

© Н. А. Барабанов<sup>1</sup>, Л. М. Бандуристый<sup>1</sup>,  
Ю. И. Венедиктов<sup>1</sup>, С. Г. Довгаль<sup>1</sup>, Ю. А. Селиванов<sup>2</sup>,  
О. К. Черемных<sup>2</sup>, В. В. Безруких<sup>3</sup>, Г. Л. Гдалевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПКБ «Дискрет» ОНПУ, Украина, Одеса

<sup>2</sup>Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, Киев

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ В ХОДЕ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КОЛЬЦО» НА БОРТУ МКС

Пропонується методика вимірювань часу прольоту інжектіваних частинок плазми за допомогою приладу «Реґіон» під час активного плазмового космічного експерименту «Кільце», запланованого на МКС у 2008 р.

В 2008 г. на Российском сегменте МКС планируется провести космический эксперимент (КЭ) «Кольцо», целью которого является создание высокочувствительных и помехоустойчивых средств измерений электромагнитных флуктуаций в ионосфере Земли, вызываемых процессами, происходящими в земной коре накануне и во время землетрясений, а также другими катаклизмами естественного и искусственного происхождения [3].

КЭ «Кольцо» является активным экспериментом, т.е. в ходе его проведения осуществляется инъекция в ионосферу Земли ионных пучков и их регистрация на борту МКС с помощью детектора, отнесенного от инжектора на определенное расстояние.

В основе эксперимента «Кольцо» лежит зависимость времени пролета ионов от угла оси инжектора относительно силовых магнитных линий, массы ионов, энергии ионов, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля Земли. В результате, измерив время пролета ионов от инжектора до детектора, можно получить информацию о параметрах магнитного поля Земли вдоль орбиты МКС.

Задачи КЭ «Кольцо»:

- изучение динамики ионных пучков в ионосфере Земли;
- исследование механизмов пучково-плазменного взаимодействия и процессов, протекающих в

космической плазме в ходе активных экспериментов;

- отработка методики определения индукции магнитного поля Земли по данным о времени пролета ионов от инжектора до детектора.

Инъекция ионных пучков при проведении КЭ «Кольцо» будет осуществляться поперек силовых линий магнитного поля Земли. При этом ионы должны двигаться по спиралям вокруг силовых линий в направлении, противоположном вектору индукции магнитного поля, и вращаться против часовой стрелки. Известно, что скорость движения ионов от инжектора до детектора зависит от их массы, энергии, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Измерив время пролета ионов от инжектора до детектора, можно получить информацию о параметрах магнитного поля Земли вдоль орбиты МКС. Это и лежит в основе эксперимента «Кольцо» [2, 4].

В качестве инжектора для КЭ «Кольцо» предполагается использовать импульсный источник ионов ксенона или дейтерия.

Для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов на определенном расстоянии от инжектора и измерения времени пролета ионов от инжектора до детектора предполагается использовать прибор «Реґіон» [1], разрабатываемый СПКБ «Дискрет» ОНПУ (г. Одесса) совместно с ИКИ НАНУ-НКАУ (г. Киев) и ИКИ РАН (г. Москва).

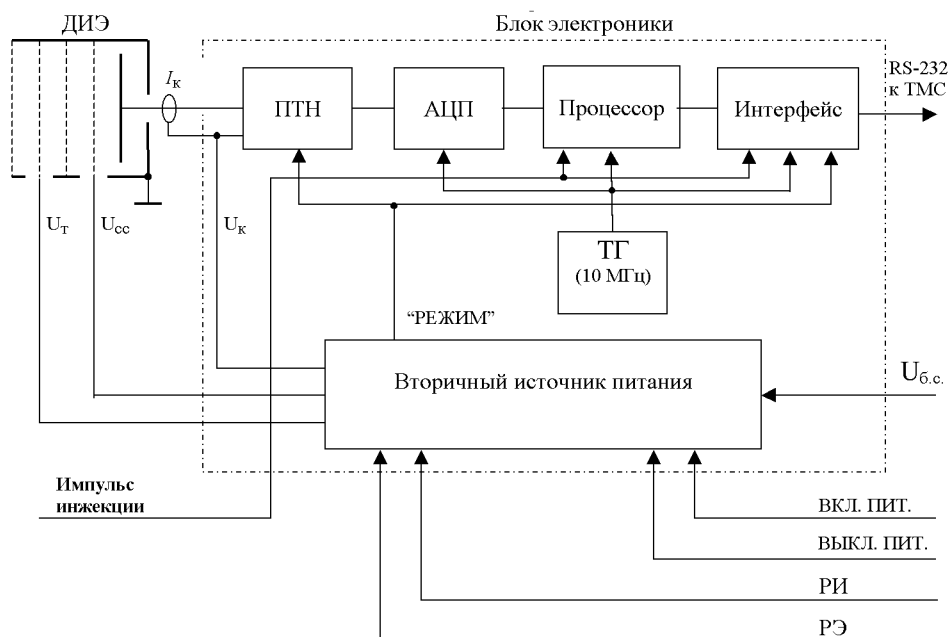


Рис. 1. Структурная схема прибора «Регион»

Кроме регистрации ионов (режим РИ), прибор «Регион» позволяет регистрировать электроны и измерять их время пролета (режим РЭ). Последний режим используется при наземной отработке прибора.

Структурная схема прибора «Регион» приведена на рис. 1. Прибор состоит из детектора ионов и электронов (ДИЭ) и блока электроники (БЭ). ДИЭ предназначен для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов или электронов (в зависимости от режима работы прибора). В качестве ДИЭ предполагается использовать плоский анализатор с тормозящим потенциалом (АТП) или полусферический электростатический анализатор. В качестве детектирующего элемента обоих типов анализаторов используется плоский коллектор, ток которого пропорционален потоку частиц, прошедших через анализатор. В докладе рассматривается вариант прибора с АТП.

БЭ содержит всю электронику прибора и предназначен для:

- питания ДИЭ в зависимости от режима РИ или РЭ;
- измерения амплитуды (максимума) импульса тока частиц на коллектор ДИЭ;
- измерения времени пролета частиц от инжектора до ДИЭ;
- формирования информации об измерениях и выдачи ее на телеметрическую систему (ТМС)

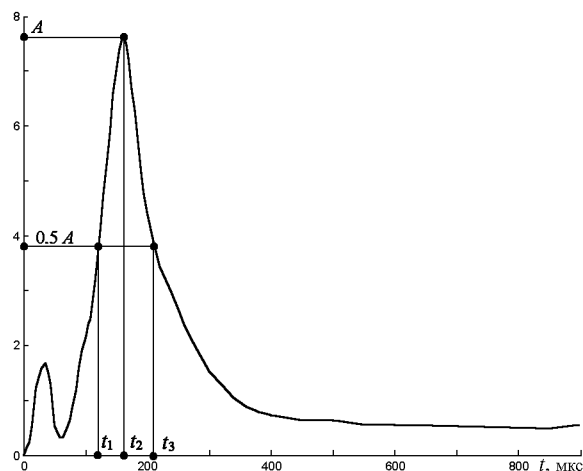


Рис. 2. Импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации электронной компоненты инжектируемой плазмы

через последовательный интерфейс в стандарте RS-232;

- питания собственной электроники.

ДИЭ располагается на наружной поверхности РС МКС, а БЭ — внутри гермоотсека. Расстояние между ДИЭ и БЭ может достигать 10 м.

Принцип измерений, реализуемый в приборе «Регион», поясняется рис. 2, где приведен реальный

импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации инжектируемых частиц (электронов). Нулевой отсчет времени соответствует моменту начала инъекции. Первый (маленький) пик вызван релятивистскими частицами, образующимися при высоковольтном разряде в инжекторе. Второй основной пик вызван инжектируемыми частицами, образующимися в результате ионизации после разряда. Форма основного импульса обусловлена распределением инжектируемых частиц по скоростям: пик импульса соответствует наиболее вероятной скорости движения от инжектора до детектора, а фронты основного импульса вызваны наличием тепловой скорости частиц, распределенной по закону Максвелла. Кроме «теплого» движения частиц, на крутизну фронтов влияет длина пути пролета частиц, зависящая от параметров магнитного поля Земли. Таким образом, время пролета инжектируемых частиц от инжектора до детектора можно определить только как время между пиком импульса на выходе инжектора и пиком основного импульса, принятого ДИЭ. Для получения информации о движении частиц от инжектора до детектора в приборе «Регион» для каждого периода инъекции измеряются следующие параметры основного импульса тока коллектора ДИЭ:

- амплитуда  $A$ ;
- время основного пика  $t_2$  (фактически время пролета частиц);
- отсчеты времени  $t_1$  и  $t_3$ , когда передний и задний фронт импульса пересекают уровень 0.5 от амплитуды  $A$ .

Так как формирование порогового уровня 0.5A для текущего периода инъекции в реальном времени проблематично, то в качестве оценки амплитуды в текущем периоде инъекции используется величина амплитуды, измеренная в предыдущем периоде. Значение искомого порога может отличаться от 0.5A в зависимости от изменения амплитуды импульсов от периода к периоду. Поэтому результат измерений для текущего периода инъекции дополняется амплитудой импульса в предыдущем периоде.

Момент начала отсчета временных интервалов импульса в приборе «Регион» задается логическим импульсом инъекции, поступающим с блока питания инжектора. Этот импульс формируется из сигнала контрольного детектора, установленного на выходе инжектора.

ДИЭ представляет собой плоский анализатор с тормозящим потенциалом (АТП), обычно используемый для измерения параметров ионосферной плазмы. Например, аналогичный АТП использовался в комплексе «Альфа-3» на борту аврорально-

го и хвостового зондов проекта «Интербол».

Конструктивно ДИЭ напоминает электронную лампу без накала и катода, и состоит из металлического цилиндрического корпуса, в котором смонтированы система из четырех сеток и плоский коллектор. Первая и третья сетки экранирующие. Они соединены с корпусом ДИЭ. Вторая сетка называется тормозящей. Она позволяет производить отсечку частиц по энергии. Четвертая сетка, расположенная перед коллектором называется супрессорной. Она предназначена для подавления фото- и вторичной электронной эмиссии с коллектора. Ток коллектора определяется потоком частиц, прошедших систему сеток. В зависимости от знака и величины напряжений на электродах, ДИЭ регистрирует ионы или электроны (см. табл. 1).

Высокое напряжение 180 В тормозящей сетки ДИЭ обеспечивает отсечку фоновых частиц окружающей ионосферной плазмы. Отрицательное смещение -30 В супрессорной сетки относительно коллектора обеспечивает подавление фототока и тока вторичной электронной эмиссии с коллектора.

Конструктивно БЭ выполнен в виде прямоугольного алюминиевого блока, внутри которого установлены печатные платы с электроникой. На передней панели блока расположены разъемы для подключения ДИЭ, питания, телеметрии и управления.

Функционально БЭ состоит из:

- преобразователя «ток — напряжение» (ПТН);
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- процессора;
- интерфейса;
- тактового генератора (ТГ) на 10М Гц;
- вторичного источника питания (ВИП);

ПТН преобразует импульсы тока коллектора ДИЭ в импульсы напряжения. Коэффициент передачи ПТН изменяется в зависимости от режима работы. При измерении импульсов тока инжектируемых ионов коэффициент передачи ПТН равен -20 кВ/А. При регистрации импульсов электронов коэффициент передачи ПТН равен -500 В/А.

Следует отметить, что ПТН выполнен на базе

Таблица 1. Напряжение на электродах ДИЭ относительно корпуса МКС

Напряжение	Значение напряжения, В		
	ионы	электроны	
Тормозящей сетки	$U_T$	+180	-180
Супрессорной сетки	$U_{CC}$	-40	+10
Коллектора	$U_K$	-10	+40
Корпуса и экранирующих сеток	$\perp$	0	0

быстродействующего операционного усилителя (ОУ) типа AD811 (Analog Devices) с обратной связью (ОС) по току. Этот усилитель имеет низкое входное сопротивление (десятки Ом), шунтирующее емкость входной цепи ПТН, что существенно уменьшает отрицательное влияние этой емкости на частотные и шумовые свойства ПТН. Это позволяет соединять коллектор ДИЭ с блоком электроники (БЭ) с помощью кабеля длиной до 10 м, без существенного ухудшения качества сигнала в сравнении с непосредственным соединением коллектора ДИЭ с входом усилителя. В результате становится возможным размещение БЭ внутри гермоотсека РС МКС. При этом на поверхности МКС размещается только ДИЭ, не содержащий электроники.

ОУ ПТН имеет плавающее двуполярное питание, на общий провод которого (он же общий провод ПТН) подается напряжение  $U_k$  относительно общего провода (корпуса) БЭ, электрически соединенного с корпусом ДИЭ и корпусом МКС. Это позволяет задавать необходимое напряжение на коллекторе ДИЭ в зависимости от режима работы прибора путем переключения  $U_k$ .

АЦП осуществляет оцифровку импульса напряжения ПТН с частотой преобразования 10МГц, задаваемой тактовым генератором ТГ. В качестве АЦП используется быстродействующий 12-разрядный АЦП AD9220 (Analog Devices).

Процессор производит обработку выходного сигнала АЦП, обеспечивая для каждого периода импульса инжекции:

- измерение амплитуды (максимума) импульса тока коллектора;
- фиксацию амплитуды импульса тока коллектора, измеренную в предыдущем периоде;
- измерение интервала времени между импульсом инжекции и максимумом (пиком) импульса тока коллектора (время пролета ионов и электронов);
- измерение интервалов времени между импульсом инжекции и моментами, когда фронты импульса тока коллектора пересекают уровень 0.5 амплитуды в предыдущем периоде.

Запуск процесса обработки происходит при поступлении импульса инжекции и тактируется от ТГ.

Структурная схема процессора приведена на рис. 3. В состав процессора входят:

- три 12-разрядных регистра РГ1...РГ3;
- 16-разрядный счетчик СЧ;
- два компаратора К1 и К2;
- детектор изменений ДИ;
- три 16-разрядных регистра РГ4...РГ6.

Счетчик СЧ осуществляет подсчет импульсов ТГ

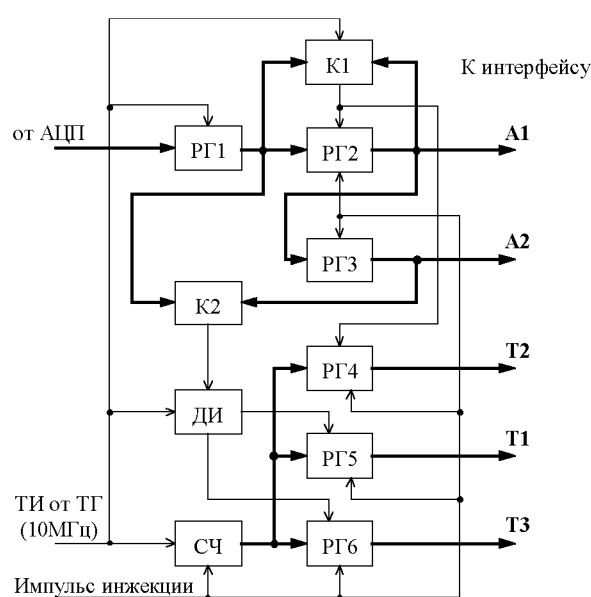


Рис. 3. Структурная схема процессора прибора «Регион»

внутри периода инжекции. Этот счетчик обнуляется в момент прихода импульса инжекции. Таким образом, СЧ является источником временных интервалов.

РГ1 фиксирует выходной код АЦП по заднему фронту импульсов ТГ.

РГ2 и К1 образуют детектор пика (максимума) импульса тока коллектора ДИЭ. РГ2 осуществляет фиксацию максимума выходного кода РГ1. При поступлении импульса инжекции РГ2 обнуляется. К1 сравнивает код РГ1 и РГ2. Если код РГ1 больше кода РГ2, то К1 вырабатывает импульс записи в РГ2 кода из РГ1. В результате после пика тока коллектора в РГ2 фиксируется код А1 амплитуды регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции. При поступлении очередного импульса инжекции код с РГ2 переписывается в РГ3 и

Таблица 2. Структура телеметрического кадра прибора «Регион»

№ посылки	Наименование данных
1	Маркер начала кадра и режим работы
2...4	Код амплитуды А1
5...7	Код амплитуды А2
8...11	Код временного интервала Т1
12...15	Код временного интервала Т2
16...19	Код временного интервала Т3

Таблица 3. Основные параметры прибора «Регион»

Эффективная площадь коллектора детектора	11 см <sup>2</sup>
Ширина диаграммы направленности детектора	±70°
Амплитуда регистрируемых импульсов тока ионов	0.1—100 мкА
Амплитуда регистрируемых импульсов тока электронов	0.01—10 мА
Энергия отсечки фоновых ионов и электронов	180 эВ
Диапазон измерения временных интервалов (времени пика импульсов, времени начала и конца импульсов по уровню 0.5 амплитуды)	0—6.55 мс
Дискретность измерения временных интервалов	0.1 мкс
Допустимый период повторения инжектируемых импульсов	8...1000 мс
Допустимая амплитуда логического импульса инжекции	2.4—5 В
Информативность измерений	72 бит/период
Максимальная скорость выдачи информации через интерфейс RS-232	19.2 кбит/с
Количество «релейных» команд управления	4
Напряжение питания	23—30 В
Потребляемая мощность, не более	5 Вт
Габаритные размеры БЭ, не более	168×104×98 мм
Масса БЭ, не более	0.85 кг
Габаритные размеры ДИЭ	D85×60 мм
Масса ДИЭ, не более	0.15 кг

Примечание: Габаритные размеры и масса БЭ и ДИЭ указаны без учета кабелей и элементов крепления

храниться в нем в течение следующего периода, как код А2 амплитуды в предыдущем периоде. В момент, когда К1 вырабатывает импульс фиксации максимума в РГ2, происходит запись кода СЧ в РГ4. В результате после пика тока коллектора в РГ4 фиксируется код Т2 времени максимума регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции. Это является результатом измерения времени пролета частиц. Компаратор К2 сравнивает текущий код РГ1 с кодом старших 11-разрядов на выходе РГ3 (порог 0.5 амплитуды импульса в предыдущем периоде). Когда код РГ1 превышает вышеуказанный порог, К1 формирует логический импульс, по фронту и спаду которого детектор ДИ вырабатывает импульсы записи кода счетчика в РГ5 (фронт) и РГ6 (спад). В результате в РГ5 и РГ6 фиксируются коды Т1 и Т3, соответствующие временным интервалам, когда фронт и спад импульса регистрируемых частиц пересекает уровень 0.5 амплитуды импульса тока коллектора ДИЭ в предыдущем периоде инжекции. При поступлении очередного импульса инжекции информация с регистров РГ2...РГ6 переписывается в интерфейс, а затем указанные регистры обнуляются (кроме РГ3).

Интерфейс реализует последовательную асинхронную выдачу информации прибора «Регион» на телеметрическую систему (ТМС) согласно стандарту RS-232. Он преобразует параллельные коды А1, А2, Т1, Т2, Т3, выдаваемые процессором в конце каждого периода инжекции, в телеметрический кадр из последовательности одиночных посылок. Каждая такая посылка состоит из: «старт-бита»,

5-8 бит данных, бита контроля и 1-2 «стоп-битов». Скорость передачи, количество посылок в кадре, число бит данных в посылке, наличие или отсутствие бита контроля и число «стоп-битов» определяются согласованным протоколом обмена. Если каждая посылка передает 4 бита исходных данных, то телеметрический кадр может состоять из 19 посылок, согласно табл. 2.

Интерфейс обеспечивает согласование скорости измерений и скорости выдачи данных на телеметрию. Если скорости передачи данных недостаточно для передачи информации об измерениях в каждом периоде инжекции, то происходит пропуск данных отдельных периодов. Работа интерфейса и процессора синхронизируется импульсом инжекции и тактовыми импульсами. Скорость обмена с телеметрией определяется внутренним отдельным генератором. Физически процессор и интерфейс реализуется на базе программируемой логической матрицы фирмы ALTERA, что существенно упрощает реализацию и отладку прибора в целом.

ВИП преобразует напряжение бортовой сети в ряд напряжений питания устройств БЭ и электродов ДИЭ. ВИП представляет собой изолирующий конвертор напряжения, обеспечивающий гальваническую развязку бортовой сети от корпуса БЭ.

Управление прибором «Регион» осуществляется с помощью релейных команд, подаваемых на ВИП. Это команды:

- ВКЛ. ПИТ — включение питания;
- ВЫКЛ. ПИТ — выключение питания;
- РИ — выбор режима регистрации ионов;

РЭ — выбор режима регистрации электронов. Суммарные параметры прибора «Регион» приведены в табл. 3.

В зависимости от выбранного с помощью команд РИ или РЭ режима работы, осуществляется переключение напряжений на электродах ДИЭ и вырабатывается сигнал «Режим», управляющий переключением коэффициента передачи ПТН.

В заключение отметим технические решения, обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики прибора «Регион»:

Применение в ПТН усилителя с токовой обратной связью дает возможность существенно (до 10 м) удалить ДИЭ от БЭ. Это позволяет разместить БЭ в гермоотсеке модуля МКС и тем самым обеспечить более благоприятные условия эксплуатации для электроники прибора.

Применение высокоскоростного АЦП и ПЛМ позволяет реализовать полностью цифровую обработку сигнала ДИЭ. В результате повышается стабильность параметров прибора, уменьшается объем аппаратуры, упрощается настройка и отработка прибора.

Применение последовательного интерфейса выдачи данных в стандарте RS-232 дает возможность подключать прибор вместо ТМС к СОМ-порту персональных компьютеров, что весьма удобно в процессе отработки прибора.

1. Барабанов Н. А., Венедиктов Ю. И., Гдалевич Г. Л. и др. «Блок детектора импульсов для космического эксперимента «КОЛЬЦО» на борту МКС» // Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тр. — Киев: АДЕФ-Украина, 2001.—С. 36—39.
2. Безруких В. В., Барабанов Н. А., Венедиктов Ю. И. и др. Исследование малознергичной плазмы в магнитосфере Земли на Хвостовом и Авроральном Зондах. Аппаратура и предварительные результаты // Космич. исслед.—1998.—36, вып. 1, января-февраля 1998.
3. Гримальский В. В., Ивченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 21—30.
4. Черемных О. К., Голобородько В. Я., Резник С. Н. Численное моделирование распределения протонов в магнитосфере Земли на малых высотах // Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тр. — Киев: АДЕФ-Украина, 2001.—С. 146—150.

#### INJECTED PARTICLE TIME-OF-FLIGHT MEASUREMENTS DURING THE SPACE EXPERIMENT ABOARD THE ISS

N. A. Barabanov, L. M. Banduristiy, Yu. I. Venediktov, S. G. Dovgal, Yu. A. Selivanov, O. K. Cheremnykh, V. V. Bezrukih, G. L. Gdalevich

We propose a procedure for time-of-flight measurements of injected plasma particles. The procedure is based on the use of the *Region* device during the active space plasma experiment *Ring* aboard the International Space Station in 2008.