

УДК: 621.396

DOI: 10.26907/rwp29.2025.657-660

## ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФАР УНУ СУРА С ПОМОЩЬЮ SDR-ПРИЕМНИКА НА ВОЗДУШНОМ НОСИТЕЛЕ

Тимукин Н.С., Пахомов А.А., Зеленов А.А., Серкин А.Г., Шиндин А.В.

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Лобачевского,  
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а  
E-mail: timukinn@bk.ru

**Аннотация.** В статье приводятся результаты разработки методики измерения характеристик антенной системы уникальной научной установки СУРА облетным методом. С 2022 года было разработано два варианта макета измерительных систем на воздушном носителе, третий вариант сейчас находится в разработке и должен обеспечить амплитудно-фазовые измерения в ближней зоне фазированной антенной решетки. Приведены некоторые результаты экспериментов. Описаны проблемы, возникшие в процессе, а также изложены планы по будущим работам с учетом накопленного опыта.

**Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, облетный метод, воздушный носитель, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

## MEASUREMENTS OF THE CHARACTERISTICS OF UNU SUR HEADLAMPS USING AN SDR RECEIVER ON AN AIR CARRIER

Timukin N.S., Pakhomov A.A., Zelenov A.A., Serkin A.G., Shindin A.V.

**Abstract.** The paper presents the results of the development of a methodology for measuring the characteristics of the antenna system of the unique scientific installation SURA by the flyby method. Since 2022, two mock-ups of airborne measuring systems have been developed, the third option is currently under development and should provide amplitude-phase measurements in the near zone of the phased array. Some experimental results are given. The problems encountered in the process are described, as well as plans for future work, taking into account the accumulated experience.

**Keywords:** phased array antenna, flyby method, unmanned aerial vehicle, directional pattern, antenna gain.

### Введение

В оперативном пользовании НИРФИ ННГУ находится Уникальная Научная Установка СУРА (далее УНУ СУРА). Уникальная научная установка «Многофункциональный комплекс для исследования околоземного и космического пространства (Стенд СУРА, рег. № 06-30)» была создана в 1981 году и предназначена для проведения прикладных и фундаментальных исследований верхней атмосферы Земли при наличии возмущений естественного и техногенного происхождения и моделирования условий распространения радиоволн КВ и УКВ диапазонов и ионосферных радиотрасс различной протяженности в интересах функционирования радиосистем специального назначения, радиолокации объектов ближнего космоса, радиовещания и телевидения. Основным назначением является исследование нелинейных процессов, возникающих в ионосферной плазме под действием мощного коротковолнового радиоизлучения.

В ходе научных экспериментов с задействованием стенда СУРА для извлечения максимума полезной информации требуются как сведения о фоновой ионосферной и геомагнитной обстановках, так и объективные данные об источнике воздействия (диаграмма направленности (ДН), эффективная мощность или коэффициент усиления (КУ)). Данные о фоновой обстановке берутся с ионозондов, а также из различных индексов геомагнитной и солнечной активности. Что же касается сведений об источнике воздействия на ионосферу, то в настоящее время используются сведения из паспортных технических характеристик, сформированных при сдаче стенда СУРА в 1981 г. Между тем, за сорок с лишним лет непрерывной эксплуатации, включающих масштабную модернизацию 2020-2021 гг., фактические технические характеристики ФАР стенда вероятно отклонились от паспортных. Таким образом требуется создание и отработка методики объективного контроля за характеристиками ФАР стенда. С этой целью с 2022 года в НИРФИ начались работы по

созданию измерительной системы на воздушном носителе (Autel EVO 2, рис. 1, панель А) на базе SDR. Технические характеристики воздушного носителя позволяют поднимать груз весом до 500 г на высоту до 800 м. Специализированное ПО позволяет выполнять облеты по заранее выбранному маршруту, а после вылета позволяет получить подробную телеметрию полета. Время полета носителя с измерительной системой в качестве нагрузки составляет около 20 минут. Несмотря на то, что ФАР стенда СУРА можно использовать в качестве приемной антенны, мы приняли решение размещать на воздушном носителе приемник, а не передатчик. Это обусловлено тем, что при имеющихся небольших дефектах антенного полотна ДН ФАР при работе «на прием» и «на передачу» могут отличаться. При этом приоритетной задачей является определение КУ и ДН при работе «на передачу». Создаваемая измерительная система в конечном своем варианте, согласно внутреннему ТЗ, должна обеспечивать непрерывные амплитудно-фазовые измерения в ближней зоне ФАР, поскольку они необходимы для построения ДН.



Рис. 1. Панель А: внешний вид Autel EVO 2 с измерительной системой в сборе. Панель В: приемник RTL-SDR v3. Панель С: рамочная магнитная антенна

### Первый вариант измерительной системы

В 2022 году макет измерительной системы был основан на одноплатном компьютере Raspberry Pi (модели 3B+ и Zero 2W), мобильной аккумуляторной батарее, SDR приемника RTL-SDR v3 (рис. 1, панель В), а также магнитной рамочной антенне диаметром 3 см (рис. 1, панель С). SDR приемник RTL-SDR позволяет непрерывно регистрировать КВ сигнал в режиме прямой оцифровки (direct sampling) с частотой дискретизации от 1 МГц. На приемнике используется АЦП разрядности 8 бит. Магнитные рамки небольшого диаметра удобно использовать в качестве антенн на БПЛА в виду их компактности. При этом их чувствительности (а также чувствительности приемного устройства) было достаточно для регистрации КВ сигнала в непосредственной близости от нагревного стенда. Одноплатный компьютер использовался в качестве управляющего устройства. Регистрация сигнала выполнялось с помощью программного пакета GNU Radio 3.8. Взаимодействие с ОС осуществлялось по беспроводному Wi-Fi каналу по протоколу VNC с помощью телефона.

Измерительная система была откалибрована с использованием поверенного ВЧ генератора и магнитной рамки диаметром 10 см. Таким образом, были получены коэффициенты пересчета из относительных единиц измерения, выдаваемых пакетом GNU Radio, в абсолютные (Гц и В/м). Измерительная система может быть использована совместно с летательными аппаратами с грузоподъемностью от 400 г. В июле-августе 2022 было проведено несколько серий испытаний разработанного макета. В ходе них были отработаны навыки пилотирования и управления регистрацией сигнала. В ходе испытаний установлено, что разработанный макет способен без ущерба для своих функциональных возможностей находиться в ближней зоне электромагнитного поля, создаваемого нагревным стендом СУРА, работающим на

максимальной мощности. Также выявлена чувствительность применяемого носителя к температуре его аккумуляторной батареи: установлено, что при высокой температуре батареи (сразу после зарядки) БПЛА может терять управляемость. К недостаткам системы относится принципиальная невозможность измерять фазу. С целью преодоления этого ключевого недостатка в 2023 г. была начата разработка второго варианта макета измерительной системы.

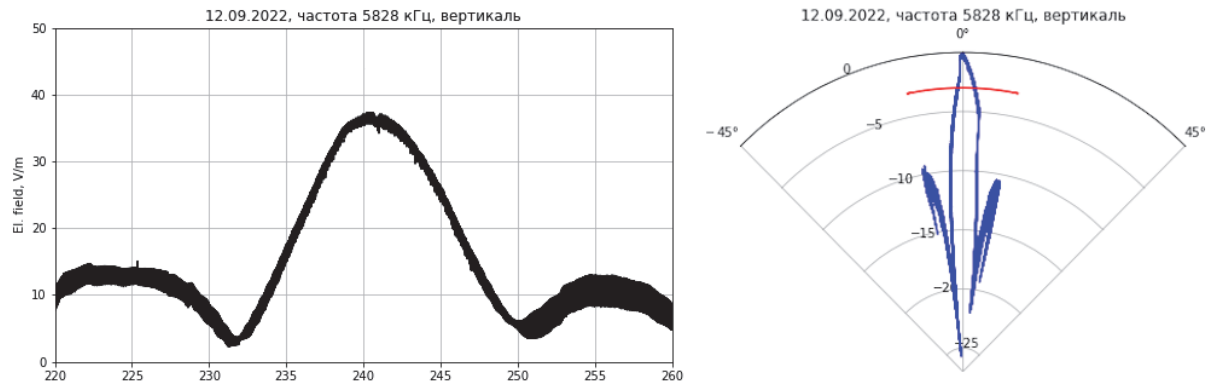


Рис. 2. Пример амплитудной записи, полученной с помощью первого варианта измерительной системы при пролете над центром ФАР на высоте 600 м в направлении север-юг при общей мощности передатчиков – 380 кВт. Панель слева – зависимость напряженности электрического поля от времени в с; панель справа – та же зависимость в дБ (нормировка на максимум) и полярных координатах

### Второй вариант измерительной системы

В качестве основы аппаратной платформы для второго варианта макета измерительной системы была выбрана отладочная плата Red Pitaya SDRlab 122-16 с двухканальным 16-ти разрядными АЦП (а также двухканальным 14-ти битным ЦАП) и встроенным управляющим компьютером под управлением ОС Alpine Linux. В состав макета включен компактный тактовый генератор (GPSDO) для обеспечения корректной регистрации фазы сигналов, а также две ортогонально ориентированных магнитных рамки для регистрации двух линейных компонент электромагнитного поля и получения данных о поляризации излучения. Синхронизированный с сигналами GPS тактовый генератор, подключаемый к отладочной плате, должен был обеспечить возможность фазовых измерений и абсолютную временную привязку, но, к сожалению, в ходе первых испытаний второй версии макета была выявлена электромагнитная несовместимость тактового генератора с навигационным оборудованием воздушного носителя. В связи с этим измерения фазы при пролетах над ФАР до настоящего времени не были выполнены, и мы продолжили амплитудные измерения, испытания приемных антенн, а также заготовили траектории для будущих полетов. Второй вариант измерительной системы также был откалиброван с использованием 10 см магнитной рамки.



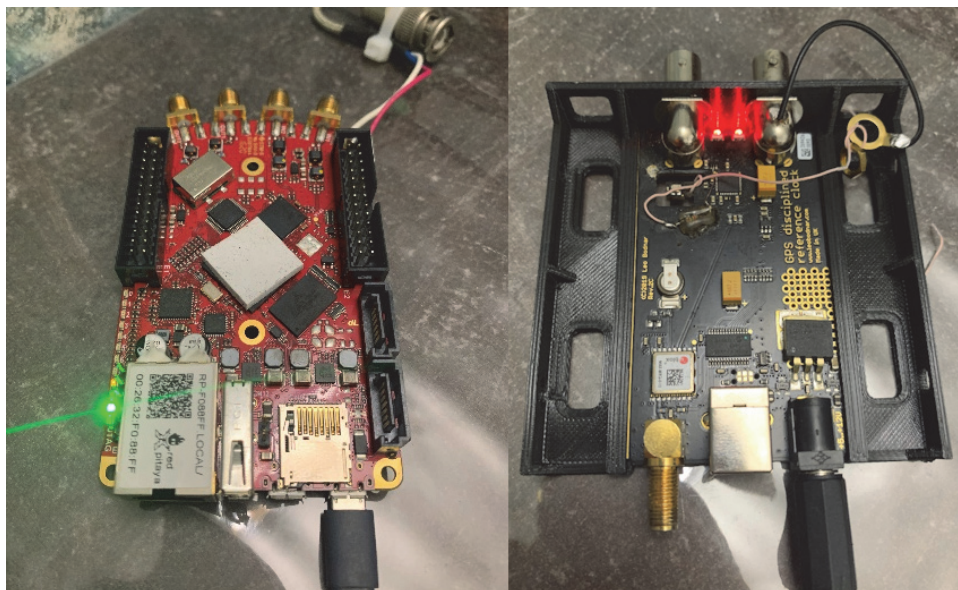


Рис. 3. Отладочная плата SDRlab 122-16 (слева) и тактовый генератор Leo Bodnar (справа)

### Третий вариант измерительной системы (в разработке)

В настоящее время ведется разработка третьего варианта макета измерительной системы. Вместо тактового генератора, синхронизированного с GPS, будет использована пара подстраиваемых кварцев на 120 МГц и пара отладочных плат SDRlab 122-16. Разработана следующая методика проведения фазовых измерений на воздушном носителе с использованием кварцев:

- 1) синхронизация (путем подстройки) двух кварцев. По нашим оценкам длительность сохранения синхронизации в отсутствие управляющего напряжения составляет около 30 минут, что превышает длительность полета;
- 2) использование одной пары кварц-отладочная плата в качестве задающего генератора для передатчиков стенда СУРА;
- 3) использование второй пары кварц-отладочная плата в составе измерительной системы (амплифазометра) на воздушном носителе;
- 4) непосредственный пролет носителя над полем по заранее подготовленному маршруту.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### Список литературы

1. Ю.И. Белов, А.Г. Серкин, Н.С. Тимукин, А.В. Шиндин. О методах контроля антенны радара стенда СУРА в экспериментах исследования ионосферы // Труды XXVIII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2024.