

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ
РАДИОСИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
ОТ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЕТОЧНОГО ДЕТЕКТОРА**

©2026 г. М. П. Калаев, А. М. Телегин*

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2026 г.

После доработки 10.03.2026 г.

Принята к публикации 30.03.2026 г.

Представлена методика регистрации и анализа параметров заряженных микрочастиц (микрометеоритов) в диапазоне скоростей 0.5–10 км/с и электрических зарядов 1фКл–1пКл. Метод основан на использовании пятиэлектродного сеточного времяпролетного детектора с шагом 10 мм и ячейкой 1 мм. Для оцифровки сигнала применен нестандартный подход с использованием программно-определяемого радиоприемника SDRplay RSP1, функционирующего в режиме прямого преобразования на минимальной частоте с полосой захвата 8 МГц, что позволяет использовать его в качестве широкополосного АЦП. Обработка оцифрованных данных, включая полосовую фильтрацию, детектирование огибающей, пороговое выделение событий и анализ параметров импульсов, реализована в среде GNU Radio. По временному интервалу между импульсами определяется скорость частицы, а по их амплитуде — ее электрический заряд. Экспериментально подтверждено, что предлагаемое аппаратно-программное решение на базе SDR обеспечивает гибкость и снижение стоимости измерительного тракта при сохранении метрологических характеристик, достаточных для заявленных диапазонов измерений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Регистрация и анализ параметров высокоскоростных микрочастиц (микрометеоритов, частиц космической пыли, технологических аэрозолей) являются актуальными задачами для экспериментальной физики, астрофизики и материаловедения [1–9]. Ключевыми измеряемыми параметрами являются скорость и электрический заряд микрочастиц. Времяпролетные схемы измерения на основе сеточных детекторов с последующей аналоговой или высокоскоростной цифровой обработкой хорошо известны [9–14], однако они часто требуют применения специализированной и дорогостоящей высокоскоростной оцифровывающей электроники. В работе [11] для регистрации микрочастиц используется высокоскоростной лабораторный осциллограф, что делает невозможным использование такой системы регистрации на борту космического аппарата ввиду его больших массы, габаритов и энергопотребления.

Приемлемыми техническими характеристиками и возможностью бортового применения обладает устройство, описанное в работе [14], однако его стоимость может быть велика для образовательных проектов и спутников формата CubeSat. Кроме этого, алгоритм работы подобных устройств основан на жесткой логике, защитой в ПЛИС, что делает невозможным быструю оптимизацию системы при изменении условий проведения эксперимента (формы измеряемых импульсов, уровня шумов, формата упаковки данных и т.д.).

Для преодоления указанных недостатков в настоящей работе предлагается подход, использующий доступный широкополосный SDR-приемник (Software Defined Radio – программно-определяемая радиосистема) в качестве высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с последующей программной обработкой [15, 16]. Цель настоящей работы – продемонстрировать работоспособность метода и оценить его возможности для измерения скорости и заряда микрочастиц.

2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью экспериментального подтверждения предложенного метода для регистрации микрометеоритов в вакуумной камере ускорителя была собрана схема, включающая в себя исследуемый сеточный датчик и контрольные средства регистрации скорости и заряда частиц на основе колец Фарадея и цифровой осциллографической приставки (рис. 1) [11, 17]. Сеточный датчик представляет собой систему из пяти идентичных плоских проводящих медных сеток, закрепленных на рамках из ABS-пластика и расположенных параллельно и соосно. Расстояние между соседними сетками $d = 10$ мм. Размер ячейки сетки (1×1 мм²) выбран много меньше расстояния между сетками, что позволяет рассматривать их как эквипотенциальные поверхности и упростить модель расчета наведенного сигнала. Сетки 1, 3, 5 постоянно заземлены и выполняют роль электростатических экранов, формирующих измерительные промежутки фиксированной длины. Сетки 2, 4 электрически соединены между собой и образуют измерительный электрод, сигнал от которого поступает через зарядочувствительный усилитель на вход SDR-приемника, подключенного к ЭВМ. В качестве SDR использован SDRplay RSP1, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики SDRplay RSP1

Параметр	Значение / Описание
Ключевая архитектура	Прямое понижающее преобразование
Диапазон частот, кГц	$10 - 2 \cdot 10^6$
Максимальная полоса пропускания, МГц	8
Разрядность АЦП, биты	14
Входной импеданс, Ом	50
Коэффициент шума в ВЧ-диапазонах, дБ	около 4
Диапазон перестройки входного усилителя	0–59 дБ
Потребляемая мощность от порта USB 2.0, Вт	менее 2.5

Ключевыми особенностями указанного SDR, обеспечивающими возможность его работы для фиксации импульсов от пролета частиц, являются возможность регистрации сигналов с частотой от 10 кГц, большая разрядность АЦП и относительно широкая полоса пропускания. Кроме этого, в ЭВМ поступает информация с контрольного детектора пролета частиц, образованного кольцами Фарадея K_1 , K_2 , усилителями U_1 , U_2 и блоком регистрации частиц в составе ускорителя (БРЧ) [11, 17, 18].

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

На рис. 2 показана фотография датчика в сборе с зарядочувствительным услителем (ЗЧУ) и SDR-приемником RSP1. Структурная схема RSP1 приведена на рис. 3 [19].

Рис. 2. Датчик в сборе:**Рис. 3.** Структурная схема SDRplay RSP1

В ходе эксперимента ускоритель формировал поток алюминиевых микрочастиц ПАП-1 с размерами 1–10 мкм, скоростями 2–8 км/с и зарядами 10^{-15} – 10^{-12} Кл, давление в камере для проведения экспериментов было около 10^{-3} Па. Частицы ускорялись по одной со средним периодом следования одна частица в секунду, их скорость регистрировалась с помощью контрольных колец K_1 , K_2 и системы БРЧ с точной привязкой по времени, а затем с помощью исследуемого сеточного датчика с системой регистрации на основе SDR.

При пролете микрочастицы с зарядом Q и скоростью V через сетки 2 и 4 на них наводится заряд за счет явления электростатической индукции. Прохождение рядом с заземленными сетками (1, 3, 5) не вызывает появление сигнала в измерительной цепи, так как эти сетки имеют нулевой потенциал. В результате на выходе датчика формируются два коротких разнополярных импульса. Временной интервал Δt между центрами этих импульсов соответствует времени пролета частицы между срединными плоскостями сеток 2 и 4. Осциллограмма сигнала от датчика, записанная с помощью SDR RSP1 и GNU Radio при

пролете высокоскоростной заряженной микрочастицы, представлена на рис. 4. Для наглядности над графиком схематично изображена сеточная система датчика (C_1-C_5).

Рис. 4. Сигнал на выходе SDR при пролете частицы

При пролете частицы в промежутке между сетками C_1 и C_2 формируется импульс тока отрицательной полярности, которая становится положительной при удалении частицы от сигнальной сетки C_2 (промежуток C_2-C_3) [18, 20, 21]. Аналогично отрицательный и положительный перепады тока формируются для сигнальной сетки C_4 .

Скорость частицы определяется выражением

$$V=d /\Delta t ,$$

где $d=20$ мм – расстояние между сетками C_2 и C_4 , подключенными ко входу усилителя, Δt – интервал между пересечениями положительных фронтов импульсов нулевой линии напряжения на выходе SDR.

Значение интеграла от наведенного импульса тока на выходе ЗЧУ пропорционально заряду Q и обратно пропорциональна емкости измерительного электрода относительно земли C_{in} . Тогда заряд микрочастицы можно оценить с помощью выражения

$$Q = k U_{peak} C_{in} ,$$

где k – коэффициент, зависящий от геометрии датчика и формы импульса, определяемый калибровкой [18, 19].

Сигнал с соединенных сеток 2 и 4 подается на вход малошумящего ЗЧУ, который преобразует короткий импульс тока в напряжение с амплитудой, пропорциональной интегралу тока (т. е. наведенному заряду). Выходное напряжение ЗЧУ поступает на вход SDR-приемника RSP1 (SDRplay). В отличие от типичного радиочастотного применения, RSP1 настроен на минимально возможную частоту (10 кГц) в режиме прямого преобразования с максимальной полосой пропускания 8 МГц. В этом режиме устройство работает как широкополосный АЦП с частотой дискретизации до 8 МГц, оцифровывая сигнал в полосе от 0 до 8 МГц. Такая полоса достаточна для регистрации импульсов с длительностью фронта порядка 0.1–1 мкс, характерных для данной задачи (время пролета частицы через область влияния сетки составляет примерно 1 мкс при скорости 1 км/с и менее 0.1 мкс при скорости 10 км/с).

Оцифрованный сигнал в виде квадратурных составляющих I и Q передается по USB в ПК, где обрабатывается в графической среде GNU Radio. Разработанный программный алгоритм включает следующие блоки (рис. 5, 6).

1. *Фильтрация.* Для подавления низкочастотных дрейфов и высокочастотных шумов применяется полосовой КИХ-фильтр (с полосой 0.1–4 МГц).
2. *Выделение огибающей.* Для выделения амплитуды радиочастотного сигнала используется блок детектора огибающей:

$$U_{det, out} = (I^2 + Q^2)^{1/2}.$$

3. *Пороговое обнаружение.* Для выделения событий пролета частицы применяется компаратор с регулируемым порогом, превышение которого запускает процедуру записи фрагмента сигнала.
4. *Запись и анализ.* При превышении порога фрагмент сигнала (окно длительностью около 50–100 мкс) записывается в файл для последующей обработки или анализируется в реальном времени. Определяются временные метки фронтов двух импульсов (по пересечению уровня в 50% от максимума каждого импульса), вычисляется Δt , а затем скорость V . Амплитуды импульсов U_1 и U_2 усредняются для повышения точности оценки заряда.
5. *Калибровка.* Коэффициент пересчета "амплитуда–заряд" определяется экспериментально с помощью генератора калиброванных зарядовых импульсов, подаваемых на тестовый вход усилителя датчика.

Рис. 5. Схема обработки сигнала в GNU Radio

Рис. 6. Упрощенная схема обработки сигнала в GNU Radio

3. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА

3.1. Определение погрешности измерения скорости

В ходе экспериментального исследования разработанной системы измеренная скорость микрочастиц сравнивалась с результатами штатной системы на основе колец Фарадея. Сравнение носило качественный характер, однако оно продемонстрировало идентичность результатов (с расхождением не более 5%). Предположительно, разработанная система на основе SDR имеет более высокую точность за счет возможности анализа полной формы импульса, в отличие от штатной БРЧ, построенной на основе простого порогового устройства (компаратора) и таймера-счетчика.

Относительную погрешность измерения скорости микрочастицы можно оценить из выражения

$$\delta V = \sqrt{(\delta(\Delta t))^2 + (\delta d)^2},$$

где $\delta(\Delta t)$ – относительная погрешность измерения временных интервалов, δd – относительная погрешность измерения расстояния между сетками.

При цифровой обработке доминирующей является временная погрешность $\delta(\Delta t)$, определяемая шагом дискретизации ($\Delta t_s = 0.125$ мкс для частоты дискретизации $F_s = 8$ МГц) и алгоритмом интерполяции фронта сигнала. При скорости 10 км/с время пролета $\Delta t = 2$ мкс,

погрешность $\delta(\Delta t)$ может быть снижена примерно до 0.1 мкс, что дает $\delta V \sim 5\%$. При скорости 0.1 км/с $\Delta t = 200$ мкс и погрешность становится пренебрежимо малой (менее 0.1%).

3.2. Определение заряда

Диапазон измеряемых зарядов (1 фКл–1 пКл) соответствует амплитудам на входе ЗЧУ от единиц микровольт до десятков милливольт (при чувствительности ЗЧУ порядка 1 В/пКл и $C_{input} \sim 1$ пФ). Основное ограничение накладывается собственными шумами ЗЧУ и входного каскада SDR. Расчеты и эксперименты показывают, что при использовании малошумящего ЗЧУ с эквивалентным шумовым зарядом менее 0.1 фКл с помощью описываемой системы возможна регистрация зарядов на уровне 1 фКл.

3.3. Влияние конструкции измерительной сетки датчика

Конечный размер ячейки сетки (1 мм) может вносить погрешность в измерение скорости для самых быстрых частиц (10 км/с), так как время пролета через одну ячейку сопоставимо с временем нарастания импульса. Однако симметричная конструкция с двумя измерительными промежутками позволяет минимизировать эту систематическую ошибку.

3.4. Оценка предельной чувствительности

Усилительный каскад построен на основе специализированного операционного усилителя LTC6268, используемого в схеме ЗЧУ. Ключевые особенности LTC6268 для данной задачи таковы: сверхмалый входной ток смещения (3 фА) и низкая входная емкость (0.45 пФ), что минимизирует утечку и искажение быстрого тока наводки. Обратная связь ЗЧУ задана параллельной RC-цепью: $C_f = 5$ пФ, $R_f = 100$ МОм.

Коэффициент передачи по напряжению определится из выражения

$$U_{out} / Q = -1 / C_f.$$

Таким образом, чувствительность усилителя составляет 200 мВ/пКл.

Постоянная времени входной цепи ЗЧУ $\tau = R_f C_f = 100[\text{Мом}] \cdot 5[\text{пФ}] = 500$ мкс определяет длительность экспоненциального “хвоста” выходного импульса, что должно учитываться при обработке для разделения двух близких импульсов [22, 23].

Основным ограничением для регистрации малых зарядов является собственный шум измерительного тракта. Полный шум измерительного тракта определяется среднеквадратичным шумовым зарядом (Equivalent Noise Charge, ENC) на входе ЗЧУ, приведенным ко входу, и шумом последующих каскадов SDR-приемника. Уровень собственных шумов RSP1 в низкочастотном режиме может составлять несколько микровольт. При чувствительности ЗЧУ 200 мВ/пКл шум SDR, равный 5 мкВ, будет эквивалентен шумовому заряду $q_{\text{noise,SDR}} = 0.025$ фКл, что практически не увеличивает общий уровень шумов.

Проведенный анализ показал, что значение минимального измеряемого заряда около 1 фКл является достижимым и обеспечивает запас по отношению сигнал/шум (SNR) не менее 5

при использовании связки операционного усилителя LTC6268 и RSP1. Для надежной регистрации одиночных частиц с зарядом менее 0.5 фКл потребуется дополнительная фильтрация сигнала или сужение полосы пропускания с соответствующей коррекцией формы импульса в GNU Radio.

При этом частота среза АЧХ SDR-приемника при экспериментальном исследовании составила 50 кГц, что превышает значение, указанное в документации на SDR. Исходя из этого, минимальная скорость регистрируемой микрочастицы, которую может зафиксировать предложенная система измерения, составляет 500 м/с при расстоянии между сетками C_2 и C_4 , равном 20 мм.

Рис. 7. АЧХ SDR RSP1 в области низких частот

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и экспериментально проверен метод регистрации заряженных микрочастиц на основе многоканального сеточного датчика с использованием современной SDR-технологии оцифровки и программной обработкой в GNU Radio. Показано, что использование доступного SDR-приемника RSP1 в качестве высокоскоростного АЦП с полосой 8 МГц позволяет с достаточной точностью измерять скорость микрочастиц в диапазоне от 0.5 до 10 км/с и оценивать их заряд в диапазоне от 1 фКл до 1 пКл. Преимуществами метода являются гибкость настройки, возможность детального программного анализа формы сигнала и низкая стоимость аппаратной части по сравнению со специализированными высокоскоростными системами сбора данных. Предложенный метод перспективен для применения в лабораторных стендах, учебных экспериментах и в качестве резервной или диагностической системы в более сложных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубралова Е.В., Пеклевский А.В., Прокопович С.П., Успенский Ф.А., Чикирев В.Н. // Космические исследования. 2025. Т. 63. № 2. С. 159
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82274725>
2. Duncan N., Sternovsky Z., Grun E. et al // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. P. 1446.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.06.002>
3. Ипатов А.В., Ведешин Л.А. // Труды ИПА РАН. 2022. № 62. С. 10.
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.62.10-14>
4. Дмитриук С.В. // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2(99). С. 56.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38240658>

6. *Мионов В.В., Толкач М.А.* // Космическая техника и технологии. 2022. № 1(36). С. 125.
<https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2022-1-125-143>
7. *Dikarev, V., Grün E., Baggaley J., Galligan D., Landgraf M., Jehn R.* // Adv. Space Res. 2005. V. 35. No. 7. P. 1282. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.014>
8. *Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A.J.* // Materials. 2022. V. 15. P. 3871.
<https://doi.org/10.3390/ma15113871>
9. *Воронов К.Е., Пияков И.В., Калаев М.П., Телегин А.М.* // ПТЭ. 2023. № 6. С. 135.
<https://doi.org/10.31857/s0032816223040183>
10. *Сухачев К.И., Телегин А.М., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А., Дорофеев А.С.* // ПТЭ. 2023. № 2. С. 46. <https://doi.org/10.31857/S003281622301024X>
11. *Калаев М.П., Телегин А.М., Воронов К.Е.* // ПТЭ. 2025. № 1. С. 154.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82690241> .
12. *Телегин А.М., Калаев М.П., Воронов К.Е.* // Прикладная физика. 2025. № 1. С. 5.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80456146> .
13. *Телегин А.М., Воронов К.Е., Шестаков Д.А.* // Инженерная физика. 2024. № 1. С. 49.
<https://doi.org/10.25791/infizik.1.2024.1381> .
14. *Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., Телегин А.М.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 83. <https://doi.org/10.31857/s0032816220060154> .
15. *Степаненко И.А.* // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6. № 4. С. 751. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36160255>
16. *Азаров А.В., Данилов Д.Ю., Зябриков С.Ю.* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2025. Т. 28. № 3. С. 37.
<https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.37-48> .
17. *Пияков А.В., Телегин А.М.* // ПТЭ. 2017. № 6. С. 101.
<https://doi.org/10.7868/s0032816217060131> .
18. *Telegin A.M.* // J. Commun. Technol. Electron. 2024. V. 69. № 4-6. P. 268.
<https://doi.org/10.1134/s1064226924700323> .
19. SDR приемник RSP1A от SDRplay;
https://ra4nal.ontvtime.ru/rsp1a.shtml?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera
20. *Пилюгин Н.Н., Тихомиров С.Г.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 2. С. 142.
21. *Герштейн Г.М.* Моделирование полей методом электростатической индукции. Москва: Наука, 1970.
22. *Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E., Srnata R.* // Adv. Space Res. 2017. V. 59. P. 1636. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.037>
23. *Иновенков А.Н., Константинов О.В., Пирогов В.И.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 9. С. 1.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки: K_1 ; K_2 – контрольные кольца Фарадея для регистрации скорости частицы, U_1 , U_2 – усилители колец Фарадея, БРЧ – блок регистрации частиц в составе ускорителя, C_1 – C_5 – сетки исследуемого датчика, ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель, SDR – программно-определяемый приемник.
- Рис. 2.** Датчик в сборе: 1 – сеточный детектор в сборе; 2 – зарядочувствительный усилитель; 3 – SDR RSP1.
- Рис. 3.** Структурная схема SDRplay RSP1: ФНЧ – фильтр низких частот, ФВЧ – фильтр высоких частот, ПФ – полосовой фильтр, РФ – режекторный фильтр (СВ – средневолновый, УКВ – ультракоротковолновый, ЦРВ – цифровое радиовещание), АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ЦОС – цифровая обработка сигналов.
- Рис. 4.** Сигнал на выходе SDR при пролете частицы.
- Рис. 5.** Схема обработки сигнала в GNU Radio: RSP1 Source – источник сигнала, WX GUI FFT Sink – графический анализатор спектра, Low Pass Filter – фильтр низких частот, High Pass Filter – фильтр высоких частот, WX GUI Scope Sink – блок визуализации осциллограммы, Threshold – пиковый детектор, Multiply Const – блок умножения на константу, Float to Short – блок перевода чисел с плавающей точкой в целые числа, Burst Tagger – блок пакетной передачи данных, File Sink – блок записи в файл на диск.
- Рис. 6.** Упрощенная схема обработки сигнала в GNU Radio: 1 – программно-определяемый приемник (SDR), 2 – преобразователь комплексных значений в действительные ($C\&R$), 3 – фильтр низких частот (LPF), 4 – фильтр высоких частот (HPF), 5 – блок визуализации спектра (HPF), 6 – блок визуализации осциллограммы (HPF), 7 – пиковый детектор (Peak), 8 – блок задержки сигнала (Peak), 9 – блок объединения потоков (Stream MUX), 10 – блок записи в файл на диск (FILE).
- Рис. 7.** Амплитудно-частотная характеристика SDR RSP1 в области низких частот.

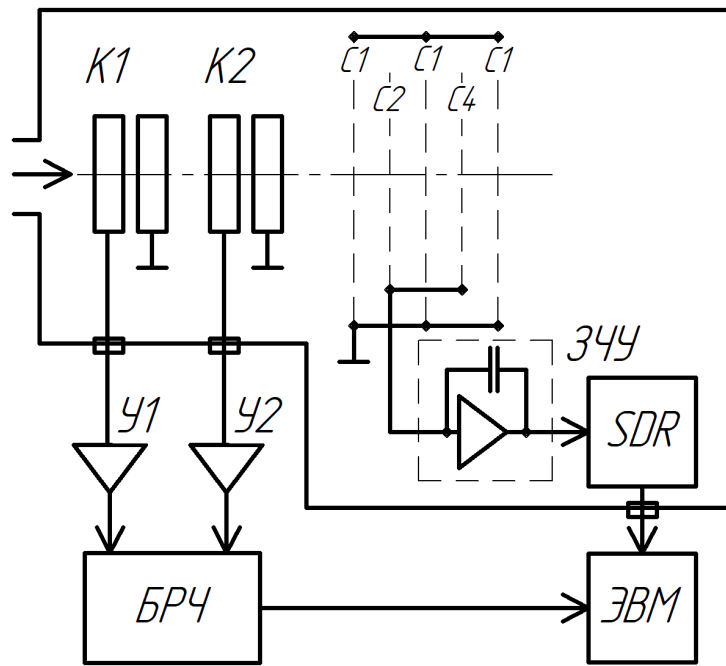


Рис. 1.

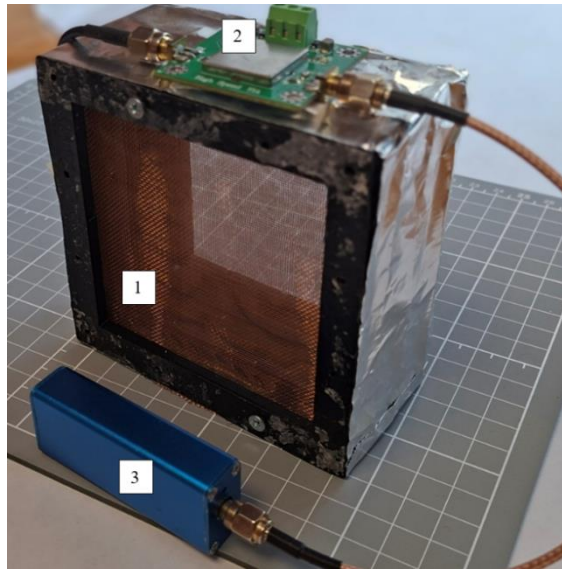


Рис. 2.

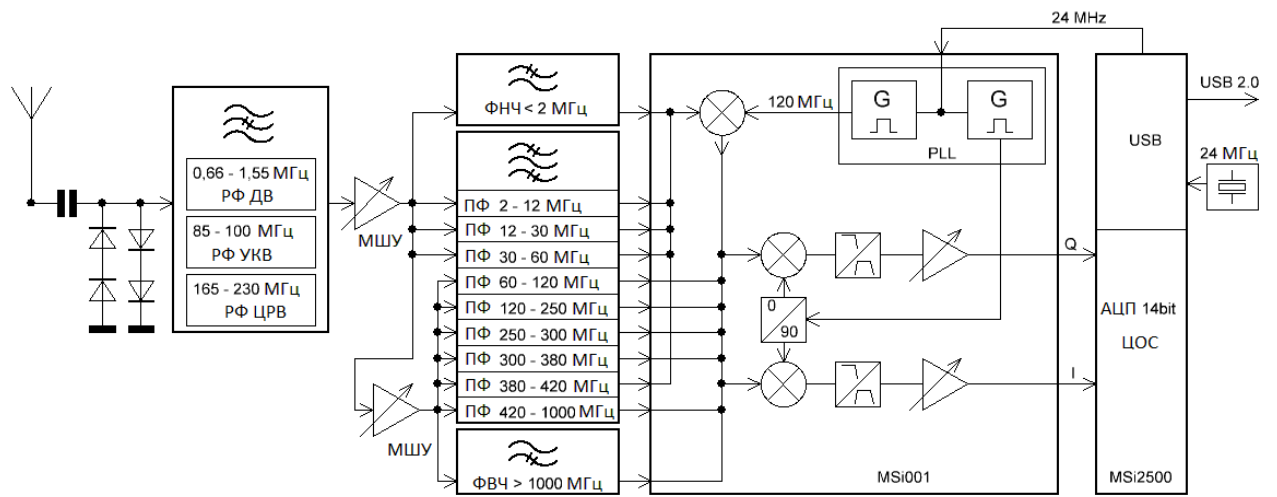


Рис. 3.

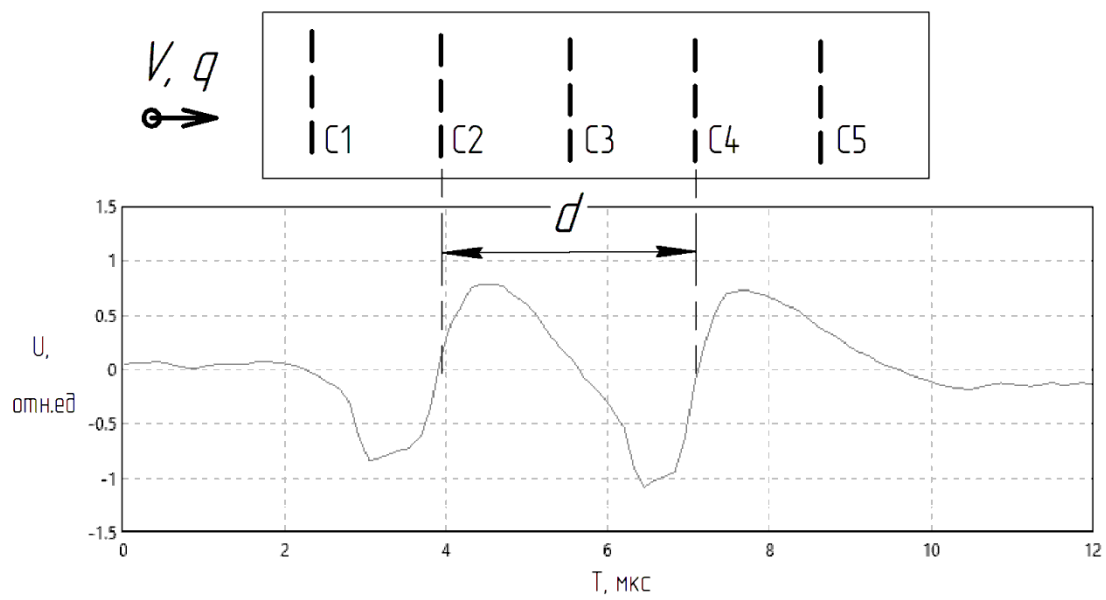


Рис. 4.

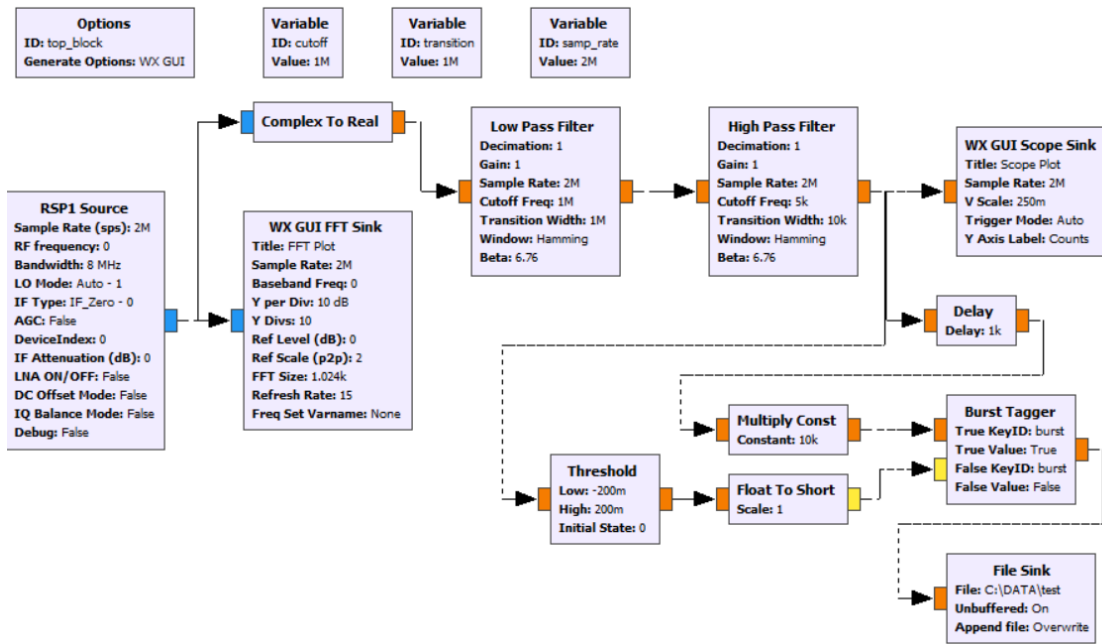


Рис. 5.

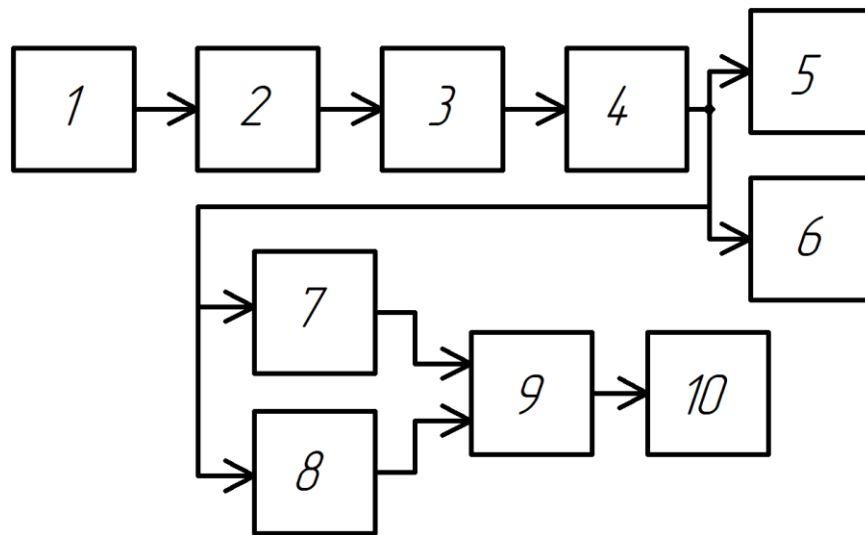


Рис. 6.

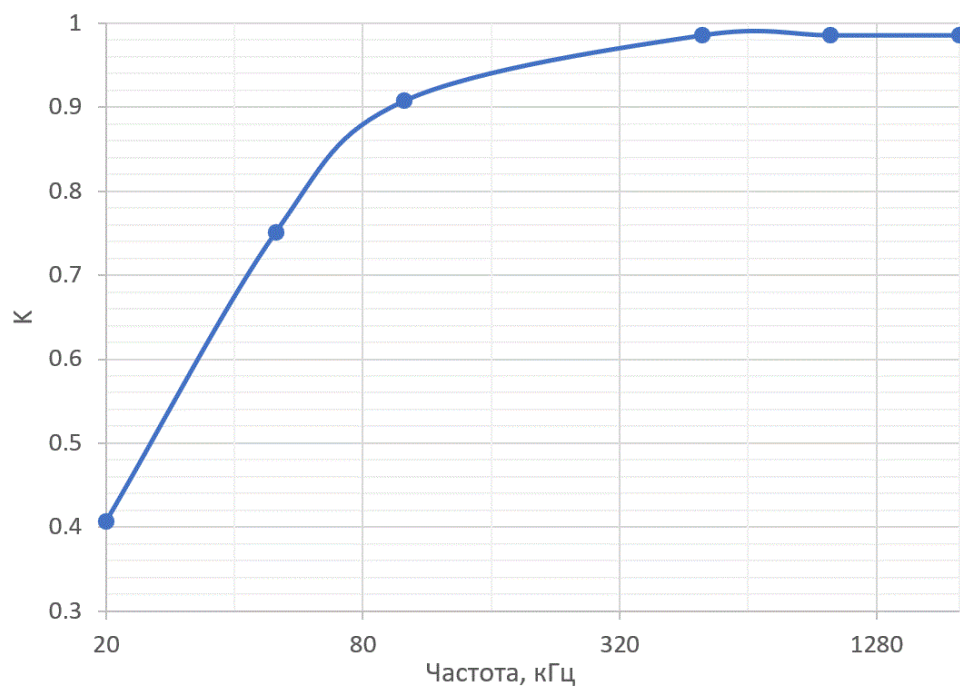


Рис. 7.