

## **Разработка макета двухчастотного когерентного приемника для решения задач сопровождения перспективных низкоорбитальных спутников**

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

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

*Представлен макет двухчастотного когерентного УКВ приемника на основе современных радиоприемных устройств для проведения радиотомографических измерений регулярной, волновой и стохастической структуры распределения электронной концентрации в подспутниковой толще ионосферной плазмы. Ключевыми особенностями разработанного макета являются дешевизна использованных компонентов и возможность полного контроля над процессом цифровой обработки сигнала. Разработанный макет двухчастотного УКВ приемника удовлетворяет всем требованиям для успешной регистрации и обработки сигнала передатчика «Маяк», размещенного на борту космического аппарата «Ионосфера-М». Ключевые слова: двухчастотный когерентный УКВ приемник, радиотомографические измерения, измерения электронной концентрации, супергетеродинный радиоприемник*

## **Development of a dual-frequency coherent receiver model for solving problems of tracking promising low-orbit satellites**

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

*Radiophysical Research Institute.*

*A model of a dual-frequency coherent VHF receiver based on modern radio receivers for performing radio tomographic measurements of the regular, wave and stochastic structure of the electron concentration distribution in the sub-satellite ionospheric plasma is presented. The key features of the developed layout are the low cost of the components used and the ability to fully control the digital signal processing process. The developed prototype of a dual-frequency VHF receiver meets all the requirements for successful registration and processing of the signal from the Mayak transmitter located on board the Ionosphere-M spacecraft. Keywords: dual-frequency coherent VHF receiver, radio tomographic measurements, electron concentration measurements, superheterodyne radio receiver*

### **Введение**

В рамках реализации проекта «Ионозонд» [1,2] в 2024 году должна быть выведена на орбиту Земли первая из двух пара космических аппаратов «Ионосфера-М». В состав полезной нагрузки аппаратов «Ионосфера-М» входит двухчастотный когерентный УКВ передатчик «Маяк» для радиопросвечивания ионосферы Земли на частотах 150 МГц и 400 МГц с целью диагностики мелкомасштабных ионосферных возмущений в динамике и реконструкции трехмерной картины распределения электронной концентрации в ионосфере. Передатчик комплектуется штыревой и вибраторной антеннами [3,4]. Сигнал передатчика «Маяк» регистрируется на поверхности Земли с использованием специализированных двухчастотных УКВ приемников и обрабатывается томографическим методом. В рамках этапа 2023 г. настоящей НИР на основе современных радиоприемных устройств был разработан макет двухчастотного когерентного УКВ приемника для проведения радиотомографических измерений

регулярной, волновой и стохастической структуры распределения электронной концентрации в подспутниковой толще ионосферной плазмы. Ключевыми особенностями разработанного макета являются дешевизна использованных компонентов и возможность полного контроля над процессом цифровой обработки сигнала.

### Постановка задачи

Технические характеристики передатчика «Маяк» [3] приведены в таблице 1. Характеристики бортовых антенн [4] приведены в таблицах 2 и 3.

**Таблица 1. Технические характеристики передатчика «Маяк»**

Рабочая частота первого канала	400±2,7 МГц
Рабочая частота второго канала	150±1 МГц
Выходная мощность первого и второго канала	27 Дбм
Выходное сопротивление первого и второго канала	50 Ом
Мощность потребления в режиме передачи	6 Вт
Мощность потребления в режиме молчания	0,7 Вт
Габариты модуля передатчика	191×140×58 мм
Масса модуля передатчика	0,98 кг
Средняя наработка изделия на отказ	не менее 10000 ч
Срок службы	не менее 3 лет
Допустимый срок хранения	не менее 2 лет

**Таблица 2. Характеристики бортовой штыревой антенны космического аппарата «Ионосфера-М»**

Рабочий диапазон частот	150 ± 1,92 МГц
Поляризация	Линейная (вертикальная)
Диаграмма направленности	Преимущественно в направлении ±45° от надира (ось «-Z» КА) и с нулевым провалом в направлении «-Z»
Коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне рабочих частот	Не более 2,0
Выходная мощность передатчика	Не более 1,0 Вт
Рабочий диапазон температур	От -50 до +80°С
Масса	0,26 кг
Габариты	366 × 25 × 25 мм

**Таблица 3. Характеристики бортовой вибраторной антенны космического аппарата «Ионосфера-М»**

Рабочий диапазон частот	400 ± 5,12 МГц
Поляризация	Линейная
Коэффициент усиления (КУ)	КУ не менее «-3,5 дБ» с неравномерностью не более 6 дБ в конусе рабочих углов ±45° от надира и 360° по азимуту
Коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне рабочих частот	Не более 2,0
Выходная мощность передатчика	Не более 1,0 Вт
Рабочий диапазон температур	От -50 до +80°С
Масса	0,5 кг
Габариты	346 × 244 × 35 мм

Приведенные характеристики бортовой радиопередающей системы двухчастотного маяка вместе с общими принципами радиотомографического метода [1] определяют требования к приемной аппаратуре:

- наличие двух каналов на прием;
- возможность перестройки центральных частот приема сигнала в диапазоне рабочих частот бортовых антенн;
- обеспечение режима когерентной регистрации сигнала с двух антенн;
- возможность автоматического определения частоты работы бортового маяка.
- возможность непрерывной регистрации сигнала с двух каналов в полосе не менее 125 Гц;
- абсолютная временная привязка регистрируемых записей;
- чувствительность, достаточная для приема сигнала мощностью 1 Вт со спутника, находящегося на орбите 820 км.

### Методы и подходы

Исходя из сформулированных выше требований к двухчастотному когерентному УКВ приемнику, в качестве основы для разрабатываемого макета была выбрана универсальная диагностическая платформа НИРФИ [5], реализованной на базе отладочной платы Red Pitaya SDRlab 122-16. Указанная отладочная плата имеет двухканальный 16-ти битный АЦП, работающий на частоте 122-125 МГц, сигнал с которого обрабатывается с помощью ПЛИС, либо с помощью ПЛИС в связке с двухъядерным процессором общего назначения. Таким образом диагностическая платформа НИРФИ удовлетворяет требованию о количестве приемных каналов.

Основное функциональное назначение диагностической платформы НИРФИ – регистрация сигналов в КВ диапазоне. Технические характеристики отладочной платы обеспечивают полосу рабочих частот – 0,6-60 МГц. Для удовлетворения требованию к разрабатываемому макету по полосе рабочих частот ( $150 \pm 1,92$  МГц и  $400 \pm 5,12$  МГц соответственно) предлагается использовать схему аналогового понижающего преобразования частоты (downconverter) с применением радиочастотных смесителей. Таким образом реализуется классический супергетеродинный радиоприемник.

Частоты излучения радиопередатчика маяк имеют фиксированное отношение 3/8, что позволяет говорить об условной «базовой» частоте 50 МГц. При этом частота 150 МГц может рассматриваться как 3-я гармоника «базовой» частоты, а 400 МГц – как 8-я гармоника. Если, продолжая эту логику, перейти от диапазона рабочих частот бортовых антенн к диапазону «базовой» частоты, то получим 49,36-50,64 МГц. В разрабатываемом макете двухчастотного приемника также предлагается использовать аналогичное (3/8) отношение частот двух гетеродинов ( $f_1$  и  $f_2$ ) при «базовой» частоте 49 МГц. Таким образом получаются следующие частоты гетеродинов и промежуточные частоты (ПЧ1 и ПЧ2):  $f_{Г1} = 49 \times 3$  МГц = 147 МГц,  $f_{Г2} = 49 \times 8$  МГц = 392 МГц,  $f_{ПЧ1} = 3 \pm 1,92$  МГц,  $f_{ПЧ2} = 8 \pm 5,12$  МГц. В этом случае минимально возможная частота ПЧ составляет 1,08 МГц, а максимально возможная – 13,12 МГц, что укладывается в диапазон рабочих частот диагностической платформы (0-60 МГц).

В качестве источника «базовой частоты» 49 МГц для гетеродинов  $f_1$  и  $f_2$  предлагается использовать двухканальный перестраиваемый генератор прямоугольных импульсов согласованный с GPS (GPSDO [6]). Наличие второго канала определяется необходимостью формирования внешнего тактового сигнала (BTC) на частоте 122-125 МГц для отладочной платы SDRlab 122-16, что требуется в частности для обеспечения прецизионных амплитудно-фазовых измерений и когерентной регистрации сигнала с двух антенн. Спектр сигнала перестраиваемого генератора прямоугольных импульсов,

настроенного на «базовую» частоту 49 МГц, содержит все гармоники этой частоты. До подачи сигнала генератора на радиочастотные смесители предлагается использовать полосовые фильтры (ПФ) для выделения 3-й и 8-й гармоник «базовой» частоты.

Поскольку в случае использования диагностической платформы НИРФИ процесс цифровой обработки полностью контролируется, то в случае, если «базовая» частота бортового передатчика будет неизвестна, то она может быть легко определена программно, например, путем быстрого сканирования по диапазону частот.

Требование непрерывной регистрации в полосе не менее 125 Гц легко удовлетворяется с учетом максимальной полосы двухканальной регистрации сигнала отладочной платы SDRlab 122-16 1,5 МГц.

С генератора дополнительно снимается сигнал PPS для обеспечения абсолютной привязки к мировому времени.

Требуемую чувствительность предлагается достичь путем использования разумно малой полосы регистрации сигнала, малошумящих усилителей сигнала, трансформаторного источника питания, экранированных корпусов и, если потребуется, дополнительных фильтрующих элементов на сигнал на ПЧ.

### Реализация когерентного двухчастотного УКВ приемника в виде функционального макета

Функциональная схема разработанного макета представлена на рисунке 1.

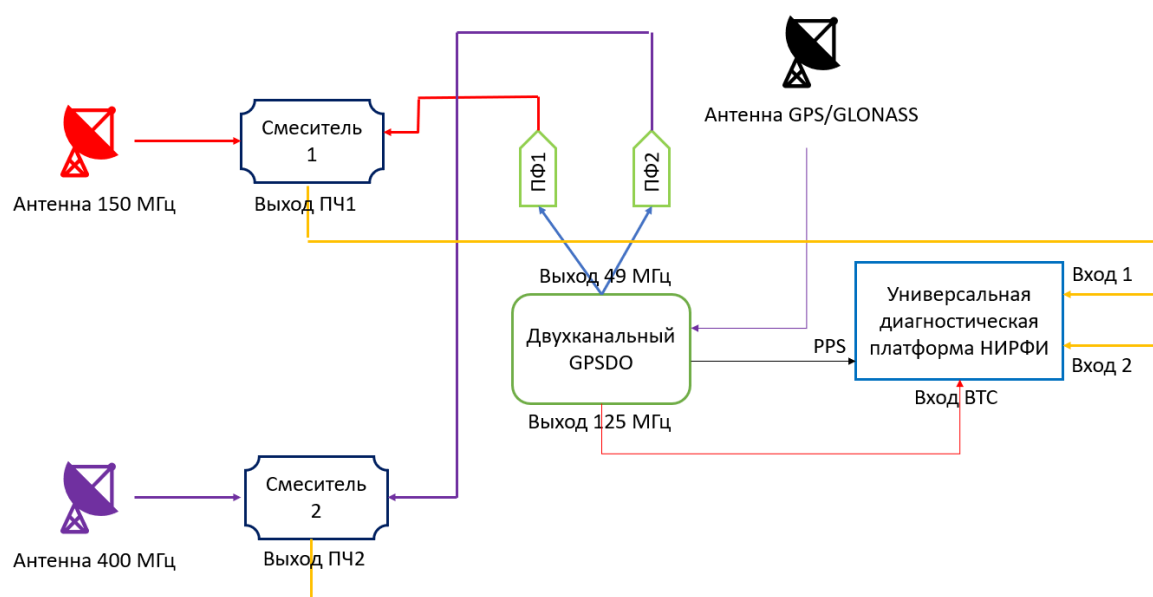


Рис. 1. Функциональная схема когерентного двухчастотного УКВ приемника 150/400 МГц

Ключевые узлы, использованные в макете:

- универсальная диагностическая платформа НИРФИ на базе отладочной платы SDRlab 122-16;
- двухканальный GPSDO GPS Tame V2 Clock [7], модифицированный (оснащенный выходом PPS сигнала);
- радиочастотные смесители RMS-11 5-1900MHz RF Up and Down Frequency Conversion Passive Mixer Module [8];
- полосовой фильтр с центральной частотой 144 МГц и полосой пропускания 127-157 МГц;

- полосовой фильтр с центральной частотой 403 МГц и полосой пропускания 400-406 МГц;

Фотография собранного функционального макета представлена на рисунке 2. Отладочная плата подключается к локальной сети, благодаря чему осуществляется дистанционное управление макетом. Универсальное программное обеспечение на базе GNU Radio [9] позволяет осуществлять одновременную регистрацию (с записью в память персонального компьютера) сигнала на двух входах платы в квадратурах. Также средствами GNU Radio можно реализовать базовую цифровую обработку сигнала с целью получения данных о полном электронном содержании на трассе распространения сигнала от спутника до месторасположения приемника.

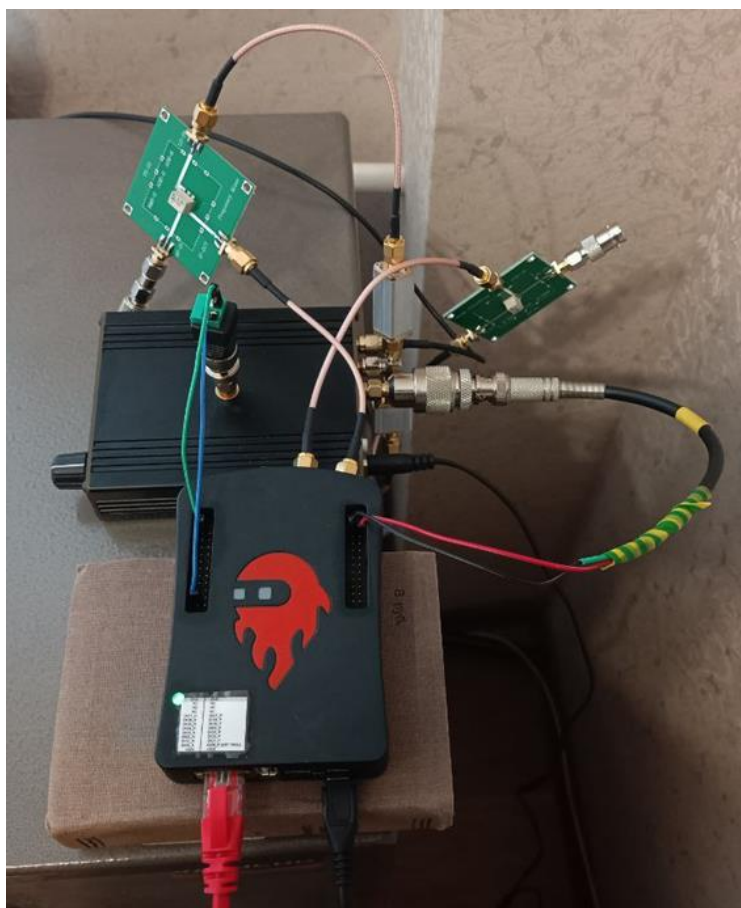


Рис. 2. Фотография собранного функционального макета

### Выводы

Разработанный макет двухчастотного УКВ приемника удовлетворяет всем требованиям для успешной регистрации и обработки сигнала передатчика «Маяк», размещенного на борту космического аппарата «Ионосфера-М». Вместе с тем, в виду того, что вывод спутника на орбиту еще не состоялся, для тестирования макета необходима сборка тестового стенда. Такой стенд будет создан в рамках 2 этапа работ по НИР. Макет двухчастотного УКВ приемника будет включен в состав диагностического оборудования уникальной научной установки СУРА после окончания разработки. А.В. Шиндин выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FSWR-2023-0038 базовой части Государственного задания за доступ к контрольно-измерительной аппаратуре НИРФИ.

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

### **Литература**

1. A. Petrukovich, M. Mogilevskii, I. Kozlov, S. Pulinetz, Y. Dobrolenskii, K. Anufreichik, D. Chugunin, V. Nazarov, A. Abbakumov, V. Kuznetsov, S. Andrievskii, Y. Mikhailov, M. Panasyuk, S. Svertilov, I. Yashin, V. Bogomolov, A. Iyudin, V. Kalegaev, V. Osedlo, V. Petrov, A. Shemukhin, A. Repin, N. Kotanaeva, P. Moiseev, S. Poljakov, Y. Shlugaev, V. Asmus, S. Uspenskii, L. Makridenko, A. Gorbunov, V. Kozhevnikov. Monitoring of Physical Processes in Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere in Ionosphere Space Missions. EPJ Web Conf. V.254 02010 (2021)
2. ИОНОЗОНД // ИКИ РАН URL: <https://iki.cosmos.ru/research/missions/ionozond> (дата обращения: 16.01.2024).
3. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели двухчастотной микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. № 4. С. 23–26.
4. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенная система космического аппарата «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 131. № 6. С. 11–14.
5. Moiseev S.P., Shindin A.V., Grekhneva K.K., Pavlova V.A., Timukin N.S. ION-FAST as the NIRFI's ionospheric diagnostic platform // Atmosphere (2024, accepted)
6. 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.
7. Generator Si5351a // SQ1GU konstrukcje radioamatorskie URL: <http://sq1gu.tobis.com.pl/en/dds> (дата обращения: 16.01.2024).
8. RMS-11X+ // minicircuits URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/RMS-11X+.pdf> (дата обращения: 16.01.2024).
9. Yamamoto, M. Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio. Earth Planet Sp 60, e21–e24 (2008). <https://doi.org/10.1186/BF03353137>