфер или реализовать FIFO-алгоритм (принцип простой очередности) в зависимости от режима работы.

Преобразователь питания «постоянный ток — постоянный ток» (DC/DC) обеспечивает гальваническую развязку между первичной и вторичной линией электропитания, а также узлами аппаратуры. Любое постоянное напряжение на основной шине питания в диапазоне 24–32 В (в том числе короткое замыкание) не опасно для устройства.

Заключение

Целью космического эксперимента, предлагаемого в данной работе, является регистрации и изучение спектра ионосферных плазменных волн. Для этого в комплексе научной аппаратуры «Ионосат-Микро» служат инструменты:

1. Векторный магнитометр FGM с рабочим диапазоном 0–1 Гц, обеспечивающий прецизионное измерение магнитного поля. Эксперимент с измерением электрического поля в этой части спектра не производится. Тем не менее, использование только магнитометра для регистрации КНЧ плазменных процессов представляется оправданным, поскольку указанные процессы носят магнитогидродинамический характер;

2. Волновые зонды WP с рабочим диапазоном 0,1–20 кГц, которые вместе с электрическим зондом EP обеспечивают регистрацию всех компонент магнитного и электрического полей;

3. Радиочастотный анализатор RFA с рабочим диапазоном 50 кГц–15 МГц, предназначенный для ежесекундной регистрации спектра электрического поля. В этом диапазоне диагностика магнитных возмущений не производится, что соответствует представлению о преимущественно электростатическом характере турбулентности ионосферной плазмы в НЧ — ВЧ диапазоне;

4. Два зонда Ленгмюра DE для ежесекундного измерения концентрации и температуры фоновой плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 264 с.



2. *Маров М.Я., Колесниченко А.В.* Введение в планетную астрономию. — М.: Наука, 1987. — 456 с.
3. *Lysak R.L., Dum C.T.* Dynamics of magnetosphere-ionosphere coupling including turbulent transport // *Journal of Geophysical Research*. — 1983. — V. 88. — P. 365.
4. *Borovsky J.E.* Auroral arc thicknesses as predicted by various theories // *Journal of Geophysical Research*. — 1993. — V. 98. — P. 6101.
5. *Lysak R.L.* Electrodynamic coupling of the magnetosphere and ionosphere // *Space Science Reviews*. — 1990. — V. 52. — P. 33.
6. *Knudsen D.J.* Structure, acceleration, and energy in auroral arcs and the role of Alfvén waves // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 95. — P. 501.
7. *Галеев А.А., Сагдеев Р.З.* Токовые неустойчивости и аномальное сопротивление плазмы // *Основы физики плазмы. Дополнение к т. 2* / Под ред. А.А. Галеева и Р. Судана. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 5.
8. *Волокитин А.С., Красносельских В.В.* Двойные слои в плазме // *Исследования космического пространства. — Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР*. — 1988. — Т. 28. — С. 129.
9. *Clark A.E., Seyler C.E.* Electron beam formation by small-scale oblique inertial Alfvén waves // *Journal of Geophysical Research*. — 1999. — V. 104. — P. 17233.
10. *Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A., Wahlund J.-E.* Small scale Alfvénic structure in the aurora // *Space Science Reviews*. — 2000. — V. 92. — P. 423–533.
11. *Lizunov G., Khotyaintsev Yu., Stasiewicz K.* Parametric decay to lower hybrid waves as a source of modulated Langmuir waves in topside ionosphere // *Journal of Geophysical Research*. — 2001. — V. 106. — No A11. — P. 24755–24764.
12. *Parrot M.* World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // *Annales Geophysicae*. — 1990. — V. 8. — P. 135–145.
13. *Rothkaehl H., Parrot M.* Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2005. — V. 67, Issue 8–9. — P. 821–828.
14. *Rothkaehl H., Klos Z.* Broadband HF emissions as an indicator of global changes within the ionosphere // *Adv. Space Res.* — 2003. — V. 31. — P. 5.
15. *Malingre M., Berthelier J.-J., Pfaff R., Jasperse J., and Parrot M.* Lightning-induced lower-hybrid turbulence and trapped Extremely Low Frequency (ELF) electromagnetic waves observed in deep equatorial plasma density depletions during intense magnetic storms // *Journal Geophys. Res.* — 2008. — V. 113. — A11320. — doi:10.1029/2008JA013463.