

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ЦИФРОВОГО ПРИЕМНИКА С СУБДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ В ПОЛОСЕ ДО 18 ГГц

Андрей Владимирович Смоляков<sup>1</sup>, Алексей Сергеевич Подстригаев<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина),  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ap0d@ya.ru✉

**Аннотация.** На макете исследован коэффициент шума цифрового приемника с субдискретизацией. С учетом отсутствия малошумящего усилителя на входе макета коэффициент шума составил 41...52 дБ в полосе 18 ГГц. Поскольку высокая неравномерность коэффициента шума приводит к сужению динамического диапазона, для ее компенсации целесообразно использовать соответствующие эквалайзеры и усилители. На основе результатов измерений выполнена оценка реальной чувствительности канала комплекса радиомониторинга, которая для указанной выше полосы частот составила –95...–86 дБВт.

**Ключевые слова:** субдискретизация, цифровой приемник с субдискретизацией, SDR, широкополосный анализ, коэффициент шума приемника

*Для цитирования:* Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Экспериментальное исследование коэффициента шума цифрового приемника с субдискретизацией в полосе до 18 ГГц // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-13)

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE NOISE FIGURE OF THE DIGITAL RECEIVER WITH UNDERSAMPLING UP TO 18 GHZ

Andrey V. Smolyakov<sup>1</sup>, Alexey S. Podstrigaev<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,

Saint Petersburg, Russia

ap0d@ya.ru✉

**Abstract.** Due to the expansion of the frequency range and the number of emitting radio-electronic means in many scientific and technical fields, performing a wideband analysis of the signal environment becomes necessary. For this, one can use a multichannel undersampling digital receiver (USDR). Such a receiver estimates a signal carrier frequency by unfolding its spectrum in each channel from the first Nyquist zone to the subsequent zones. The unfolded spectrum components in each channel are then compared with each other. The goal is to find the frequency at which the components from all channels coincide. This frequency is assumed to be the true carrier frequency of the received signal and not its alias. In this work, we investigated the USDR prototype, which does not contain a low-noise amplifier (LNA) at its input. Therefore, the prototype’s noise figure (NF) is high and reaches 41 ... 52 dB. However, using an input LNA can significantly reduce the total NF of the device. At the same time, one should bear in mind that with an increase in the LNA’s gain

above a certain value, the receiver's dynamic range begins to rapidly narrow. The resulting frequency dependence of the NF in the 18 GHz band has significant non-uniformity (11 dB). Therefore, when creating wideband analyzers to reduce the sensitivity variation, it is advisable to use equalizers and amplifiers with compensating frequency dependences of the NF and gain. Using the USDR with characteristics similar to those obtained for the prototype, we can achieve a  $-125... -116$  dBm sensitivity for the wideband analyzer. This sensitivity is high enough for the considered 18 GHz frequency band.

**Keywords:** undersampling, undersampling receiver, sub-Nyquist receiver, SDR, broadband analysis, wideband analysis, wideband sensing, receiver noise figure, receiver noise factor

**For citation:** Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S. Experimental study of the noise figure of the digital receiver with undersampling up to 18 ghz. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-13)

## Введение

Количество задач, решаемых различными радиоэлектронными средствами постоянно растет. Так, в последние десятилетия активно развиваются радиолокационные средства широкого назначения на воздушных и космических носителях [1–4], технологии мобильной сотовой связи (от GSM до 5G/6G) [5–6], телекоммуникационные устройства и сети – как большого (WiMax, LoRaWAN, NB-IoT, «Стриж» и др.), так и малого (ZigBee, Wi-Fi, WirelessHART и др.) радиуса действия [8–12], радиолокационные средства позиционирования для автомобильного транспорта и малых беспилотных летательных аппаратов [13, 15], наземные (надводные) распределенные средства создания локального навигационного поля [16,

17] и др. Увеличивается не только номенклатура радиоэлектронных средств, но и их количество. Поэтому во многих научно-технических областях (например, радиомониторинг, радио- и радиотехническая разведка, когнитивное радио и полуактивная радиолокация) возникает необходимость выполнения широкополосного анализа (ШПА) сигнальной обстановки.

Для решения задач ШПА в [18] предложено использовать многоканальный цифровой приемник с субдискретизацией (ЦПСД). Определение частоты в этом приемнике выполняется на основе развертывания спектра сигнала в каждом канале из первой зоны Найквиста в последующие зоны. Результаты разворота в каждом канале сравниваются между собой для поиска частоты, на которой составляющие спектра из всех каналов совпадают. Эта частота полагается истинной частотой принятого сигнала.

Для большинства задач, решаемых средствами ШПА, одной из наиболее важных характеристик является дальность обнаружения сигналов целевых объектов. Эта дальность зависит от чувствительности, и соответственно, коэффициента шума (КШ) ЦПСД. Однако при выполнении теоретического расчета КШ возникают различные ограничения, описанные ниже.

Соответственно, **целью** настоящей работы является экспериментальное исследование КШ ЦПСД. На основе полученных результатов будет выполнена оценка реальной чувствительности канала комплекса радиомониторинга, включающего в свой состав помимо ЦПСД входной малошумящий усилитель (МШУ) и другие элементы тракта.

## Методика определения КШ ЦПСД

Экспериментальное исследование КШ ЦПСД выполняется на макете приемника (рис. 1), спроектированном в соответствии с методикой, приведенной в [19].

Макет содержит следующие основные функциональные узлы: делитель мощности, устройства выборки-хранения (УВХ) 1–3, аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 1–3 и программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Полученные от АЦП сигналы обрабатываются в ПЛИС следующими программными модулями: предварительными обработчиками 1–3, модулями быстрого преобразования Фурье (БПФ) 1–3 и модулем определения частотно-временных параметров. Более подробное описание макета приведено в [20].

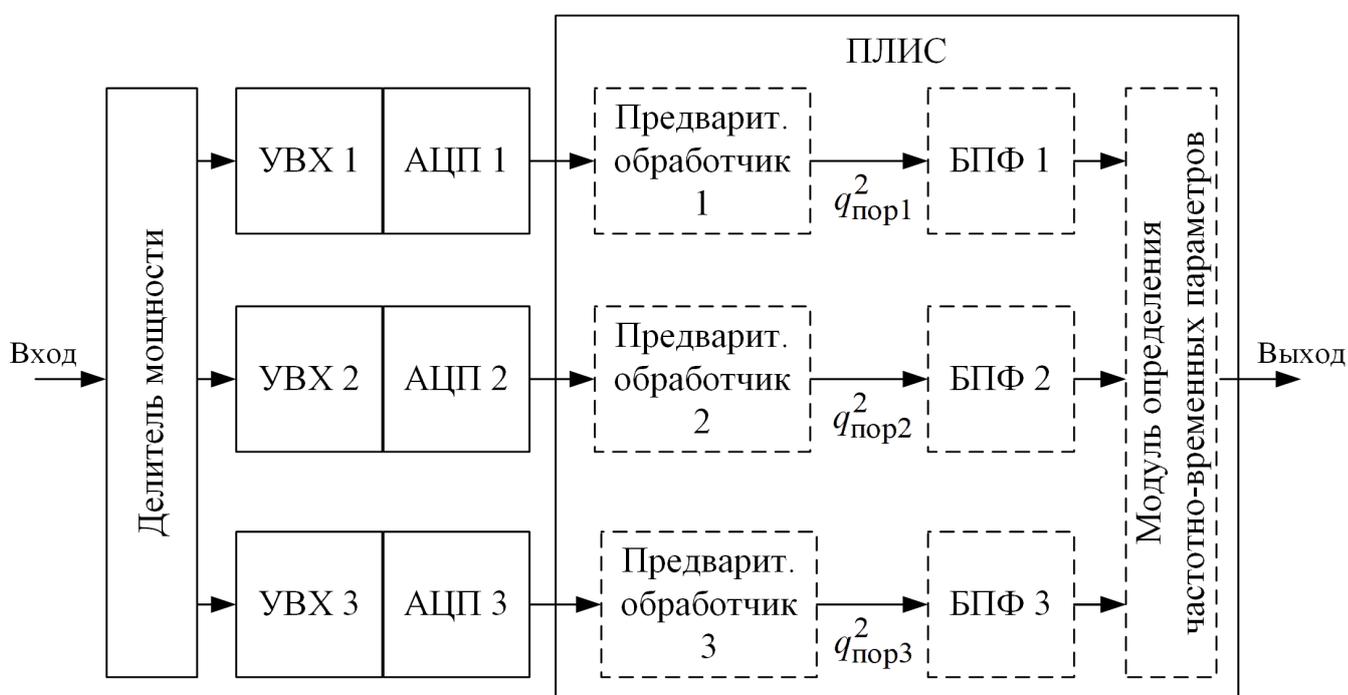


Рис. 1. Структурная схема макета

Поскольку средства ШПА, по определению, работают в широкой полосе, необходимо знать частотную зависимость КШ. Однако, определение КШ расчетным путем для интересующих частот зачастую невозможно, т.к. производители АЦП и УВХ часто предоставляют необходимые для расчета их КШ данные только для 2...3 комбинаций рабочих параметров (частота дискретизации, частота входного сигнала, шумовая полоса и т.п.). Это вынуждает принимать КШ АЦП и УВХ одинаковыми во всем диапазоне частот, даже если значения рабочих параметров, для которых они рассчитаны, отличаются от используемых на практике.

Прямое измерение КШ макета ЦПСД наиболее просто может быть выполнено трехдецибелльным методом («методом с использованием генератора сигналов») [21]. Однако даже этот метод является длительным и трудоемким, поскольку требует измерения частотной зависимости КШ каждого канала ЦПСД. Анализатор спектра при этом реализуется в ПЛИС.

В то же время, КШ может быть вычислен по выражению для реальной чувствительности приемника  $P_{0p}$  [22]:

$$P_{0p} = kT\Delta f_{ш}F_{\Sigma}q_{пор}^2 \approx 1,1kT\Delta f_{рч}F_{\Sigma}q_{пор}^2, \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – температура окружающей среды, К;  $\Delta f_{ш} \approx 1,1\Delta f_{рч}$  – эквивалентная полоса шума приемника [22], Гц;  $\Delta f_{рч}$  – ширина ДРЧ приемника, Гц;  $F_{\Sigma}$  – суммарный шум-фактор приемника (включая АЦП);  $q_{пор}^2$  – заданное минимальное (пороговое) отношение сигнал-шум (ОСШ) на выходе АЦП (выходе предварительного обработчика, шумами которого можно

пренебречь), необходимое для обработки сигнала с заданными показателями качества.

Соответственно, для определения КШ требуется знать реальную чувствительность  $P_{0p}$  и ОСШ  $q_{пор}^2$ , которые можно автоматизировано определить с помощью технологического программного обеспечения (ТПО) [20]. В связи с этим далее используется следующая методика определения КШ ЦПСД в заданном диапазоне рабочих частот (ДРЧ):

1. Определить минимальное значение ОСШ  $q_{пор}^2$ , необходимое ЦПСД для корректной обработки сигнала.

1.1. Рассчитать КШ УВХ и АЦП для значений рабочих параметров, наиболее близких к используемым на практике.

1.2. Измерить коэффициент передачи (КП) и КШ делителя мощности на 2...3 тестовых частотах из ДРЧ.

1.3. Вычислить для этих тестовых частот суммарный КШ приемника.

1.4. На тех же тестовых частотах измерить реальную чувствительность ЦПСД.

1.5. По данным, полученным в пп. 1.1–1.4 алгоритма, вычислить  $q_{пор}^2$ .

Отношения, полученные для тестовых частот, должны совпадать с точностью до погрешности измерений.

2. С помощью ТПО измерить реальную чувствительность ЦПСД во всем ДРЧ с требуемым шагом по частоте.

3. По требуемому ОСШ и реальной чувствительности ЦПСД рассчитать его КШ в ДРЧ.

## Оценка коэффициента шума ЦПСД

По спецификациям УВХ и АЦП, предоставленным их производителями, оценивается КШ данных микросхем для значений рабочих параметров, наиболее близких к используемым на практике.

Поскольку входной делитель мощности является пассивным СВЧ-устройством, его КШ определяется как величина, равная по модулю КП, но взятая с отрицательным знаком [22]. Это справедливо при согласовании делителя мощности по входу и выходу. Величину КП для определения КШ можно измерить с помощью анализатора цепей.

Разрядность вычислений в тракте цифровой обработки, реализованном в ПЛИС, выбирается так, чтобы шумы квантования в нем были значительно ниже шумов квантования АЦП. Поэтому КШ данного тракта можно пренебречь.

Суммарный КШ делителя мощности, УВХ и АЦП вычисляется по формуле Фрииса [23, 22] на основе характеристик каждого из данных компонентов.

КШ АЦП можно определить по выражению [1]:

$$N_{\text{АЦП}} = P_{\text{вх.с}} - q^2 - 10 \lg(F_{\text{д}}/2) + 174, \quad (2)$$

где  $P_{\text{вх.с}}$  [дБм] – уровень мощности входного сигнала, для которого в спецификации указаны параметры АЦП,  $q^2$  – ОСШ, обеспечиваемое на выходе АЦП в заданном режиме работы,  $F_{\text{д}}$  – частота дискретизации.

Выражение (2) получено при  $T = 283$  К в предположении, что спектральная плотность мощности собственных шумов АЦП превышает величину спектральной плотности мощности входных шумов.

КШ УВХ определяется аналогично. Производитель, однако, может указать в спецификации не величину  $q^2$ , а величину интегрального уровня шумов  $U_{\text{инт}}$  в милливольтках. Тогда, выражение для КШ УВХ можно записать как

$$N_{\text{УВХ}} = 101\text{g}\left(\frac{U_{\text{инт}}^2}{R}\right) - 101\text{g}(\Delta f_{\text{ш}}) + 174,$$

где  $R$  – сопротивление нагрузки УВХ,  $\Delta f_{\text{ш}}$  – полоса частот, в которой измерена величина  $U_{\text{инт}}$ .

**Результаты оценки.** Расчетный КШ АЦП, использованного в макете ЦПСД, при рабочих параметрах, наиболее близких к используемым в макете, составил около 30 дБ. КШ УВХ, входящего в макет, при аналогичных значениях рабочих параметров составил 26 дБ.

В качестве тестовых частот для оценки минимально необходимого для обработки ОСШ были выбраны частоты 2, 8 и 18 ГГц. Коэффициент передачи используемого в приемнике делителя мощности на данных частотах составил минус 16, минус 20 и минус 24 дБ соответственно.

Расчетный суммарный КШ ЦПСД, таким образом, на частоте 2 ГГц равен 48 дБ, на частоте 8 ГГц – 52 дБ, на частоте 18 ГГц – 60 дБ.

### **Оценка реальной чувствительности ЦПСД**

Для оценки реальной чувствительности ЦПСД на вход приемника подается непрерывный сигнал с СВЧ-генератора. С помощью ТПО оцениваются показатели качества работы приемника (наличие факта обнаружения сигнала и величины ошибок

измерения его частотно-временных параметров) [20]. Измерения выполняются для тех же частот, для которых была произведена оценка КШ компонентов ЦПСД.

Проведенные измерения показали, что реальная чувствительность ЦПСД на частоте 2 ГГц составляет минус 57 дБВт, на частоте 8 ГГц – минус 52 дБВт и на частоте 18 ГГц – минус 45 дБВт.

### Оценка порогового отношения сигнал-шум

Минимальное ОСШ, необходимое для обработки, вычисляется из (1).

Результаты описанных измерений и расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оценки минимально необходимого ОСШ

Частота, ГГц	Делитель		УВХ		АЦП	N, дБ	P <sub>0</sub> , дБВт	q <sup>2</sup> <sub>пор</sub> , дБ
	КП, дБ	КШ, дБ	КП, дБ	КШ, дБ	КШ, дБ			
2	-16	16	0	≈26	≈30	48	-57	-4
8	-20	20	0			52	-52	-3
18	-24	24	-5			60	-45	-4

С поправкой на погрешность оценки КШ тракта, полученное пороговое ОСШ практически не зависит от частоты сигнала. Это свидетельствует о корректности оценки. Далее примем  $q_{\text{пор}}^2 = -3$  дБ.

### Оценка реальной чувствительности ЦПСД в ДРЧ

На рис. 2 представлен график зависимости реальной чувствительности ЦПСД от частоты во всем ДРЧ. График получен с помощью ТПО по алгоритму, описанному выше.

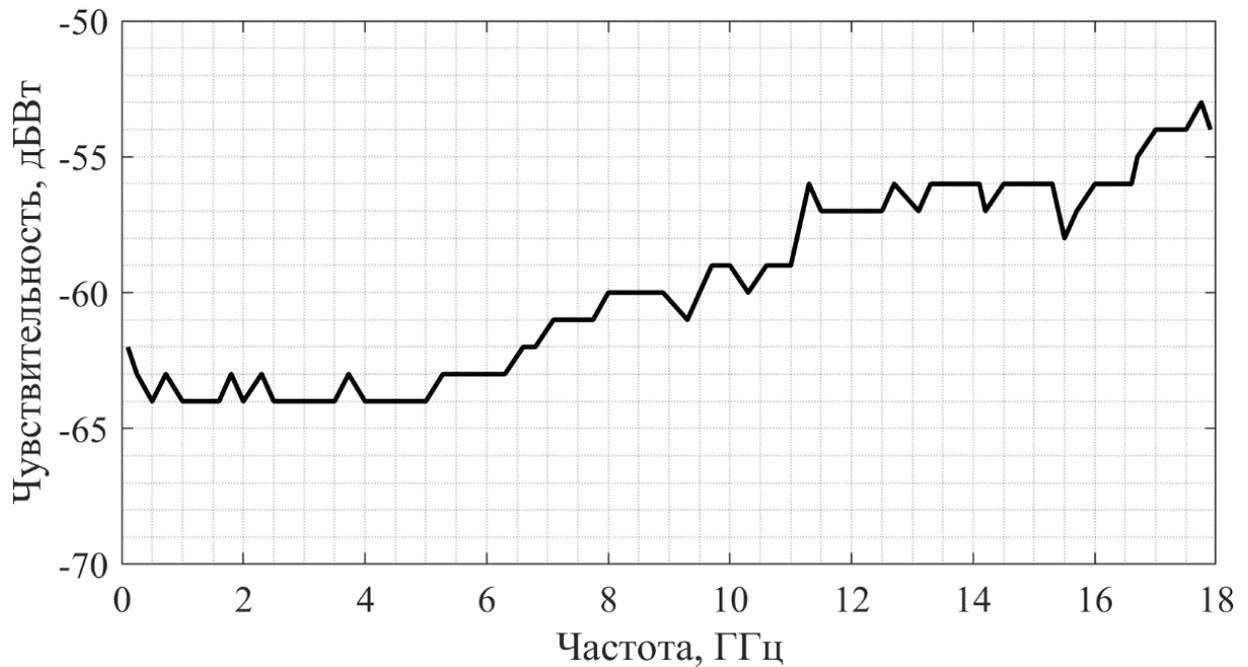


Рис. 2. Частотная зависимость реальной чувствительности ЦПСД

Из графика на рис. 2 видно, что реальная чувствительность ЦПСД в нижней части ДРЧ достигает  $-64$  дБВт и ухудшается при повышении частоты до  $-53$  дБВт. Отметим, что значения получены для макета, в котором отсутствует входной МШУ.

### Оценка КШ ЦПСД в ДРЧ

Данные о реальной чувствительности ЦПСД в ДРЧ (рис. 2) и значении минимального ОСШ, необходимого для обработки сигнала, позволяют получить график частотной зависимости КШ ЦПСД (рис. 3).

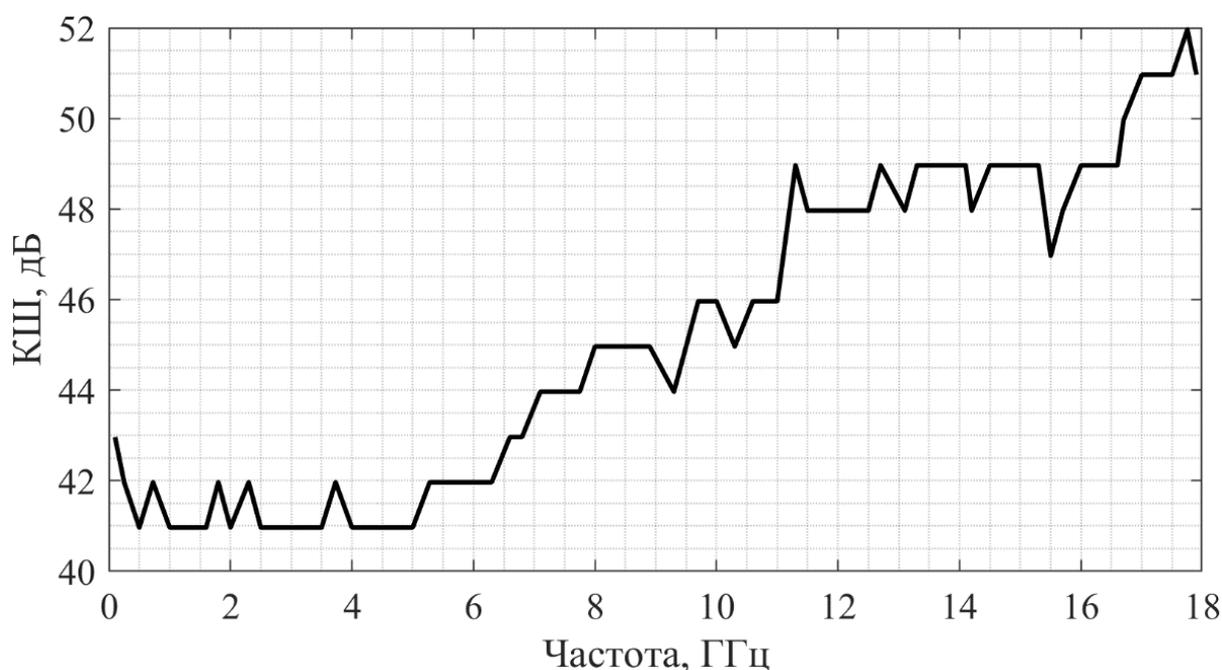


Рис. 3. Частотная зависимость КШ ЦПСД

График на рис. 3 показывает, что КШ ЦПСД в нижней части ДРЧ достигает 41 дБ и повышается с ростом частоты до 52 дБ.

Следует понимать, что эти значения получены для макета, в котором отсутствует входной МШУ. При установке МШУ на вход приемника его КШ может быть значительно снижен. Однако также следует учитывать, что при существенном усилении МШУ начинает сужаться динамический диапазон приемника.

**Пример определения реальной чувствительности средства ШПА, использующего ЦПСД**

Реальная чувствительность является одной из основных характеристик средств ШПА, определяющей такую их системную характеристику, как дальность действия.

Определенные выше частотные зависимости КШ и КП ЦПСД и те же характеристики используемого перед ЦПСД аналогового тракта позволяют определить реальную чувствительность средства ШПА.

В качестве примера рассчитаем реальную чувствительность широкополосного приемного канала комплекса радиомониторинга, в котором для обработки сигналов используется описанный ЦПСД. Считаем, что перед приемником расположен аналоговый тракт, характеристики которого приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики аналогового тракта рассматриваемого комплекса радиомониторинга

Частота, ГГц	КП, дБ	КШ, дБ
0...8	35	8
8...14	37	7
14...18	34	10

Тогда частотная зависимость реальной чувствительности приемного канала комплекса радиомониторинга будет соответствовать величине, представленной на рис. 4.

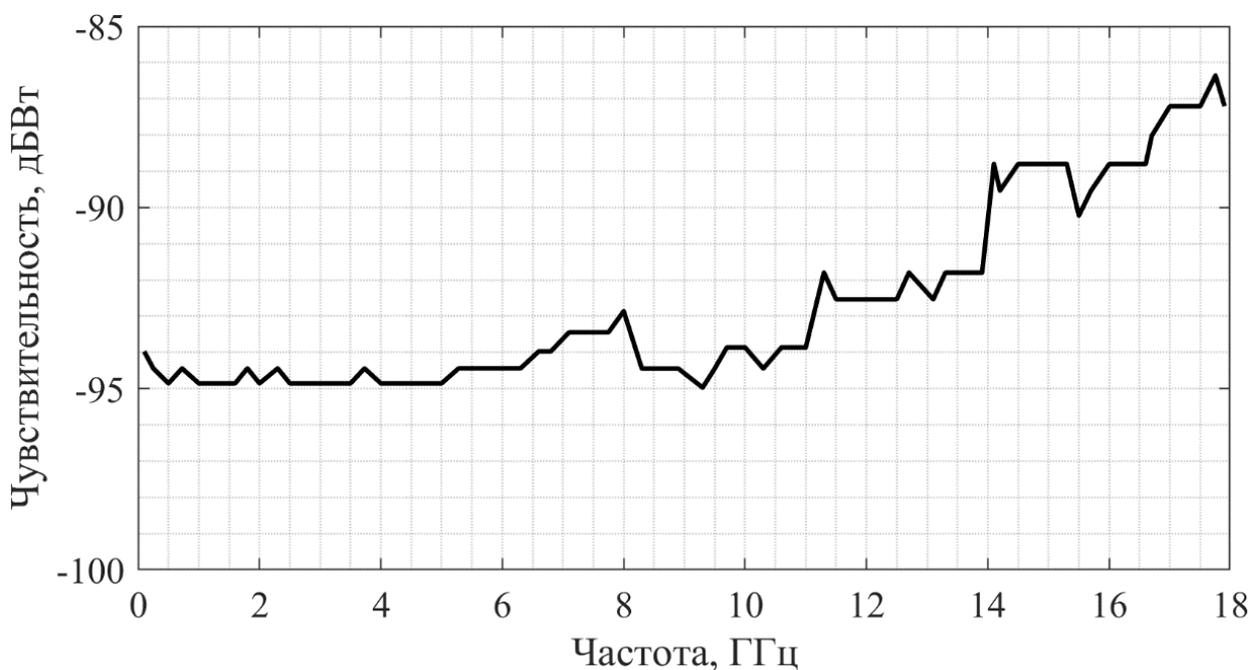


Рис. 4. Реальная чувствительность широкополосного приемного канала комплекса радиомониторинга

Как видно из графика на рис. 4, реальная чувствительность средства ШПА в нижней части ДРЧ достигает  $-95$  дБВт и ухудшается при повышении частоты до  $-86$  дБВт. Соответственно, неравномерность чувствительности такого средства ШПА составляет 9 дБ.

### **Выводы**

1. Исследованный в настоящей работе макет ЦПСД не содержит на входе МШУ. Поэтому КШ макета достигает 41...52 дБ. При использовании входного МШУ общий КШ тракта может быть существенно снижен. В то же время, стоит учитывать, что при увеличении КП МШУ выше определенной величины начинает стремительно сужаться динамический диапазон приемного тракта.

2. Полученная частотная зависимость КШ в полосе 18 ГГц имеет неравномерность 11 дБ. Соответственно, КП тракта также имеет значительную неравномерность. При этом верхняя граница ДД СШПА часто фиксирована и ограничена величиной входной мощности АЦП, соответствующей его полному диапазону. Это приводит к тому, что в участках частотного диапазона, имеющих высокий КП, возрастает чувствительность, но сужается ДД. Сужение ДД в диапазоне частот может быть более критичным, чем ухудшение чувствительности. Поэтому при создании средств ШПА для уменьшения разброса чувствительности целесообразно использовать эквалайзеры и усилители с компенсирующими частотными зависимостями КП и КШ.

3. При использовании ЦПСД с характеристиками, аналогичными полученным для макета, может быть реализовано средство ШПА с реальной чувствительностью

около  $-95\dots-86$  дБВт. Такая чувствительность является достаточно высокой для рассматриваемой полосы частот 18 ГГц.

### **Список источников**

1. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75662>
2. Купряшкин И.Ф., Соколик Н.В. Алгоритм обработки сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением в интересах обнаружения малозаметных воздушных объектов, оценки их дальности и скорости движения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 1. С. 39 - 55. DOI: [10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47)
3. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. - Воронеж: Научная книга, 2014. - 460 с.
4. Верба В.С.(ред), Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. - М.: Радиотехника, 2010. - 680 с.
5. Nayak S., Patgiri R. 6G communication: Envisioning the key issues and challenges // EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 2020. DOI:[10.4108/eai.11-11-2020.166959](https://doi.org/10.4108/eai.11-11-2020.166959)
6. Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Баскаков А.Е. Разработка модели сегмента сети SDN для стандарта 5G // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=122307>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-07)

7. Волков А.С., Солодков А.В., Цымляков Д.В. Разработка программно-аппаратного стенда для исследования характеристик полярных кодов // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121017>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-07)
8. Малышев В.Н. и др. Применение беспроводных технологий в системах управления промышленными объектами. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. - 160 с.
9. Еремин В.С., Прохоров П.В. Обзор технологии Wi-Fi Mesh и требования к защищенным самоорганизующимся сетям на основе Wi-Fi // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 12. С. 37-44.
10. Асадуллин Р.Н. и др. Реализация точек доступа Wi-Fi, интегрированных в имеющиеся элементы городской инфраструктуры // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6(7). С. 6-11. DOI: [10.18127/j00338486-201906\(7\)-02](https://doi.org/10.18127/j00338486-201906(7)-02)
11. Казак П.Г., Шевцов В.А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)
12. Petrov A.A., Davydov V.V., Grebenikova N.M. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 2018, pp. 641-648. DOI: [10.1007/978-3-030-01168-0\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_58)
13. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография. - М.: Радиотехника, 2020. - 280 с.

14. Биусова В.А., Кочетов А.В., Комаров Г.В., Панфилов П.С., Парусов В.А. Автомобильная сверхкороткоимпульсная радиолокационная станция обеспечения безопасности движения и контроля дорожной обстановки // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 26-30. DOI: [10.21778/2218-5453-2019-9-26-30](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-9-26-30)
15. Антипов В.Н. и др. Радиолокационная система беспилотного летательного аппарата // Радиотехника. 2006. № 7. С. 14-20.
16. Владыко А.Г., Иванов С.А., Пархоменко Н.Г., Ульянов Г.Н. Оценка точности определения координат БПЛА модифицированными разностно-дальномерным и дальномерным методами // Морская радиоэлектроника. 2011. № 4 (38). С. 8-11.
17. Nikolaev D., Chetiy V., Dudkin V., Davydov V. Determining the location of an object during environmental monitoring in conditions of limited possibilities for the use of satellite positioning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Saint-Petersburg, 2020, pp. 012052. DOI: [10.1088/1755-1315/578/1/012052](https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012052)
18. Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Характеристики обнаружения цифрового приемника с субдискретизацией // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 95-107. DOI: [10.18127/j00338486-202109-09](https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-09)
19. Подстригаев А.С. Методика проектирования сверхширокополосного цифрового приемника с субдискретизацией // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 10. С. 11–17. DOI: [10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17)
20. Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при односигнальном воздействии // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=162661>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-14](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-14)

21. Бельчиков С. Коэффициент шума. Теория и практика измерений. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2008. С. 174-178. URL: <https://kit-e.ru/measure/koefficient-shuma-2/>
22. Фомин Н.Н., Буга Н.Н., Головин О.В. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия-Телеком, 2007. - 520 с.
23. Friis H.T. Noise figures of radio receivers // Proceedings of the IRE, 1944, vol. 32 (7), pp. 419-422. DOI: [10.1109/JRPROC.1944.232049](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1944.232049)
24. Karki J. Calculating noise figure and third-order intercept in ADCs // Analog Applications Journal, 4Q 2003, pp. 11-16. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt090/slyt090.pdf>

## References

1. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75662>
2. Kupryashkin I.F., Sokolik N.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 39 - 55. DOI: [10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47)
3. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P. *Kosmicheskaya radiolokatsionnaya s'emka zemnoi poverkhnosti v usloviyakh pomekh* (Space radar survey of the earth's surface in jamming conditions), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2014, 460 p.

4. Verba V.S., Neronskii L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based ground survey radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.
5. Nayak S., Patgiri R. 6G communication: Envisioning the key issues and challenges, *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2020. DOI: [10.4108/eai.11-11-2020.166959](https://doi.org/10.4108/eai.11-11-2020.166959)
6. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Baskakov A.E. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=122307>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-07)
7. Volkov A.S., Solodkov A.V., Tsymlyakov D.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121017>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-07)
8. Malyshev V.N. et al. *Primenenie besprovodnykh tekhnologii v sistemakh upravleniya promyshlennymi ob"ektami* (Application of wireless technologies in industrial control systems), Saint Petersburg, SPbGJeTU «LJeTI», 2019, 160 p.
9. Eremin V.S., Prokhorov P.V. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2010, no. 12, pp. 37-44.
10. Asadullin R.N. et al. *Radiotekhnika*, 2019, vol. 83, no. 6 (7), pp. 6-11. DOI: [10.18127/j00338486-201906\(7\)-02](https://doi.org/10.18127/j00338486-201906(7)-02)
11. Kazak P.G., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)
12. Petrov A.A., Davydov V.V., Grebenikova N.M. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems, *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, 2018, pp. 641-648. DOI: [10.1007/978-3-030-01168-0\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_58)

13. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Ryazantsev L.B. *Malogabaritnye mnogofunktsional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* (Small-sized multifunctional radar with continuous frequency-modulated radiation), Moscow, Radiotekhnika, 2020, 280 p.
14. Biyusova V.A., Kochetov A.V., Komarov G.V., Panfilov P.S., Parusov V.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 9, pp. 26-30. DOI: [10.21778/2218-5453-2019-9-26-30](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-9-26-30)
15. Antipov V.N. et al. *Radiotekhnika*, 2006, no. 7, pp. 14-20.
16. Vladyko A.G., Ivanov S.A., Parkhomenko N.G., Ul'yanov G.N. *Morskaya radioelektronika*, 2011, no. 4 (38), pp. 8-11.
17. Nikolaev D., Chetiy V., Dudkin V., Davydov V. Determining the location of an object during environmental monitoring in conditions of limited possibilities for the use of satellite positioning, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Saint-Petersburg*, 2020, pp. 012052. DOI: [10.1088/1755-1315/578/1/012052](https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012052)
18. Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 9, pp. 95-107. DOI: [10.18127/j00338486-202109-09](https://doi.org/10.18127/j00338486-202109-09)
19. Podstrigaev A.S. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2021, vol. 15, no. 10, pp. 11–17. DOI: [10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17)
20. Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162661>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-14](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-14)
21. Bel'chikov S. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, pp. 174-178. URL: <https://kit-e.ru/measure/koefficient-shuma-2/>
22. Fomin N.N., Buga N.N., Golovin O.V. *Radiopriemnye ustroistva* (Radio Receivers), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2007, 520 p.

23. Friis H.T. Noise figures of radio receivers, *Proceedings of the IRE*, 1944, vol. 32 (7), pp. 419-422. DOI: [10.1109/JRPROC.1944.232049](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1944.232049)

24. Karki J. Calculating noise figure and third-order intercept in ADCs, *Analog Applications Journal*, 4Q 2003, pp. 11-16. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt090/slyt090.pdf>

Статья поступила в редакцию 27.12.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 27.12.2021; approved after reviewing on 20.01.2022; accepted for publication on 21.02.2022.