

## **Модернизация системы управления излучением передающих средств стенда СУРА**

К.К. Грехнева, А.В. Шиндин, С.П. Моисеев, Н.С. Тимукин

*Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Лобачевского, 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а  
E-mail: [kseniya81422@mail.ru](mailto:kseniya81422@mail.ru)*

*В ходе масштабной модернизации системы управления стенда СУРА был разработан макет системы синхронизации временных режимов работы передатчиков стенда с мировым временем на базе однокристальной платформы, объединяющей ПЛИС и процессор общего назначения под управлением полноценной операционной системы. Данная модернизация позволяет использовать стенд СУРА совместно с другими диагностическими инструментами, работающими по расписанию. На текущий момент макет позволяет реализовывать импульсные режимы работы на стенде СУРА с заданными периодом ( $<1c$ ) и длительностью ( $<1c$ ) синхронно с мировым временем с запуском через планировщик независимо для каждого из трех передатчиков стенда.*

*Ключевые слова: нагревный стенд, система синхронизации, однокристальная платформа, амплитудно-манипулированный сигнал*

## **Modernization of the radiation control system of the transmitting equipment of the SURA stand**

K.K. Grekhneva, A.V. Shindin, S.P. Moiseev

*Radiophysical Research Institute.*

*During the large-scale modernization of the control system of the SURA stand, a prototype of a system for synchronizing the time modes of operation of the stand's transmitters with world time was developed on the basis of a single-chip platform combining an FPGA and a general-purpose processor controlled by a full-fledged operating system. This modernization allows the SURA stand to be used in conjunction with other diagnostic tools that operate on a schedule. At the moment, the layout makes it possible to implement pulsed operating modes on the SURA stand with a given period ( $<1c$ ) and duration ( $<1c$ ) synchronously with world time with launch through a scheduler independently for each of the three transmitters of the stand.*

*Keywords: heating stand, synchronization system, single-chip platform, amplitude-shift keyed signal*

### **Введение**

В последнее время наблюдается тенденция на усложнение экспериментов, связанных с активными воздействиями на ионосферу. В экспериментах задействованы различные и даже разнородные диагностические средства. В их число входят широкополосные КВ/УКВ/СВЧ радиоприемные устройства, фотометры и другая оптическая техника, радиометры и т.д. Для организации синхронной и согласованной работы всех используемых в эксперименте устройств необходимо обеспечить точное соблюдение программы излучения передатчиков стенда СУРА, часто сочетающей импульсы длительностью от сотен мкс до нескольких минут с периодами от сотни мс до десятков минут, с абсолютной временной привязкой к мировому времени. Каждый

передатчик станда может работать на своей частоте по отдельной и независимой от других передатчиков программе. Аналогичные требования предъявляются и к регистрирующей аппаратуре диагностических пунктов. Опыт участия в экспериментальных кампаниях на зарубежных нагревных стандах (HAARP, Аресибо, США) говорит о том, что для них разработаны и функционируют системы управления с достаточно высокой степенью автоматизации, позволяющие с одной стороны разгрузить операторов станда, а с другой - обеспечивают удобство сбора, последующей обработки и систематизации экспериментальных данных. Модернизация системы управления излучением передатчиков станда СУРА необходима для повышения эффективности всех без исключения проводимых на станде экспериментальных исследований. В разделе приведено описание макета устройства формирующего сигналы внешнего управления (амплитудной манипуляции) задающими генераторами станда СУРА на основе программируемых логических интегральных схем.

### **Постановка задачи**

В 2020-2021 гг. в ходе масштабной модернизации станда СУРА был разработано и реализовано в виде макета устройство, обеспечивающее использование в экспериментальных работах сложных временных алгоритмов излучения. Данное устройство прежде всего создавалось для одновременного использования станда СУРА в качестве источника нагрева ионосферы и КВ-радара для излучения диагностических волн с управляемой скважностью импульсов. В подобных экспериментах (метод многочастотного доплеровского зондирования) один или два передатчика станда работают в режиме квазинепрерывного нагрева на одной из разрешенных частот в сочетании с короткими 100-200 мкс диагностическими импульсами, располагающимися в паузах между импульсами нагрева. Третий передатчик используется исключительно для генерации диагностических импульсов на частоте, смещенной на величину порядка 200 кГц от частоты других передатчиков. Излучение диагностических импульсов всех трех передатчиков должно происходить синхронно. За счет смещения частоты третьего передатчика ширина спектра диагностических импульсов расширяется, что соответственно обеспечивает расширение области высот зондирования. Разработанный макет устройства на базе микроконтроллера Arduino и блока таймеров National Instruments PCI-6602 успешно решает задачу согласованной (синхронной) работы передатчиков станда СУРА с возможностью программирования достаточно сложных импульсных последовательностей. Приемный пункт в экспериментах по многочастотному доплеровскому зондированию располагается в точке, удаленной на расстояние 1-3 км от передатчиков станда, должен быть оснащен тем же источником опорной частоты, что и передатчики. Последнее обеспечивает возможность регистрации фазовых набегов и доплеровской частоты вертикальных движений в ионосфере. Традиционно, начиная с 2010-х годов, для этой цели используются генераторы опорных частот, согласованные с глобальными навигационными системами (GPS disciplined oscillator, далее GPSDO), что обеспечивает точность порядка  $10^{-12}$  с [1]. При организации комплексных экспериментов с задействованием большого числа различного радиотехнического оборудования на первый план выходит задача синхронной работы всей излучающей и регистрирующей аппаратуры. Оснащение всех пунктов размещения оборудования генераторами GPSDO решает задачу точной настройки приемников на частоту работы передатчиков станда, а также обеспечивает возможность проведения фазовых измерений. Задача синхронизации работы всего комплекса диагностического оборудования может быть решена за счет синхронизации передающих и приемных устройств с мировым временем.

## Методы и подходы

Современные GPSDO часто оснащены выходом PPS (pulse per second). После установления связи со спутниками, на выходе PPS формируется импульсная последовательность с периодом 1 с и длительностью 100 или 200 мс. Причем левый фронт каждого импульса по времени синхронизован с мировым временем с точностью порядка  $10^{-12}$  с. Даже если конкретный GPSDO не оснащен выходом PPS, то навигационный приемник, лежащий в его основе обязан иметь выводы PPS. Таким образом, задача создания системы синхронизации (СС) управляемого радиотехнического оборудования с мировым временем может быть решена с помощью сигнала PPS совместно с протоколом NTP (Network Time Protocol, [2]), который необходим для синхронизации внутренних компьютерных часов по сети Интернет с точностью 10 мс. Что касается проблемы синхронизации режима работы задающих генераторов стенда СУРА с мировым временем, то факт необходимости использования протокола прикладного уровня NTP и регистрации и обработки PPS сигнала с минимальными задержками накладывает на систему синхронизации достаточно жесткие требования по быстродействию и функционалу (поддержка интернет-протоколов). Реализация подобной системы на базе микроконтроллера затруднительна. Возможен вариант использования дополнительного персонального компьютера, отвечающего за работу по NTP, совместно с микроконтроллером, однако отказоустойчивость такой системы была бы ниже, чем при использовании одного устройства.

Научно-исследовательский радиофизический институт формирует сеть геофизического мониторинга ННГУ [3] на базе однокристалльной платформы, объединяющей ПЛИС и процессор общего назначения под управлением полноценной операционной системы, и оснащенных целым набором дополнительных цифровых и аналоговых входов/выходов (см. рисунок 1). Данная платформа (Red Pitaya SDRlab 122-16) выбрана для создания макета СС.

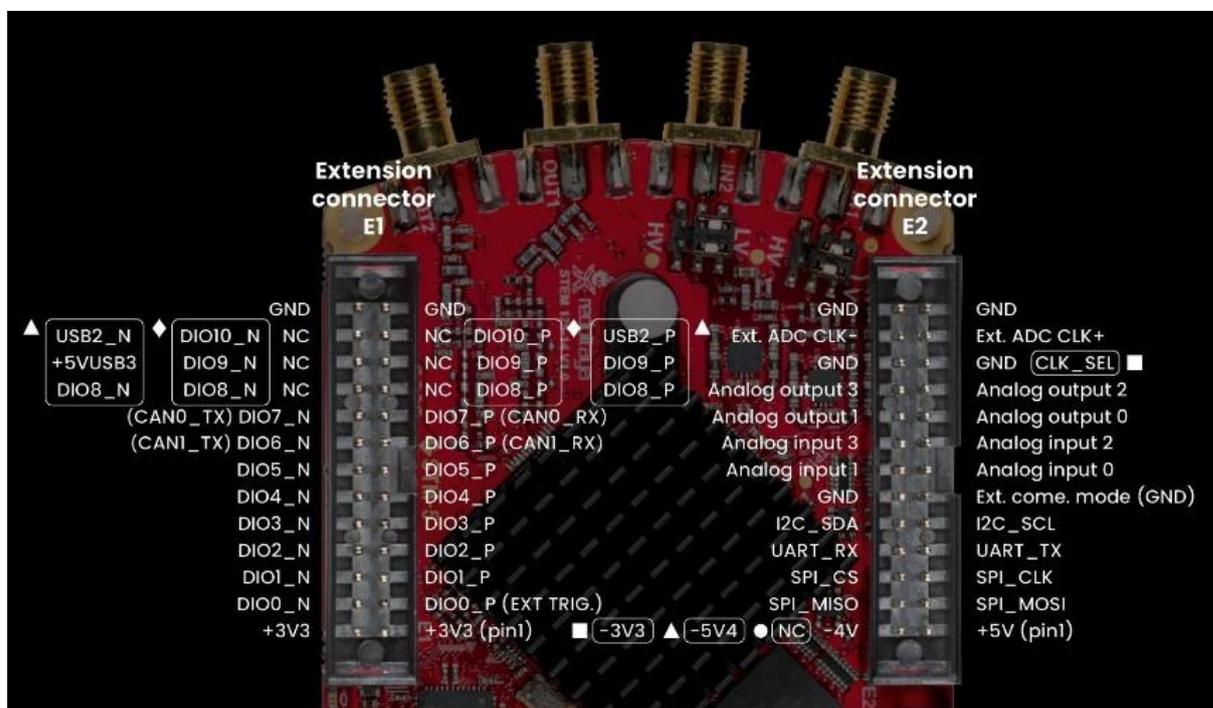


Рис. 1. Фотография отладочной платы Red Pitaya SDRlab 122-16 с пометками о функциональном назначении портов расширения

Благодаря возможности использовать внешний источник тактовой частоты (122,88 МГц, пины Ext. ADC CLK +/- на рисунке 1) плата может использоваться в качестве универсального радиоприемного устройства в экспериментах на стенде СУРА, а наличие цифровых портов ввода/вывода (DIO0\_N, DIO0\_P, DIO1\_N, DIO1\_P, ..., DIO7\_N, DIO7\_P на рисунке 1) позволяет управлять с помощью одной отладочной платы 7 генераторами (стенд СУРА имеет 3 задающих генератора). Один из цифровых входов при этом должен использоваться в качестве входа и на него должен подаваться PPS сигнал с GPSDO. Структурная схема работы макета, разработанной СС представлена на рисунке 2.

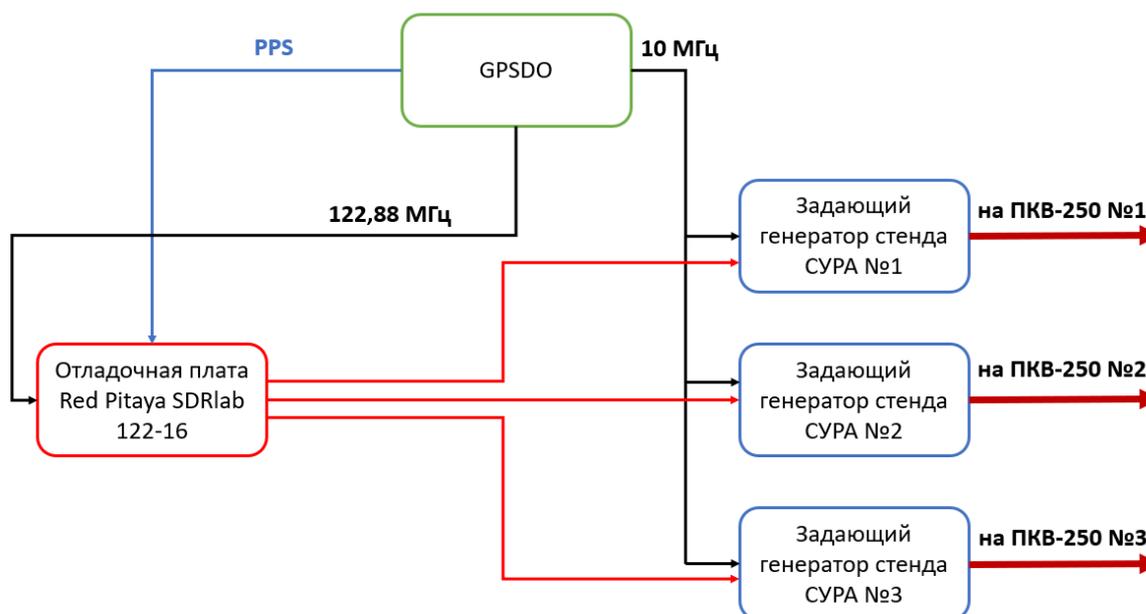
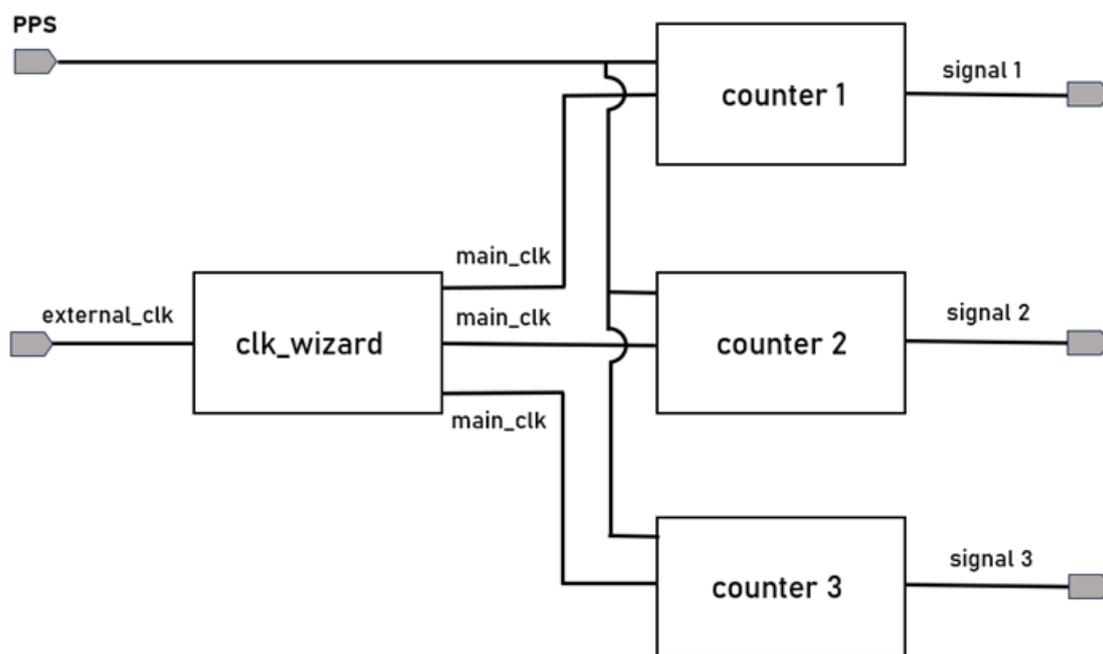


Рис. 2. Структурная схема макета СС

В разработанном макете СС используется двухканальный GPSDO, который выдает тактовую частоту (меандр) для платы SDRlab 122-16 (122,88 МГц) и опорную частоту 10 МГц для задающих генераторов (черные стрелки на рисунке 2). Также GPSDO выдает сигнал PPS (синяя стрелка на рисунке 2), который поступает на один из цифровых входов отладочной платы. Плата в свою очередь с помощью ПЛИС формирует на цифровых выходах управляющие сигналы, которые подаются на входы внешней амплитудной модуляции задающих генераторов. Далее, на выходах задающих генераторов формируется высокочастотный амплитудно-манипулированный сигнал, который затем поступает на соответствующие передатчики стенда СУРА.

Формирование управляющих сигналов на отладочной плате происходит с использованием конфигурации ПЛИС (прошивки), разработанной в среде проектирования Vivado Xilinx на языке описания аппаратуры Verilog с использованием встроенных IP-ядер Xilinx. Функциональная блок-схема прошивки изображена на рисунке 3. Проект состоит из четырех отдельных модулей, имеющих функциональную связь друг с другом: блок clk\_wizard выполняет преобразование тактовой частоты, а блоки counter1, counter2 и counter3 выполняют независимую генерацию произвольных импульсных последовательностей. В блоки counter(1,2,3) на вход поступает сигнал PPS, что обеспечивает синхронизацию генерируемых последовательностей с мировым временем. Значения выходных сигналов хранятся в регистрах signal(1,2,3), которые связаны с тремя цифровыми выходами платы.



**Рис. 3. Функциональная блок-схема разработанной конфигурации ПЛИС**

Как уже было отмечено выше, отладочная плата работает под управлением полноценной операционной системы (Alpine Linux). Необходимым условием работы СС является подключение отладочной платы к серверу времени (NTP-серверу), обеспечивающему синхронизацию системных часов с мировым временем с точностью порядка 10 мс. Таким образом, операционная система позволяет выполнять запуск конфигураций ПЛИС по расписанию, реализуемому стандартными средствами Linux. Конфигурация ПЛИС после загрузки реализует следующую логику работы СС: устройство начинает подавать сигнал на цифровые выходы только по приходу левого фронта импульса PPS, что обеспечивает синхронизацию с мировым временем с точностью  $10^{-12}$  с.

### **Полученные результаты**

Разработанный макет СС на текущий момент позволяет реализовывать импульсные режимы работы на стенде СУРА с заданными периодом ( $<1$ с) и длительностью ( $<1$ с) синхронно с мировым временем с запуском через планировщик независимо для каждого из трех передатчиков стенда. Реализован простейший интерфейс управления СС через удаленный терминал с запуском заранее подготовленных конфигураций ПЛИС. Испытания разработанного макета СС проводились в январе 2023 г. одновременно с публичной демонстрацией. В рамках демонстрации переключение режима работы с одного импульсного режима работы на другой осуществлялось с удаленного терминала на мобильном телефоне. Испытания показали высокий потенциал разработки.

Развитие макета СС связано с реализацией сложных временных режимов излучения, что может быть достигнуто путем добавления вспомогательных счетчиков и образования логических связей между ними. Следующим шагом будет создание интерфейса для изменения параметров счетчиков из операционной системы, что позволит подготовить одну универсальную конфигурацию ПЛИС для управления режимом излучения стенда СУРА.

## **Выводы**

В рамках непрерывной работы над модернизацией системы управления стенда СУРА был создан макет системы синхронизации временных режимов работы передатчиков стенда с мировым временем. Данная модернизация позволяет использовать стенд СУРА совместно с другими диагностическими инструментами, работающими по расписанию. Подобный функционал был реализован на стенде СУРА впервые. Конечной целью разработки является возможность адаптивного управления режимами излучения стенда по данным ионосферного мониторинга искусственной турбулентности в реальном времени.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 21-72-10131.*

## **Литература**

1. Lombardi M.A. The Use of GPS Disciplined Oscillators as Primary Frequency Standards for Calibration and Metrology Laboratories // NCSLI Measure. - 2008. - №3(3). - С. 56-65.
2. RFC 5905 - Network Time Protocol Version 4 Protocol and Algorithms Specification // IETF Datatracker URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5905> (дата обращения: 14.01.2024).
3. Грехнева К.К., Шиндин А.В., Моисеев С.П., Павлова В.А. Универсальная диагностическая платформа НИРФИ на базе современных микроэлектронных компонентов // Спецвыпуск сборника журнала «Наноиндустрия»: 2024. (принята к публикации)