

Анализатор спектра поля атмосфериков на реконфигурируемых ПАИС Anadigm

Алексей Галахов (galex@pgia.ru), Валентин Косолапенко, Алексей Ларченко, Сергей Пильгаев (г. Апатиты, Мурманская обл.)

В статье приводится описание практического применения совместно используемых реконфигурируемых ПАИС Anadigm и PIC-микроконтроллера в геофизической аппаратуре. На примерах экспериментально полученных данных показаны возможности использования анализатора спектра поля атмосфериков (АСПА) для изучения свойств волновода Земля – ионосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физики атмосферы актуально и в наши дни [1], поскольку всегда имеется потребность в корректировке физической модели ионосферы с помощью оперативно получаемых экспериментальных данных. Обычная модель ионосферы не может охватить и предсказать всех факторов, влияющих на состояние плазмы, интенсивность рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца, уровень галактических космических лучей [2].

Использование низкочастотных электромагнитных колебаний – атмосфериков как инструмента изучения физики ионосферы и условий распространения радиоволн объясняется наличием у них непрерывного спектра излучения и способностью распространяться в волноводе Земля-ионосфера на большие расстояния с малым коэффициентом затухания [3]. Атмосферик – это электромагнитный импульс, формируемый спектром излучаемых молнией волн, на достаточно большом от неё расстоянии. Поле атмосфериков представляет собой результирующее электромагнитное поле, создаваемое группой атмосфериков.

Известно, что спектры атмосфериков несут информацию как о работе молниевых источников, так и о трассе распространения сигнала [3, 4]. При этом на амплитудно-частотные характеристики атмосфериков основное влияние оказывают стенки волновода, главным образом, D-слой ионосферы [5], который характеризуется своей изменчивостью в зависимости от гелиогеофизических факторов, таких как интенсивность рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца, уровень галактических космических лучей [2].

В области расстояний 1000...2000 км от источника разряда в волноводе Земля – ионосфера возбуждается спектр волн,

который имеет интерференционный характер, обусловленный суперпозицией прямой (поверхностной) волны, распространяющейся вдоль поверхности Земли, и волн, отражённых от нижнего слоя ионосферы [4].

Если для поверхностных волн условия распространения более менее устойчивы, так как волновод не имеет границ в продольном направлении, то пространственные волны возникают только из-за отражений от границы неоднородных слоёв ионосферы и проявляются в том случае, если частота колебаний выше критической частоты волновода $F > F_{кр}$. Критической частотой волновода называется наименьшая частота, при которой при модовой теории возможно распространение сигнала с модой $n \geq 1$ ($n=1, 2$ и т. д.) [4].

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АСПА

В отличие от известных способов получения АЧХ атмосфериков [3], таких как регистрация волновой формы в широкой полосе частот с последующей цифровой обработкой или непосредственное измерение амплитудного спектра с помощью узкополосных фильтров, в лаборатории атмосферы Арктики Полярного геофизического института в 2014 г. был разработан анализатор спектра поля атмосфериков (АСПА), который проводит спектральный анализ не отдельных атмосфериков, а их суммарного поля, усредненного за время анализа спектра.

Анализатор спектра поля атмосфериков (АСПА), функциональная схема которого представлена на рисунке 1, построен на основе ПАИС Anadigm FPAА1,2 (AN221E04) и микроконтроллера PIC18F452. Использование данных программируемых микросхем даёт возможность использовать режим динамической

реконфигурации ПАИС, что позволяет полностью или частично менять принципиальную схему работающего устройства в реальном времени. Целесообразность применения ПАИС Anadigm для создания измерительной геофизической аппаратуры обусловлено её высокими техническими характеристиками [6, 7]:

- низкий уровень собственных шумов ($U_{шн} = 0,13$ мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$), достигнутый за счёт того, что внутренняя структура микросхем выполнена по дифференциальной схеме;
- высокая точность обработки аналогового сигнала (погрешность установки параметров фильтров не хуже 1%), которая обусловлена тем, что в отличие от цифровых систем, где сигнал дискретен по времени и квантован по уровню, в дискретно-аналоговых системах, к которым относится ПАИС, сигнал дискретен только по времени;
- наличие на входах ПАИС anti-aliasing фильтров (ФНЧ), построенных на дискретных элементах, для устранения паразитного эффекта наложения спектра;
- возможность проведения динамической реконфигурации аналоговых блоков ПАИС в реальном времени;
- условия эксплуатации: $-40...+40^\circ\text{C}$.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ АСПА

В качестве входного сигнала АСПА используется выходной сигнал приёмника ОНЧ-диапазона (400–7500 Гц), где в качестве антенны применена рамочная антенна, включённая по схеме с симметричным входом в режиме преобразователя тока в напряжение [9]. Алгоритм работы АСПА включает в себя выполнение следующих основных функций.

1. *Непрерывный последовательный спектральный анализ входного сигнала.* Последовательный анализатор спектра состоит из преселектора (FPAА1), который формирует частотную полосу входного сигнала $\Delta F = 600\text{--}7500$ Гц, и селектор (FPAА2), включающий в себя перестраиваемый по частоте фильтр (CF) и детектор (D2).

Значения резонансных частот перестраиваемого фильтра CF выбраны рав-

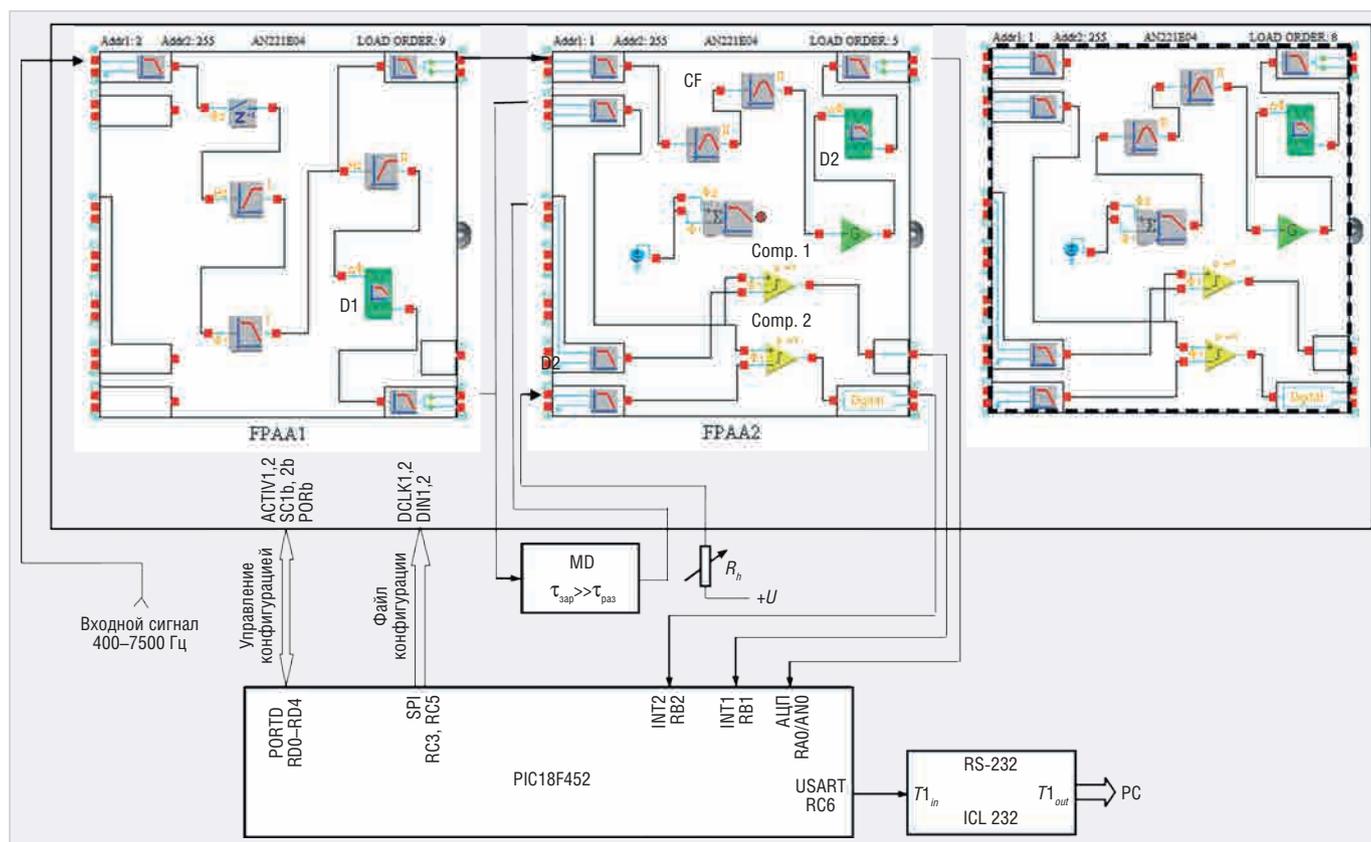


Рис. 1. Функциональная схема АСПА

номерно: 613, 750, 909, 1050, 1204, 1350, 1500, 1650, 1795, 1945, 2091, 2200, 2386, 2682, 2978, 3273, 3601, 3861, 4121, 4381, 4641, 4901, 5161, 5421, 5681, 5941, 6201, 6461, 6721, 6981, 7241 и 7501 Гц.

Полоса пропускания анализирующего фильтра выбрана с учётом средней длительности атмосферика ($t \sim 5$ мс) и составляет $2\Delta f_{0,7} = 200$ Гц; коэффициент прямоугольности АЧХ фильтра: $K_{0,1} = 2\Delta f_{0,7} / 2\Delta f_{0,1} = 0,32$, $K_{0,01} = 2\Delta f_{0,7} / 2\Delta f_{0,01} = 0,1$. Длительность цикла последовательного анализа: $T_a = 25,5$ с.

При выборе длительности времени анализа T_a учитывалась максимальная выдержка сторожевого таймера (ST) контроллера PIC18F452, который был установлен для исключения возможных технических сбоев используемых модулей микроконтроллера [8] во время непрерывной круглосуточной работы. Команда обнуления счётчика ST входит в подпрограмму инициализации таймера TMR0 контроллера, который задаёт временной шаг смены резонансной частоты анализирующего фильтра CF.

Запись спектральных составляющих входного сигнала происходит в моменты прихода атмосферика, амплитуда которого соответствует заданному интервалу напряжений. Для формирования импульса, соответствующего переднему фронту атмосферика применён

амплитудно-временной дискриминатор, построенный на детекторах (D, MD) с разным соотношением времени заряда и разряда, и компараторах (Comp. 1, 2).

2. «Обнуление» анализирующего фильтра после каждой записи спектральной составляющей поля атмосфериков. В связи с тем, что период следования атмосфериков соизмерим с постоянной времени фильтра CF, то возможны случаи, когда напряжение на фильтре за счёт его «звона» будет результатом действия нескольких атмосфериков. Чтобы уменьшить данную погрешность измерения амплитуды поля атмосферика, после каждой записи спектральной составляющей запускается подпрограмма динамической реконфигурации FPAА2, которая меняет структуру схемы на FPAА2-reset (см. рис. 1). При этом входная цепь анализирующего фильтра CF отключается от входного сигнала и подключается к общей точке микросхемы на время $t \geq \tau_{CF}$ (τ_{CF} – постоянная времени фильтра CF).

3. Распознавание атмосфериков на фоне естественного входного сигнала. Работа амплитудно-временного дискриминатора атмосфериков основана на том, что длительность атмосфериков (единицы миллисекунд) на несколько порядков меньше, чем длительность других естественных излу-

ний (хоры, шипения, квазипериодические эмиссии и т.д.) рассматриваемого диапазона частот. В то же время амплитуда атмосфериков меняется в широких пределах (~ 40 дБ) и значительно превышает амплитуды указанных выше естественных сигналов. В связи с этим для того, чтобы избежать искажения спектра в усилительном тракте АСПА из-за ограниченности его динамического диапазона необходимо осуществлять контроль амплитуды принятого атмосферика.

В качестве дискриминатора атмосфериков используется компаратор Comp1 (FPAА2), входы которого подключены к детекторам D (FPAА1) и MD, имеющим различные соотношения времени заряда и разряда. Причём для амплитудного детектора D $\tau_{зар} \sim \tau_{раз}$, а для минимального детектора MD $\tau_{зар} \gg \tau_{раз}$. Компаратор Comp2 определяет верхнюю границу значений амплитуд атмосфериков, которая устанавливается потенциометром R_n .

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА PIC-18F452

Схемой управления и синхронизации работы АСПА является микроконтроллер PIC18F452, который выполняет следующие основные функции:

- формирование тактовой частоты 16 МГц для работы ПАИС;

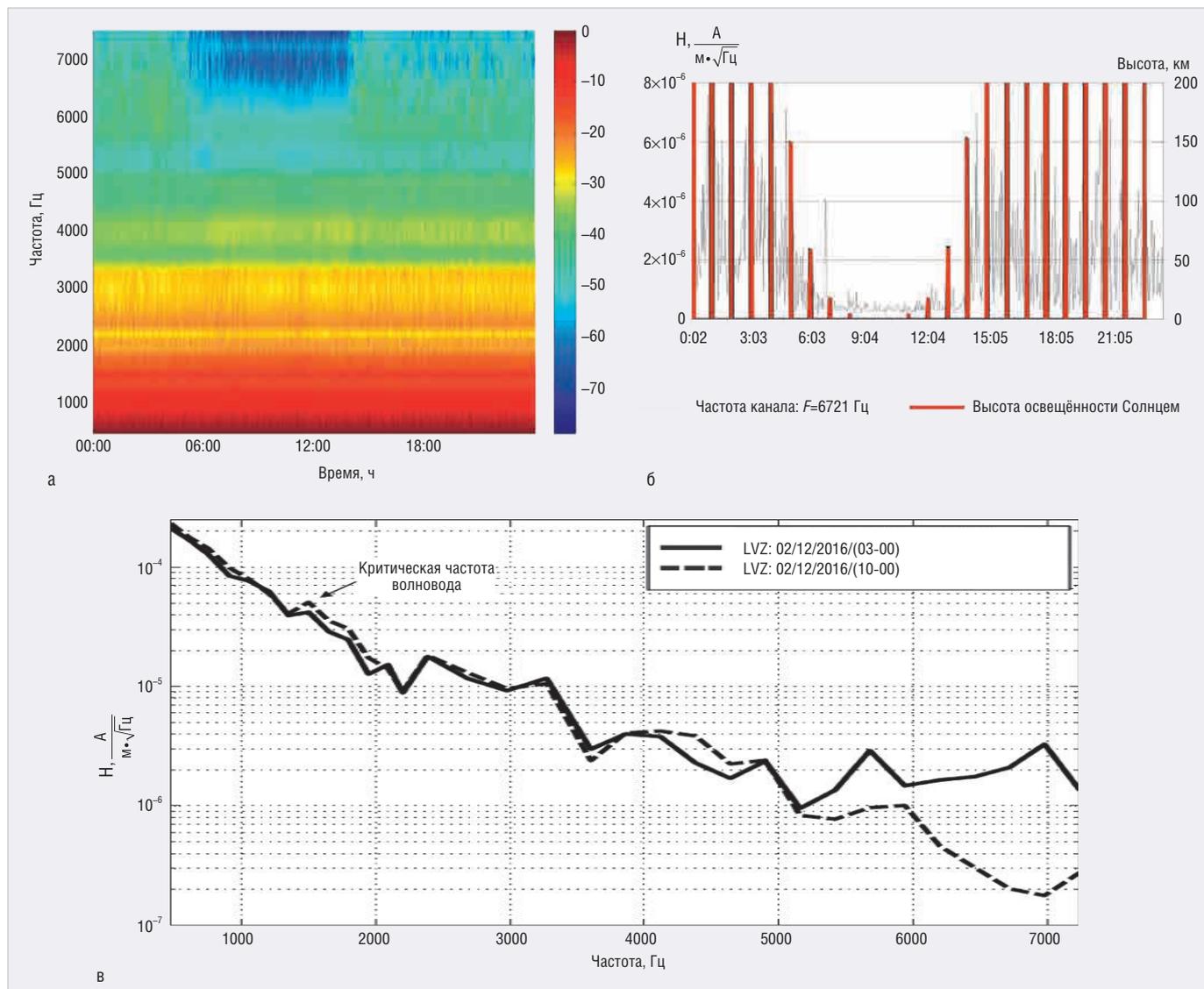


Рис. 2. АЧХ поля атмосфериков при различной освещённости ионосферы Солнцем (обс. Ловозеро, 02.12.2016): а) суточная сонограмма; б) АЧХ в моменты неосвещённой и освещённой ионосферы; в) суточная вариация амплитуды сигнала на частоте $F=6721$ Гц

- загрузка основной конфигурации (Primary Configurations) и динамической реконфигурации (Transition Configurations) в ПАИС через последовательный SPI-порт;
- управление работой устройства через схему прерываний INT0, INT1 и INT2;
- преобразование аналогового сигнала в цифровую форму;
- реализация последовательного выходного порта USART для передачи данных на компьютер.

Примеры АЧХ поля атмосфериков при различных гелиогеофизических условиях

Для иллюстрации технических возможностей как метода исследования волновода Земля – ионосфера, так и анализатора спектра АСПА на рисунках 2–4 представлены АЧХ поля атмосфериков, полученных в обсерваториях

ПГИ Ловозеро и Баренцбург при различных гелиогеофизических условиях.

Суточное изменение освещённости ионосферы Солнцем

На рисунке 2 представлены суточные АЧХ поля атмосфериков, зарегистрированных в обсерватории Ловозеро 02.12.2016 г. В период освещённой ионосферы наблюдаются следующие изменения АЧХ:

- резкое ослабление сигнала ~ 20 дБ в полосе частот $\Delta F=6000-7000$ Гц, что подтверждает известную зависимость напряжённости поля от частоты для дневной модели ионосферы [4];
- увеличение амплитуды сигнала на критической частоте волновода $F_{кр} = 1500$ Гц (см. рис. 2в), что объясняется образованием D-слоя ионосферы;
- ход линии восхода и захода Солнца совпадает с условной огибающей

спектральной составляющей поля атмосфериков на частоте $F=6721$ Гц.

Кратковременное изменение освещённости ионосферы

Для оценки влияния кратковременного изменения освещённости Солнца (единицы минут) на АЧХ поля атмосфериков были использованы экспериментальные данные АСПА, полученные во время солнечного затмения (20.03.2015) на авроральных обсерваториях ПГИ Ловозеро, Мурманская обл. (67,97N; 35,08E) и Баренцбург, Шпицберген (78,08N; 14,22E).

Особенностью данного затмения является то, что оно происходило при освещённой Солнцем ионосфере, уровень затмения составлял 84,25% (Ловозеро) и 100% (Баренцбург). Время наибольшей фазы затмения в Ловозеро от 10 ч 19 мин до 10 ч 35 мин, в Баренцбурге: 10 ч 11 мин – 10 ч 21 мин. Дли-

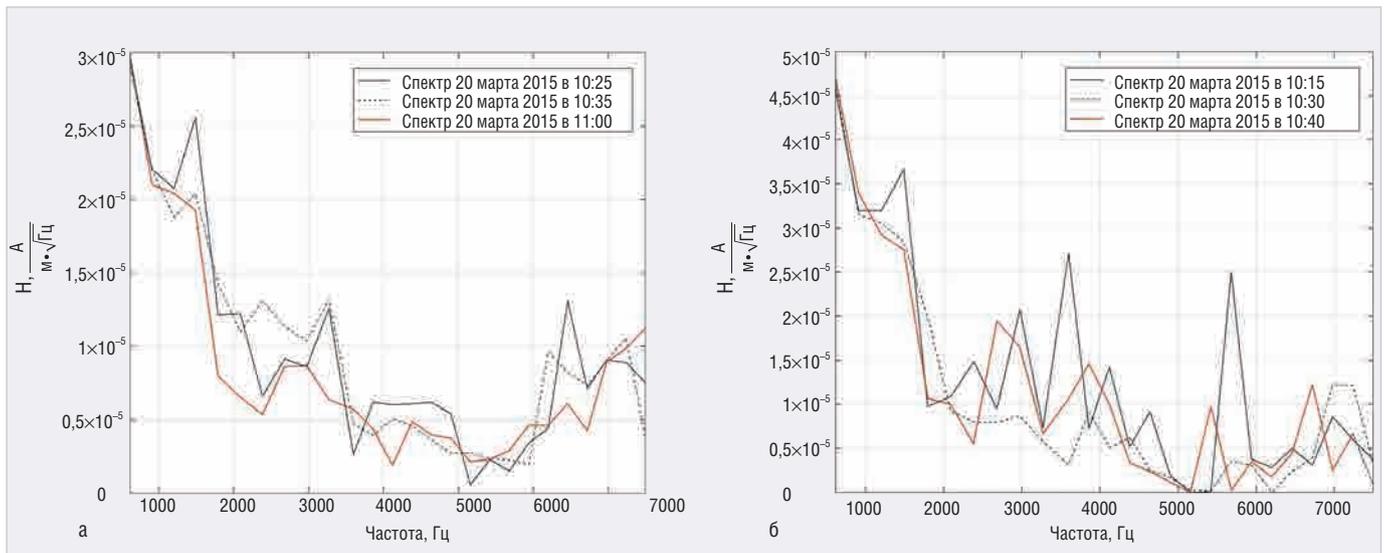


Рис. 3. Усреднённые АЧХ поля атмосфериков в различные фазы затмения 20.03.2015 г.: а) obs. Ловозеро; б) obs. Баренцбург

тельность полного затмения в Баренцбурге составляла 2 мин 30 с.

На рисунке 3 представлены усреднённые (10 мин) АЧХ поля атмосфериков для двух обсерваторий в различные фазы затмения. Во время максимальной фазы затмения наблюдается уменьшение значения критической частоты волновода Земля – ионосфера $F_{кр} \sim 1500$ Гц. После окончания затмения значение критической частоты растёт, что связано с ионизацией ионосферы и появлением D-слоя.

Вариации геомагнитного поля

На рисунке 4 представлена зависимость АЧХ поля атмосфериков от геомагнитных возмущений и времени восхода и захода Солнца. Для анализа характеристик поля атмосфериков были выбраны три смежных дня наблюдений 24–26.10.2017 г. с повышенной активностью геомагнитного поля [12].

Вариации геомагнитного поля (± 500 нТл) в период неосвещённой ионосферы (24.10–25.10) совпали с уменьшением значения критической частоты волновода с величины ~ 1500 Гц до ~ 1300 Гц (см. рис. 4а), и с уменьшением девиации критической частоты на ~ 100 Гц (ночь 25.10 и 26.10).

Приведённые особенности поведения критической волны подтвердили результат, отмеченный авторами в работе [11] о том, что геомагнитное поле существенно влияет на свойства волновода на ночной стороне и почти не влияет на дневной.

Вариации критической частоты волновода Земля – ионосфера

Получение экспериментальным способом значения критической частоты

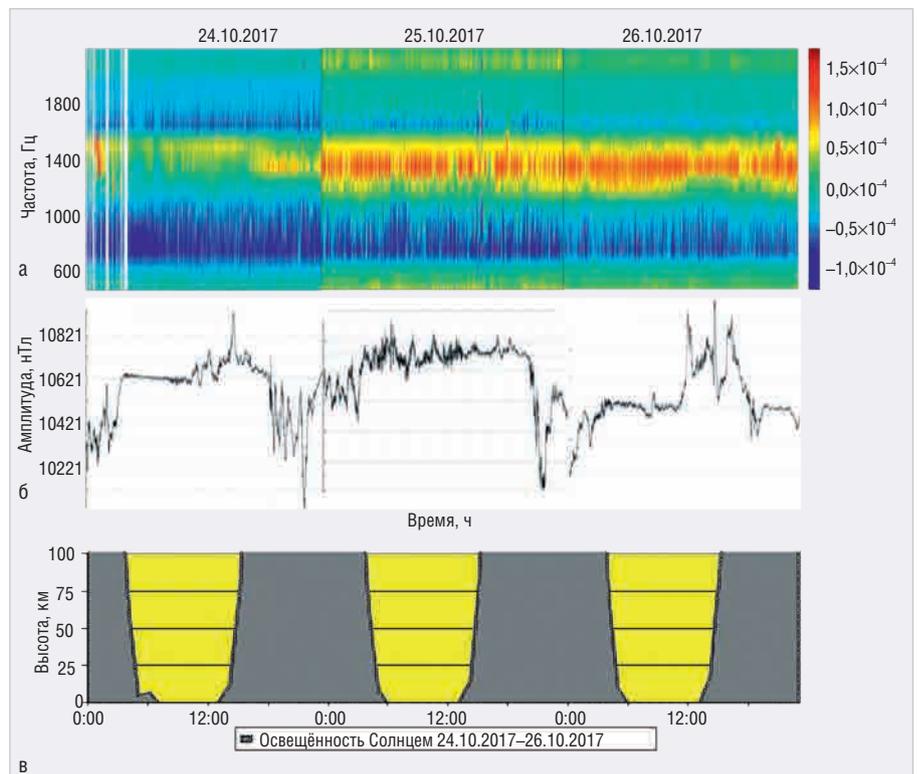


Рис. 4. Зависимость спектра поля атмосфериков от гелиогеофизических условий: а) сонограмма поля атмосфериков ($\Delta F=600\text{--}2200$ Гц, obs. Ловозеро); б) вариации геомагнитного поля Земли; в) линии восхода и захода Солнца

ты волновода Земля – ионосфера значительно облегчает исследователям задачу оптимального выбора модели ионосферы, так как критерием правильности выбора считается совпадение расчётных значений параметров ионосферы с экспериментальными данными. В алгоритм обработки экспериментальных данных входит операция вычитания из поля атмосфериков значения амплитуды прямой волны для каждой спектральной линии. В результате получаем только амплитуды

сигналов, отражённых от ионосферы, что позволяет выделить вариации критической частоты волновода и оценить высоты отражающего слоя ионосферы.

Если использовать простейшую модель волновода Земля – ионосфера (плоский резонатор, α – высота отражающего слоя в километрах), то критическая частота и размеры волновода определяются следующим соотношением [13]:

$$F_{кр} = \frac{c}{2 \times \alpha} = \frac{1}{2 \times \alpha \times \sqrt{\mu_0 \times \epsilon_0}}, \quad (1)$$

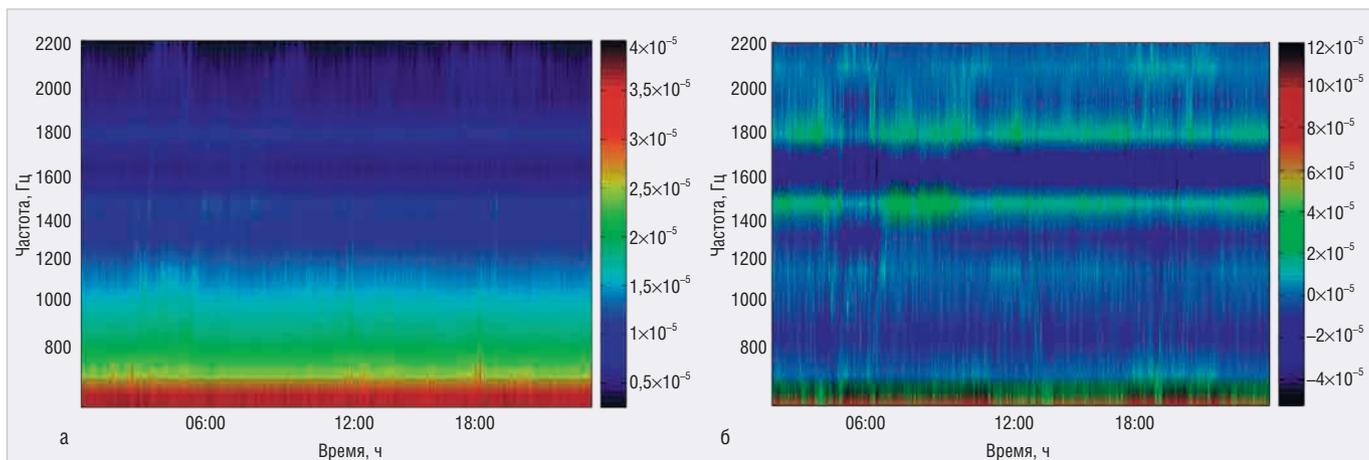


Рис. 5. Сравнительные сонограммы поля атмосфериков: а) полное поле атмосфериков; б) поле с компенсацией прямой волны

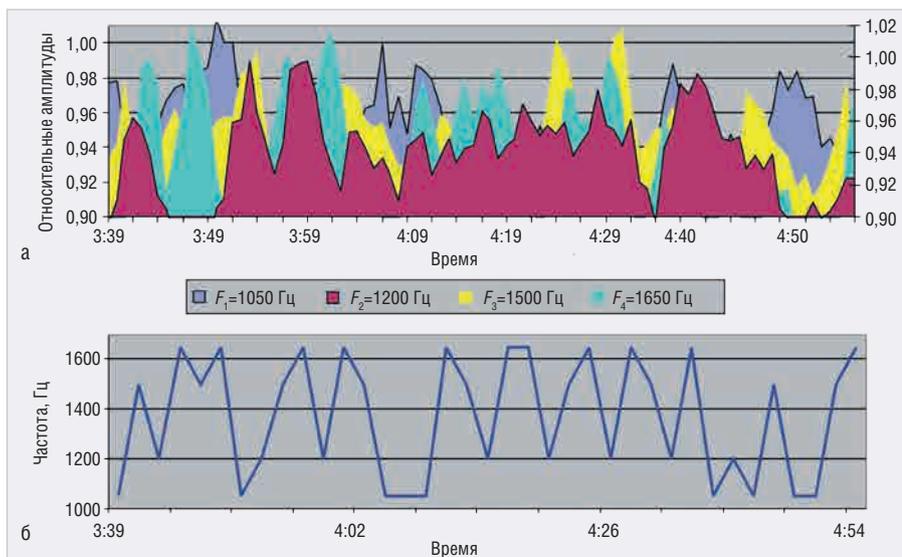


Рис. 6. Вариации критической частоты волновода Земля – ионосфера (обс. Ловозеро, 01.12.2017):

а) вариации спектральных составляющих поля атмосфериков; б) вариации критической частоты волновода

где c – скорость света в вакууме, μ_0 – магнитная постоянная, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Следовательно, в рамках данной модели ионосферы, зная критическую частоту волновода, можно вычислить высоту отражающего слоя, используя формулу (1).

На рисунке 5 показаны суточные сонограммы поля атмосфериков, иллюстрирующие результат операции обработки данных по компенсации прямой волны поля атмосфериков.

Функция обнуления анализирующего фильтра, входящая в алгоритм работы АСПА, позволяет получать тонкую структуру спектра и, следовательно, временные вариации критической частоты волновода.

На рисунке 6а приведён фрагмент зависимости относительных амплитуд ряда спектральных составляющих (1050, 1200, 1500 и 1650 Гц) поля атмосфериков от времени. График зависимости критической частоты волновода (см. рис. 6б) построен при сопоставлении во времени макси-

мальных значений указанных спектральных составляющих поля атмосфериков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт обслуживания анализаторов АСПА, входящих в состав приёмно-измерительной аппаратуры на обсерваториях ПГИ в сезонах наблюдений 2014–2019 гг., показал их высокую надёжность в работе.

Третье поколение ПАИС AN231E04, которое отличается от предыдущего AN221E04 более чем двукратным снижением энергопотребления, расширенным на 20 дБ динамическим диапазоном, а также более низким питающим напряжением 3,3 В, открывает новые перспективы использования их в геофизической аппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. – Л.: Гидрометеоздат, 1982.

2. Ратклифф Дж.А. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. – М.: Мир, 1975. 296 с.
3. Александров М.С., Бакленова З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потапов А.В., Ремизов Л.Т. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. – М.: Наука, 1972. 196 с.
4. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. 563 с.
5. Cummer S.A., Inan U.S., Bell T.F. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics // Radio Sci. № 33. P. 1781. 1998.
6. Datasheet AN221E04: http://www.anadigm.com/_doc/DS030100-U006.pdf.
7. Anadigm Customer Training: http://anadigm.com/_doc/trainingdocument.pdf
8. Яценков В.С. Микроконтроллеры MICROCHIP. Практическое руководство. 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
9. Галахов А.А., Ахметов О.И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля очень низкой частоты. Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136–142.
10. Галахов А.А. Низкочастотные волны и сигналы во внешней ионосфере. Труды 3-го Всесоюзного семинара по ОНЧ-излучениям. Апатиты: КФАН СССР, 1974. С. 133.
11. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля – ионосфера. – Киев.: Наук. думка, 1977. 200 с.
12. [http://www2.irf.se/Observatory/?link\[Mag netometers\]=Data](http://www2.irf.se/Observatory/?link[Mag netometers]=Data).
13. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Советское радио, 1971. 664 с.



НОВОСТИ МИРА

**Международный форум
«Микроэлектроника 2019»**

С 30 сентября по 5 октября 2019 года в городе Алушта (Республика Крым) состоится V Международный форум «Микроэлектроника 2019». Его организаторы: АО «НИИМА «Прогресс», АО «НИИМЭ» и НИУ «МИЭТ». Мероприятие состоится при поддержке Минпромторга России, Союза машиностроителей России, ГК «Ростех», АО «Росэлектроника» и фонда «Сколково».

За четыре года существования форум стал знаковым событием в российской радиоэлектронной отрасли. Независимая авторитетная площадка привлекает всё большее количество участников из России, Белоруссии, Армении, Китая и США. В форуме традиционно принимают участие представители научного сообщества, госструктур, производственных объединений, бизнес-сообщества и инженеры-инноваторы микроэлектронной отрасли. Такой разнообразный состав участников способствует наиболее полному раскрытию темы мероприятия.

В этом году планируется насыщенная деловая программа. Её главная цель – организация прямого диалога между наукой,



бизнесом и государством. Особое внимание будет уделено вопросам развития цифровой экономики в России, формированию нормативно-правовой базы, разработке ЭКБ, развитию производственных мощностей и выпуску готовой продукции. Организатором деловой программы форума выступает Консорциум дизайн-центров и предприятий радиоэлектронной промышленности.

Круглые столы и дискуссии деловой программы будут посвящены производству радиоэлектронных изделий для рынков будущего, Интернету вещей (IoT), новинкам

телекоммуникационного оборудования, вычислительной техники, достижениям в разработке беспилотного транспорта, телемедицинских технологий, систем идентификации личности.

Непосредственное общение бизнес-сообщества с ведущими специалистами и конструкторами, обмен мнениями по прорывным технологиям и их практическому применению послужат развитию отечественного микроэлектронного кластера, снижению импортозависимости и укреплению деловых отношений.

www.microelectronica.pro

www.jtagtechnologies.ru

JTAG
TECHNOLOGIES®

JTAG ProVision – самая совершенная программа для периферийного сканирования на сегодняшний день

Автоматическая генерация тестов

Русскоязычный интерфейс

Скрипты для создания продвинутых тестов

Десятки тысяч готовых моделей ЭКБ

Последовательности для производства

Проверена работа с отечественной ЭКБ, поддерживающей периферийное сканирование !

Представительство JTAG Technologies в России
Телефон: (812) 602-0915
E-mail: russia@jtag.com

Эксклюзивный дистрибьютор: ООО «Остек-Электро»
Телефон: (495) 788-4444
E-mail: info@ostec-group.ru

Реклама