
300 лет Санкт-Петербургу
Материалы XXXII конференции СПбГИТМО(ТУ)

УДК 681.785.55: 629.7 + 523.98

© С. В. Авакян, И. М. Афанасьев, В. Г. Богданов,
В. С. Борткевич, А. С. Быстров, Н. А. Воронин

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ФОРМИРОВАНИИ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ТРАКТА В ПРИБОРАХ КОСМИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ПАТРУЛЯ

На примере электронного тракта рентгеновского спектрометра ($\Delta\lambda = 1.8\text{--}63$ нм) Космического солнечного патруля (КСП) ионизирующего излучения Солнца рассматриваются изменения, затронувшие каналы регистрации аппаратуры КСП, произведенные в целях повышения чувствительности, увеличения динамического диапазона регистрации и обеспечения надежности работы радиоэлектронных узлов для условий будущей космической эксплуатации приборов на российском сегменте Международной космической станции.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НАЗНАЧЕНИИ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ АППАРАТУРЫ КСП

Научная аппаратура Космического солнечного патруля (КСП) предназначена для реализации методологии постоянного контроля вариаций потока ионизирующего излучения от Солнца в области $\Delta\lambda = 0.14\text{--}157$ нм, т. е. в той части солнечного излучения, которая полностью поглощается в верхней атмосфере Земли и может исследоваться только с космических аппаратов (КА). Методология патрульных измерений КСП заключается в одновременном использовании ультрафиолетового и рентгеновского спектрометров и радиометра, а также в применении особого алгоритма выделения сигналов от излучения и заряженных частиц, выпадающих из радиационных поясов [1, 2]. В 1998–1999 гг. в ГОИ им. С.И. Вавилова были созданы два космических прибора КСП для выполнения мониторинга этих вариаций: УФ-спектрометр ($\Delta\lambda = 57\text{--}156$ нм) и радиометр ($\Delta\lambda = 0.14\text{--}157$ нм) [3, 4]. Эти приборы прошли лабораторные калибровочные испытания на источниках УФ и рентгеновского излучения как в вакуумных камерах ГОИ, так и в ESTEC [3, 5]. В 2001–2003 гг. в ГОИ был изготовлен рентгеновский спектрометр ($\Delta\lambda = 1.8\text{--}63$ нм), предназначенный для измерения спектрального состава ионизирующего излучения от Солнца и имеющий четыре перекрывающихся канала регистрации: два основных ($\Delta\lambda_1 = 1.8\text{--}23$ нм; $\Delta\lambda_2 = 22\text{--}63$ нм) и два экспериментальных ($\Delta\lambda_3 = 62\text{--}123$ нм; $\Delta\lambda_4 = 119\text{--}198$ нм). Оптическая схема и конструктивные особенности рентгеновского спектрометра (РС) подробно излагаются в [6].

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОЙ ЧАСТИ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО КАНАЛА ПРИБОРОВ КСП

Рентгеновский спектрометр (РС) является последним из комплекса приборов, требуемых для реализации аппаратного состава постоянного патруля солнечной ионизирующей радиации. Поэтому при его разработке использовались подходы и принципы, ставшие характерными для всех изготовленных приборов аппаратуры КСП:

— Электронные узлы всех регистрирующих каналов идентичны.

— Регистрация излучения в каждом канале осуществляется в режиме счета фотонов, имеющем ряд преимуществ при измерении слабых потоков излучения (до единиц квантов в секунду) перед методом измерения среднего анодного тока [4].

— Блочный состав регистрирующего канала прибора КСП неизменен (рис. 1): фотоприемное устройство, предусилитель, измеритель скорости счета (ИСС), осуществляющий преобразование частоты в напряжение, передаваемое в телеметрическую систему КА. Каждое из перечисленных устройств снабжено собственным источником питания.

— Каждый канал регистрации функционирует независимо от другого канала. Выход из строя любого электронного узла регистрирующего канала приведет к отказу данного канала, но не повлияет на работоспособность других каналов и прибора в целом.

— Для многоканальных спектрофотометрических приборов КСП предусмотрено методологическое дублирование измерений: все спектральные интервалы каналов перекрываются в наиболее интенсивных и важных линиях солнечного спектра.

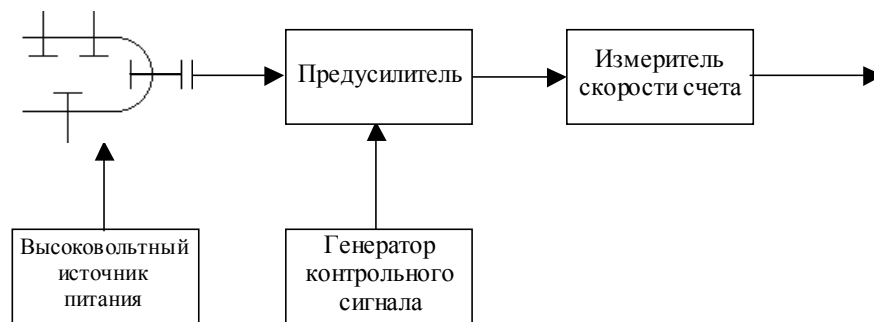


Рис. 1. Блок-схема регистрирующего канала аппаратуры КСП

Так что выход из строя любого канала не приведет к полной потере измеряемой этим каналом информации.

— Для контроля работоспособности всех каналов регистрации КСП применяется генератор контрольного сигнала (рис. 1), выдающий одновременно на входы предусилителей всех каналов сигнал, имитирующий последовательность импульсов с фотоприемника.

— В качестве фотоприемника для трех каналов РС используется изготовленный в ГОИ для КСП вторично-электронный умножитель (ВЭУ) открытого типа, обладающий высокой чувствительностью к излучению в области спектра $\lambda < 160$ нм и солнечной слепотой к излучению выше 160 нм [3, 7]. Для четвертого канала РС используется ФЭУ-142.

Работа электронного тракта регистрирующего канала, а также основные характеристики электронных узлов аппаратуры подробно излагаются в публикации [4], в которой также приводятся некоторые недостатки существовавшей ранее измерительной системы (недостаточно большой динамический диапазон регистрации ИСС для задач КСП, температурная нестабильность элементов системы и др.). Позже был произведен анализ факторов, ограничивающих динамический диапазон в приборах УФ-спектрометра и радиометра [8]. Решение этих проблем послужило началом работы по модернизации электронного тракта. Схемы и конструктивные параметры электронных узлов КСП были изменены с целью повышения надежности, температурной стабильности, электрической прочности. При этом схемы ИСС и генератора контрольного сигнала были переделаны полностью; в схемы высоковольтных источников питания фотоприемников внесены значительные изменения.

НОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ СЧЕТА (ИСС)

Переход к новой плате ИСС связан: 1) с необходимостью расширения динамического диапазона регистрации излучения каждым каналом: от единиц герц (что соответствует слабым потокам от спокойного Солнца) до мегагерцовых последовательностей импульсов с фотоприемника (при измерении интенсивных потоков в период солнечных вспышек); 2) с необходимостью увеличения точности в измерении частоты следования импульсов с фотоприемника (а следовательно, и точности регистрации интенсивности входных потоков излучения). Новая плата измерителя представляет собой двухканальный линейный логарифмический преобразователь частоты в напряжение: один канал для измерения низкочастотного (НЧ) сигнала (4 Гц–6 кГц), другой — для высокочастотного (ВЧ) сигнала (300 Гц–2.2 МГц). При этом достигнута максимальная ошибка измерения частоты $\Delta f_{\text{НЧ}}(\Delta U) \leq 7\%$ для НЧ-канала и $\Delta f_{\text{ВЧ}}(\Delta U) \leq 5\%$ для ВЧ-канала. Подробности о мотивах перехода к новой схеме, характеристиках, структуре и принципах работы новой ИСС излагаются в работе [9].

ГЕНЕРАТОР КОНТРОЛЬНОГО СИГНАЛА (ГКС)

ГКС предназначен для проверки работоспособности измерительных электронных трактов РС, а также для получения контрольных калибровочных отметок в спектре измеренного сигнала. Разработанный генератор выдает на вход предусилителя каждого канала РС две последовательности импульсов с частотами 400 Гц и 20 кГц для про-

верки соответственно НЧ- и ВЧ-каналов измерителя (данные частоты соответствуют середине шкалы вольт-импульсной характеристики измерителя [9]). Таким образом, одновременно тестируются все четыре канала регистрации РС, и проверка работоспособности каждого канала происходит путем съема с НЧ- и ВЧ-каналов ИСС постоянных напряжений, строго соответствующих калибровочным частотам ГКС. Включение ГКС происходит от датчика "конца спектра" — оптопары, срабатывающей в тот момент, когда поворотная кулиса РС с установленными на ней фотоприемниками закончит прохождение угла сканирования 6.41° [6] и окажется в "нерабочей" зоне снимаемого спектра (т. к. фотоприемники в этом положении прикрыты шторкой от потока отраженного решеткой излучения). Таким образом, калибровочная отметка от ГКС не будет складываться с измеряемым сигналом от источника излучения, так что контрольный сигнал (КС) может использоваться для контроля чувствительности канала регистрации.

При разработке ГКС были учтены следующие основные требования.

— ГКС должен быть согласован с нагрузкой из четырех предусилителей, а значит, мощности контрольного сигнала должно хватать для срабатывания всех предусилителей.

— ГКС должен запускаться сигналом с фотодиода оптопары (датчика "конца спектра").

— Должна быть предусмотрена регулировка периодичности выдачи КС — или через каждый

цикл измерения спектра (кулиса с фотоприемниками совершила полный ход туда и обратно), или один раз в несколько циклов измерения спектров (чтобы не затруднять обработку отснятого прибором спектра при наличии большого объема измеренной информации).

— Строб КС должен состоять из импульсов длительностью $\sim 50\text{--}100$ нс, амплитудой ~ 5 В.

— Длительность стоба КС из соображений надежности фиксации КС телеметрическими датчиками и удобства последующей обработки спектра должна составлять ~ 1.5 с (поскольку скорость опроса телеметрического канала КА составляет $\sim 0.8\text{--}50$ Гц [10], а постоянная времени НЧ-канала ИСС $\tau = 0.3$ с [9]).

— Структура стоба КС: первую секунду следуют импульсы с частотой ~ 400 Гц (для проверки НЧ-канала ИСС), оставшиеся 0.5 с — с частотой ~ 20 кГц (для проверки ВЧ-канала ИСС); причем частота импульсов в НЧ- и ВЧ- стобах КС должна быть стабилизирована.

Исходя из предъявленных требований была выбрана схема кварцевого генератора на две частоты. Структура такого генератора (без цепей питания) приведена на рис. 2. Формирователь запускающего импульса из сигнала датчика "конца спектра" формирует четкий прямоугольный импульс, поступающий на счетчик (делитель запускающих импульсов). В зависимости от того, после какого цикла спектра требуется выдавать КС, выбирается соответствующий сигнальный вывод делителя на ждущий мультивибратор (ЖМ) длительности НЧ-стоба. Исходя из предъявленных требований была выбрана схема кварцевого генератора на две частоты. Структура такого генератора (без цепей питания) приведена на рис. 2. Формирователь запускающего импульса из сигнала датчика "конца спектра" формирует четкий прямоугольный импульс, поступающий на счетчик (делитель запускающих импульсов). В зависимости от того, после какого цикла спектра требуется выдавать КС, выбирается соответствующий сигнальный вывод делителя на ждущий мультивибратор (ЖМ) длительности НЧ-стоба.

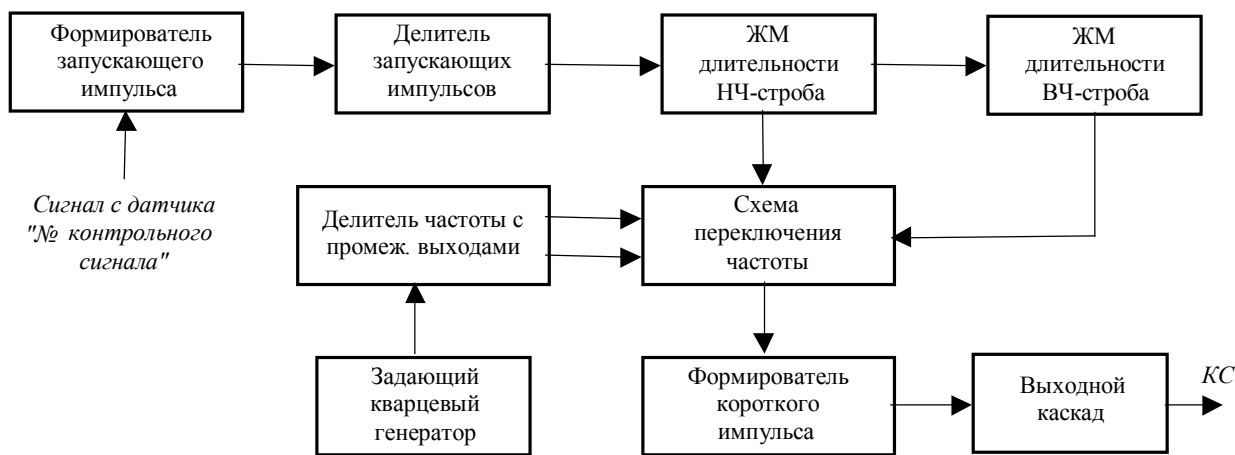


Рис. 2. Блок-схема калибровочного ГКС

Мультивибраторы работают последовательно: первым запускается ЖМ длительности НЧ-строба (импульсом с выхода делителя запускающих импульсов), по окончании первого строба запускается второй ЖМ (ВЧ-строба). Длительности стробов — 1 с и 0.5 с соответственно. Мультивибраторы собраны на логических элементах 2И-НЕ, схемы которых различаются номиналами RC-цепочек. Подбор длительности строба КС осуществляется изменением емкости электролитического конденсатора (грубо) или подбором номинала резистора (точно) в этих цепочках. Импульсы от ждущих мультивибраторов управляют работой схемы переключения частоты. Формирователь короткого импульса выдает импульсы амплитудой 5 В и длительностью ~50–100 нс (что соответствует времени задержки на срабатывание микросхемы ТТЛ-технологии), которыми заполняются НЧ- и ВЧ-стробы КС. В качестве выходного каскада в ГКС используется эмиттерный повторитель, осуществляющий согласование выхода генератора со входами предусилителей. Задающим элементом в ГКС является кварцевый резонатор на частоту 32 768 Гц, при этом задающий кварцевый генератор собран на одном инвертирующем логическом элементе 2И-НЕ.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Высоковольтный преобразователь (ВВП) предназначен для питания фотоприемника (ВЭУ или ФЭУ) и представляет собой двухтактный преобразователь постоянного напряжения бортовой КА в постоянное регулируемое напряжение в несколько киловольт.

При разработке ВВП были учтены следующие основные требования.

— Питание каждого фотоприемного устройства РС осуществляется от собственного ВВП, функционирующего независимо от других источников высокого напряжения.

— ВВП питается постоянным напряжением бортовой сети КА (которое может изменяться в пределах 23–29 В [10]); при этом потребление каждого ВВП не должно превышать 5 Вт.

— ВВП, питающий ВЭУ, должен вырабатывать постоянное напряжение, регулируемое в диапазоне (2.5–4.5) кВ; ВВП для ФЭУ — регулируемое напряжение (1.8–2.4) кВ.

— ВВП должен обеспечивать плавный рост напряжения в момент подачи питания на фотоприемник (во избежание пробоя входных каскадов предусилителя в результате броска питающего напряжения в момент включения ВЭУ).

Некоторые аспекты построения ВВП

Требование к диапазону регулировки питающего напряжения ВЭУ в два киловольта выдвинуто ввиду большой протяженности плато реальной счетной характеристики ВЭУ, которое варьируется в диапазоне 2.5–4 кВ в зависимости от образца ВЭУ [7]. Известно, что выбор режима питания фотоприемника на плато счетной характеристики соответствует регистрации всех электронов с фотокатода [3, 7]. С другой стороны, регулировка высокого напряжения позволяет выбирать оптимальный режим работы фотоприемника (путем подбора требуемого коэффициента усиления), что необходимо как для подстройки чувствительности тракта при регистрации слабых потоков излучения, так и при замене одного ВЭУ другим (что позволяет устранить влияние технологического разброса параметров различных ВЭУ на точность регистрации излучения). В работе [4] указывается, что для регистрации излучения с помощью ВЭУ вовсе не требуется столь громадный коэффициент усиления, который данный фотоприемник способен дать (до 10^8 [7]). Более того, для решения задачи расширения динамического диапазона регистрации путем увеличения верхней границы диапазона счета n_{MAX} , согласно [8], требуется уменьшить коэффициент усиления умножителя до $6 \cdot 10^6$ и ниже (посредством регулировки питающего напряжения фотоприемника) вследствие существующего ограничения на анодный ток делителя $I_{\text{A MAX}} \leq 1 \text{ мкА}$ [4]. Таким образом, при измерениях с помощью ВЭУ интенсивных потоков излучения наибольший интерес представляет именно начальный участок плато счетной характеристики (от 2.5 кВ и выше). Однако диапазон регулировки предыдущего варианта ВВП в УФ-спектрометре составлял только 3.5–4.5 кВ, поэтому потребовался новый ВВП с расширенным регулируемым диапазоном.

Структура ВВП

Низковольтная часть ВВП содержит: генератор тактовых импульсов с частотой 40 кГц; счетный триггер, преобразующий тактовые импульсы в меандр с частотой 20 кГц (являющейся рабочей частотой преобразователя); схему обратной связи; предварительный усилитель, а также параметрический стабилизатор. Схема обратной связи, собранная на микросхемах инверторов и диодно-резистивном делителе, позволяет выравнивать длительности импульсов, а также формировать паузы на фронтах переключения силовых транзисторов, что позволяет исключить сквозные токи (таким образом, пока не закроется ранее работавший

транзистор, транзистор другого плеча делителя не откроется). Параметрический стабилизатор осуществляет питание микросхем ВВП.

Силовая часть преобразователя состоит из силовых транзисторов, повышающего трансформатора, транзисторного стабилизатора, умножителя напряжения и фильтра питания. Транзисторный стабилизатор предназначен для питания силовой части преобразователя, обеспечивая его стабильным независимым напряжением (тем самым исключая колебания напряжения в борсети в диапазоне 23–29 В). Трансформатор выполнен на ферритовом кольце, позволяющем иметь тактовую рабочую частоту в 40 кГц, а значит уменьшить габариты и энергопотребление изделия. Переменное напряжение с трансформатора (для питания ВВП оно составляет 750 В) преобразуется в постоянное высокое напряжение 2.5–4.5 кВ блоком умножителя напряжения. Регулировка в диапазоне 2.5–4.5 кВ осуществляется с помощью потенциометра входного питающего напряжения ВВП. Для предотвращения скачка высокого напряжения при включении применена интегрирующая цепочка, обеспечивающая плавное нарастание высокого напряжения в течение одной секунды.

Таким образом, принципиальные схемы ВВП различных типов фотоприемников (ФЭУ и ВЭУ) оказываются абсолютно идентичными. Отличие заключается лишь в использовании повышающих трансформаторов с разными коэффициентами трансформации. Следует отметить, что данные ВВП являются независимыми источниками питания, в которых можно заземлять на корпус любой из выходных питающих выводов.

Преимущества нового ВВП

По сравнению с ранее использовавшимися в приборах КСП высоковольтными источниками питания в новом ВВП:

— увеличена рабочая частота преобразования напряжения (следовательно, понижено энергопотребление устройства);

— введена плавная подача высокого напряжения на фотоприемник в момент включения питания (что позволяет защитить входные каскады предусилителя от пробоя в результате броска питающего напряжения в момент включения ВЭУ, а также предохранить сам фотоприемник от возникающих при включении разрядов вследствие выделения газов с диодов, пока ВЭУ не выйдет на режим);

— существенно расширен диапазон регулировки питающего высокого напряжения ВЭУ (2.5–4.5 кВ для нового ВВП против 3.5–4.5 кВ для старого);

— приняты меры по стабилизации выдаваемого напряжения и исключению сквозных токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РС явился первым прибором из состава созданной аппаратуры КСП, в котором была проведена оптимизация электрических схем и конструктивных параметров электронных узлов с целью повышения надежности, температурной стабильности и электрической прочности. Таким образом, проделан один из важнейших этапов работы по адаптации прибора к космическим условиям эксплуатации. При этом схемы ИСС и генератора контрольного сигнала были переделаны полностью; а в схемы высоковольтных источников питания фотоприемников внесены значительные изменения. Модернизация данных схем позволила расширить диапазон регистрации излучения, увеличить точность преобразования сигнала в канале электронного тракта, а также удовлетворить предъявляемым высоким требованиям к надежности этих изделий. Изготовленный РС прошел лабораторные калибровочные испытания, продемонстрировавшие целесообразность произведенных изменений.

Работа по изготовлению РС была выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ), Москва (проект № 1523).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авакян С.В. и др.* Создание постоянного космического патруля ионизирующего излучения Солнца // Сборник трудов III Международной конференции-выставки "Малые спутники". г. Королев, 2002. С. 338–345.
2. *Авакян С.В. и др.* Методология и аппаратура для космического контроля солнечного ионизирующего излучения // Оптический журнал. 1998. Т. 65, № 12. С. 124–131.
3. *Авакян С.В. и др.* Лабораторные исследования аппаратуры для космического контроля ионизирующей радиации Солнца // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 2. С. 5–14.
4. *Авакян С.В. и др.* Разработка аппаратуры для постоянного космического патруля ионизирующего излучения Солнца // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 6. С. 54–62.
5. *Avakyan S.V. et al.* The laboratory testing of the space patrol apparatus for the solar ionizing radiation // Proc. SPIE: Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III. Italy, 1999. V. 3870. P. 451–461.
6. *Авакян С.В. и др.* Разработка рентгеновского спектрометра Космического солнечного патруля // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 11. С. 36–40.
7. *Avakyan S.V. et al.* The perspectives of the space

- solar patrol apparatus application for the photometric measurements of the x-ray and EUV spectral range // Proc. of the IVth ISTC scientific seminar on "Basic science in ISTC activities". Novosibirsk, 2001. P. 268–277.
8. *Афанасьев И.М.* Основные характеристики приемного тракта аппаратуры Космического солнечного патруля // Сборник трудов III Международной конференции-выставки "Малые спутники". г. Королев, 2002. С. 354–360.
9. *Афанасьев И.М., Богданов В.Г.* Новая плата измерителя в спектрофотометрической аппаратуре Космического солнечного патруля // Сборник трудов "Прикладная Оптика-2002". СПб, 2002. т. 1. С. 150–155.
10. Исходные технические требования к аппаратуре и оборудованию. ИТТ КЦН РС МКС (П 34240-515). М.: РКК "Энергия", 1999. 112 с.
- ФГУП "ВНЦ Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург*
- Материал поступил в редакцию 14.04.2003.

NEW APPROACHES IN BUILDING A DETECTION PATH IN THE SPACE SOLAR PATROL INSTRUMENTS

**S. V. Avakyan, I. M. Afanas'ev, V. G. Bogdanov,
V. S. Bortkevich, A. S. Bystrov, N. A. Voronin**

Federal Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint-Petersburg

By the example of the electronic patch of an X-ray spectrometer ($\Delta\lambda = 1.8\text{--}63\text{ nm}$) of the Space Solar Patrol (SSP) of ionizing radiation of the Sun modifications relating to detection channels of SSP instruments are considered. They were made to enhance the sensitivity and dynamic range of detection and reliability of radio-electronic units for conditions of the future space operation of SSP instruments in the Russian segment of the International Space Station.