

Труды МАИ. 2022. № 127  
Trudy MAI, 2022, no. 127

Научная статья  
УДК 621.396.49  
DOI: [10.34759/trd-2022-127-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-12)

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЕРКИ USRP ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОСИСТЕМ

Артём Андреевич Абрамов<sup>1✉</sup>, Никита Александрович Якуш<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

<sup>1</sup>[artyom.abramov662@yandex.ru](mailto:artyom.abramov662@yandex.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[yachkuch@gmail.com](mailto:yachkuch@gmail.com)

*Аннотация.* Данная работа посвящена разработке и апробации методики поверки устройств серий USRP 29xx для выполнения высокоточных экспериментальных исследований для решения задач широкого спектра в сфере инфокоммуникаций с помощью радиокomплекса Омега.

Предметом исследования являются рекомендации по выполнению высокоточных экспериментальных исследований, а также оценка эффективности использования программно-аппаратного комплекса на платформе NI.

*Ключевые слова:* Беспроводные сети, SDR, USRP, IEEE 802.11, частотный спектр, прототипирование радиосистем, высокоточный эксперимент.

*Для цитирования:* Абрамов А.А., Якуш Н.А. Разработка методики поверки USRP для высокоточного исследования радиосистем // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI:

[10.34759/trd-2022-127-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-12)

Original article

## DEVELOPMENT OF USRP VERIFICATION METHODOLOGY FOR HIGH-PRECISION RADIO SYSTEM RESEARCH

Artyom A. Abramov<sup>1</sup>, Nikita A. Yakush<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,

Moscow, Russia

[artyom.abramov662@yandex.ru](mailto:artyom.abramov662@yandex.ru)✉

[yachkuch@gmail.com](mailto:yachkuch@gmail.com)

**Abstract.** Currently, in telecommunications, there are problems of inefficient use of spectrum [3], the inability to flexibly control hardware devices, which have led to an increasing interest in software-controlled radio (SDR), which has proven itself as a reliable system for thorough analysis of radio frequency signals with the possibility of flexible control and modification [4].

One of the prominent representatives of SDR is the high-precision and inexpensive USRP 2901 model from the 29xx series from National Instruments, capable of solving the problems of prototyping radio systems, radio reconnaissance, direction finding, creating local positioning systems, developing coherent multi-channel transceiver systems and solving other important problems in the aerospace sphere.

This work is devoted to the development and testing of the method of verification of USRP 29xx series devices for high-precision experimental studies for solving problems of a wide range in the field of information communications using the Omega radio complex.

The subject of the study is the evaluation of the effectiveness of using SDR on the NI platform.

To obtain the data closest to the true ones, to exclude the maximum number of different types of errors, the work analyzed in detail the plan and stages of experiments, in particular, the planning of experiments at the tactical level, the description of which is indicated in the publications [18, 19]. The calculation of the required sample ensures the required probability and reliability of the results [20]. However, there is no information in the technical documentation for USRP devices that they can be used for high-precision research. After planning the experiments, a method for verifying devices was developed, which included specific 6 stages of experiments that evaluate physical values that characterize the accuracy and quality of USRP equipment.

The following results were obtained as a result of testing this method:

1. The frequency error of the transmitted signal is determined and recommendations for setting the frequency shift function of the generator are proposed.
2. A decrease in the average signal power in the middle of the Wi-Fi band (2.4 GHz) was recorded. Hence, weak signals will be less efficient to transmit over a given range.
3. Linear and uniform amplification of the radio signal was noted, regardless of the selected frequency, when the gain deviates not more than 5 dB from the average value, which is much better than, for example, the RTL-SDR amplifier.
4. It is advisable to use an amplifier on Wi-Fi radio channels only up to 54 dB, then it is irrational.
5. Connecting a power supply to USRP does not significantly affect the shape of the spectrum unless both channels of the USRP device are used.

**Keywords:** Wireless networks, SDR, USRP, IEEE 802.11, frequency spectrum, prototyping of radio systems, high-precision experiment

**For citation:** Abramov A.A., Yakush N.A. Development of usrp verification methodology for high-precision radio system research. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-12)

## Введение

Сегодня беспроводные сети получили повсеместное распространение, зарекомендовавшие себя как мобильные и гибкие системы [1]. Но использование такого оборудования множеством пользователей приводит к сильной загруженности выделенной области частот [2]. Отсюда возникает необходимость более эффективного использования радиочастотного спектра [3] в авиационно-ракетной космической и другой технике.

Возможность гибкой регулировки когнитивного радио (CR) в зависимости от окружающей радиообстановки сделала модель популярной в мире связи [4]. Применение технологии представляется возможным в различных областях, таких как военная, общественная, государственная, коммерческая и безопасность. В целом, можно выделить следующие наиболее частые применения когнитивного радио: эффективное использование спектра [5], повышение надежности связи, использование как радиоприемник с низкой стоимостью, расширение методов SDR (Software-Defined Radio) и автоматизированное управление радиоресурсами. Таким образом, такие проблемы, как неэффективное использование спектра, невозможность

гибкого управление аппаратными устройствами и другие причины привели к все большему возрастанию интереса к SDR [6, 7].

### **Обоснование выбора оборудования программно-аппаратного комплекса.**

#### **Особенности аппаратных компонентов USRP**

Как отмечено в статье [5], сегодня наиболее развитой архитектурой реализации SDR является универсальная периферия программного радио (USRP) от компании National Instruments. Её потенциальные возможности отвечают всем необходимым требованиям, позволяя разрабатывать программно-управляемые приемопередатчики, адаптируемые под конкретные применения для эффективного использования спектра [8]. Стоит отметить, что самая дешевая версия USRP-2900/2901 уже поддерживает значительный диапазон работы вплоть до 6 ГГц [9].

SDR представляет собой технологию, в которой для реализации функций радиосвязи используются программные модули, выполняемые на аппаратной платформе общего назначения [10, 11]. Платформа NI USRP вместе с программным обеспечением LabVIEW формирует гибкую и функциональную платформу SDR [11] для быстрого прототипирования беспроводных систем связи, включая разработку физического уровня, запись и воспроизведение сигналов, радиотехническую разведку, проверку правильности алгоритмов и т.д.

### **Обоснование выбора дополнительного оборудования для экспериментального исследования**

Безусловно, для высокоточных исследований необходимо проводить поверку оборудования. Чтобы получить данные, наиболее близкие к истинным, исключить максимальное количество различных видов погрешностей (ошибок), вначале

необходимо детально проанализировать план и этапы экспериментов [8]. Следует рассчитать требуемую выборку для обеспечения необходимой вероятности и достоверности результатов. Необходимо разработать программно-аппаратный комплекс для поверки характеристик радиомодулей устройств USRP и эффективности их работы, а также важно сформулировать методику метрологического обеспечения выполнения высокоточных экспериментальных исследований.

Среди возможных вариантов использования измерительного оборудования [12] выбор был сделан в пользу высокоточного радиоконкомплекса Омега. Согласно документации [13], комплекс обладает высокой скоростью обзора (850 МГц/с), чувствительностью (-100 дБм), разрешающей способностью, а также малой величиной абсолютной погрешности определения частоты (0,2 кГц) в режиме анализа, что позволяет ему быстро и надёжно выявлять и оценивать параметры любых источников сигналов и радиоизлучений в диапазоне частот от 0,6 кГц до 18 ГГц. Данные характеристики позволяют решать задачи: сканирования диапазона частот работы беспроводных сетей при высокой скорости анализа и построения спектрограмм, а также при высокой точности получаемых данных как по значению уровня сигнала, так и по значению частоты. Это является обоснованием использования устройства в рамках разработки программно-аппаратного комплекса для поверки характеристик радиомодулей устройств USRP.

### **Актуальность применения USRP и анализ выбора оборудования**

Задачи, на выполнение которых способна платформа NI USRP, может иметь следующее практическое применение [11, 14, 15], особенно в сфере

телекоммуникаций наземного и аэрокосмического применения: имитация радиointерфейсов, создание системы локального позиционирования, радиолокационные приложения, системы контроля использования спектра, радиоразведка, пеленгация, спуфинг, приёмопередатчик на основе SDR, разработка новых алгоритмов связи и передачи данных, проектирование беспроводных стандартов связи, когерентные многоканальные приёмо-передающие системы, цифровая обработка и формирование ВЧ сигналов в реальном времени, перехват сигналов GSM и др.

Как видно из перечня возможных применений, USRP способен выполнять множество различных задач. Для каждой специфики существует соответствующее решение на базе данной платформы NI. Благодаря диапазонам частот от 10 МГц до 6 ГГц, ширины полосы вплоть до 180 МГц, мощным FPGA, ориентированным на DSP (Digital Signal Processor), и форм-факторам, начиная от портативных устройств и заканчивая системами с высоким количеством каналов, USRP может удовлетворить практически любые потребности от проектирования до развертывания радиосистем [16].

Анализ характеристик различных решений на базе платформы NI USRP предоставляет возможность оптимального выбора оборудования для решения конкретных задач. Например, одним из примеров применения оборудования USRP 2901 для решения задач информационной безопасности подробно описан в статье [17]. В ней экспериментально было определено, что все необходимые процедуры могут быть успешно выполнены на таких важных диапазонах, как 2,4 и 5 ГГц с помощью USRP 2900/2901. Например, комплекс успешно реализовал ранее

разработанные сценарии, эффективно сканируя исследуемые диапазоны частот, производя запись сигналов и генерируя ретрансляционные сигналopodobные помехи.

## **Разработка методики поверки устройств USRP для выполнения высокоточных экспериментальных исследований: планирование эксперимента и обоснование объёма выборки**

При планировании эксперимента на физическом уровне, необходимо решать задачи, которые возникают при тактическом уровне планирования экспериментов с имитационными моделями, описанных в источниках [18, 19]:

1. Определение начальных условий моделирования и оценка их влияния на процесс достижения установившегося режима при эксперименте.
2. Обеспечение требуемой точности и достоверности результатов эксперимента.

Однако при этом необходимо либо оценить точность и достоверность полученных результатов, либо определить необходимый объем выборки для получения уже заданной ранее точности и достоверности [20].

Перед тем как рассчитать объем требуемой выборки, необходимо провести пробную серию экспериментов, чтобы оценить такой важный показатель измеряемой величины (спектральной плотности мощности, или СПМ, измеряемой радиокomплексом Омега) как достоверность оценки  $\varepsilon_d$ . Согласно (1) из статьи [18], достоверность (точность оценки) математического ожидания измеряемой величины можно вычислить на основе пробной выборки N:

$$\varepsilon_d = \frac{t_\varphi \sigma}{\sqrt{N}} \quad (0)$$

$\epsilon_d$  – достоверность оценки,  $t_\varphi$  – квантиль гауссовского закона распределения,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение измеряемой величины,  $N$  – объём пробной выборки.

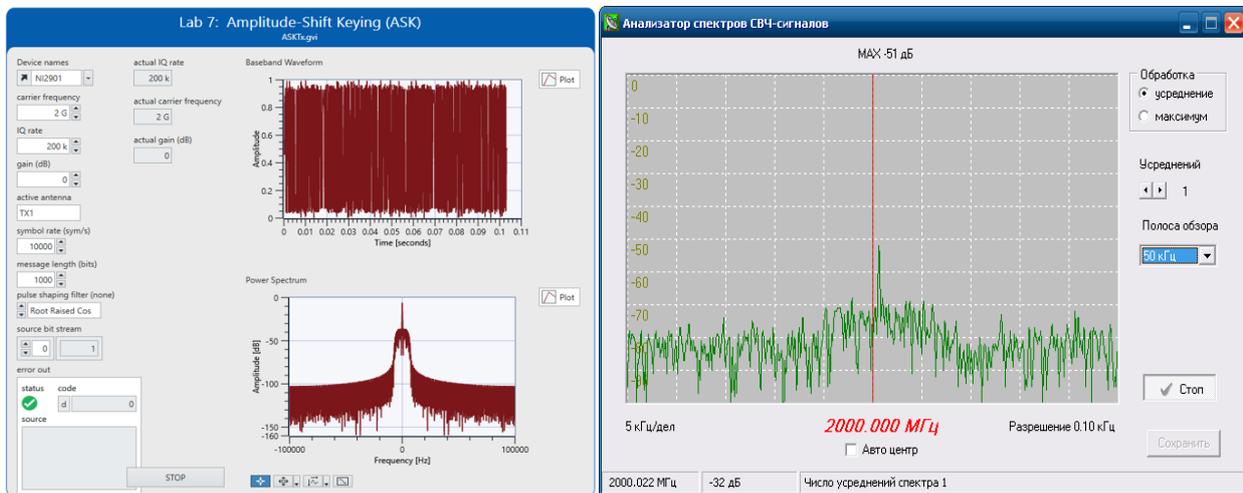


Рисунок 1 – СПМ ASK-сигнала (слева – в среде LabView, справа – в среде Омега).

Для получения пробной выборки удобнее будет взять сигнал из проекта Lab7\_ASK (рис. 1 слева) от компании NI. ASKTx.gvi генерирует сигнал с амплитудной манипуляцией [10]. Данный сигнал имеет спектральную плотность мощности с характерным пиком, который значительно выше уровня шума (АБГШ), а значит его будет удобно фиксировать (рис. 1 справа). Именно этот отсчёт (максимум СПМ сигнала) и будет использоваться в выборке эксперимента для дальнейшей проверки оборудования USRP 2901.

Результаты проведения пробного эксперимента представлены в таблице 1. Чтобы иметь возможность получения больше отсчетов эксперимента при меньших временных затратах, необходимо выбрать в программе спектроанализатора количество усреднений.

Результаты пробного эксперимента по измерению спектральной плотности  
мощности сигнала

Значение максимума СПМ, дБ	Количество выборок, б/р	Коэффициент усреднения, б/р
61	10	32
62	7	32
63	1	32

Изначально выборка N была взята на основе 18 экспериментов, при 32-кратном усреднении Омеги. Таким образом,

$$N = (1 + 7 + 10) * 32 = 576.$$

$$\text{Среднее значение отсчета } x_{\text{cp}} = \frac{61*10 + 62*7 + 63*1}{18} = 61,5 \text{ дБ.}$$

Осталось определить среднеквадратическое отклонение СПМ  $\sigma$  (а точнее ее квадрат, т.е. дисперсию) по формуле (2):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{cp}})^2 \quad (2)$$

N – количество отсчетов,  $x_{\text{cp}}$  – среднее арифметическое значение отсчета,  $x_i$  – значение i-ого отсчета.

Отсюда дисперсия СПМ:

$$\sigma^2 = \frac{1}{576} ((63 - 61,5)^2 * 1 + (62 - 61,5)^2 * 7 + (61 - 61,5)^2 * 10) = 0,105691057 \text{ дБ}^2,$$

$$\varepsilon_{\text{д}} = \frac{t_{\varphi}}{\sqrt{N}} = 0.04$$

Так как эксперименты проводятся над сигналами значительно выше АБГШ, которые при нулевом усилении обладают диапазоном изменения средней мощностью

не более 20 дБ [-50; -70] (данные получены экспериментально, см. рис. 1 справа), а также благодаря высокопроизводительному цифровому усреднению (например, 32 отсчета), то оборудование позволяет увеличить точность оценки, приняв  $\varepsilon_d = 0.02$ .

Итак, все необходимые величины из эксперимента определены. Теперь нужно оценить необходимый доверительный интервал и связанный с ним квантиль. Его значения для заданной доверительной вероятности  $Q$  или уровня значимости  $P_z = (1 - Q)$  – можно найти из решения уравнения  $\Phi_0\{t_\varphi\} = \Phi$  (из интеграла вероятности Лапласа) или в соответствующих справочных таблицах [21]. Некоторые наиболее часто встречающиеся на практике значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Взаимосвязь значений доверительной вероятности и квантиля гауссовского закона распределения

Доверительная вероятность $Q$ , б/р	0.68	0.9	0.95	0.99	0.997
Уровень значимости $P_z$ , %	32	10	5	1	0.3
Величина трубки допуска (примерно), б/р	$\pm 1\sigma$	$\pm 1.7\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 2.6\sigma$	$\pm 3\sigma$
Квантиль гауссовского закона распределения вероятностей $t_\varphi$ , б/р	0.995	1.645	1.960	2.576	2.968

Таким образом, с вероятностью около 68% значения нормально распределенной случайной величины отклоняются от ее математического ожидания

не больше, чем на одно среднеквадратическое отклонение, а с вероятностью 99,7% — не больше чем на три среднеквадратических отклонения.

В работе используется классическое правило трех сигм, т.к. практически все значения нашей нормально распределённой случайной величины лежат в интервале  $(61,5 - 3\sigma; 61,5 + 3\sigma)$ , где 61,5 дБ – экспериментально найденное математическое ожидание.

Теперь есть все необходимые данные, чтобы вычислить требуемую выборку (3):

$$N = \frac{t_{\varphi}^2 \sigma^2}{\varepsilon_{\text{д}}^2} \quad (3)$$

$$N = \frac{2.968^2 * 0,105691057}{0.02^2} = 2328$$

Итак, вычисление объёма выборки предполагает, что доверительная вероятность составляет  $Q = 0,997$ , уровень значимости  $P_z = 0,3 \%$ , достоверность оценки  $\varepsilon_{\text{д}} = 0,02$ . И чтобы достигнуть этих параметров, необходимо провести дополнительную серию экспериментов, равную  $2328 - 576 = 1752$ . Далее все полученные экспериментальные данные подразумевают данную теоретически вычисленную точность и достоверность, а значит соответственно саму выборку в 2328 опытов на каждый отсчёт.

### **Определение исследуемого диапазона частот**

Большой интерес для исследования представляет 2,4 ГГц диапазон частот, так как именно его активно используют устройства в рамках технологии Wi-Fi. Наибольшее распространение в большинстве стран получили такие стандарты

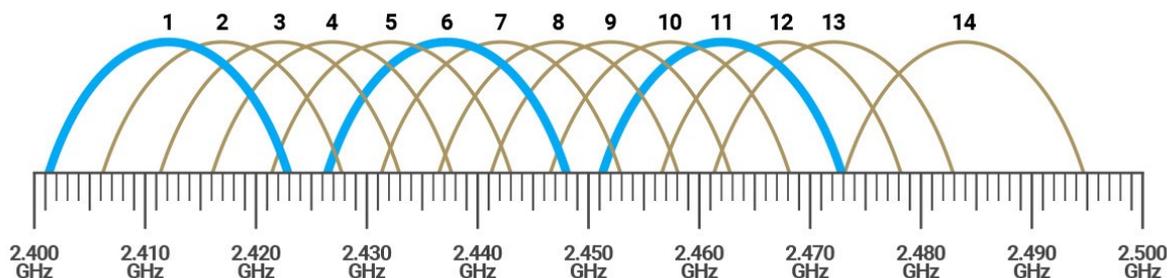


Рисунок 2 – Диапазон 2,4 ГГц Wi-Fi.

семейства 802.11, как 802.11 a, b, g, n и ac [22, 23]. Диапазон в 2,4 ГГц представляет собой полосу 100 МГц, представленную на рис. 2. Она разделена на 14 радиоканалов по 22 МГц [24], в действительности же в США используется 11 радиоканалов, в Европе – 13 [1], 14-ый радиоканал обычно не используется в современных роутерах. Поэтому исследование необходимо проводить в данном диапазоне используемых радиоканалов.

Теперь необходимо определить внешние условия [18, 19], которые могут оказывать влияние на точность получаемых экспериментальных данных. Так, широкое распространение технологии Wi-Fi привел к уже ранее упомянутому чрезмерному использованию данного диапазона. Отсюда возникает проблема оказания влияния узкополосных помех работающими устройствами при измерении. Поэтому перед непосредственным измерением каждой выборки, нужно убедиться, что данный радиоканал не использует какой-либо роутер или другое устройство. В противном случае необходимо отложить измерение или переместить оборудование в другое помещение с благоприятной радиообстановкой.

Анализ настроек проекта LabView NXG на рис. 1 (слева), где представлена панель ASKTx.gvi, показал, что изменение такого параметра, как количество

символов в секунду (symbol rate), позволит изменить площадь спектра. Необходимо сократить площадь спектра, сделав форму спектра более острым, сосредоточив всю среднюю мощность в центральной (исследуемой) частоте. Так, ширина спектра сократилась с 20 кГц (рис. 1) до 2 кГц (рис. 3) при уменьшении с 10000 символов/с до

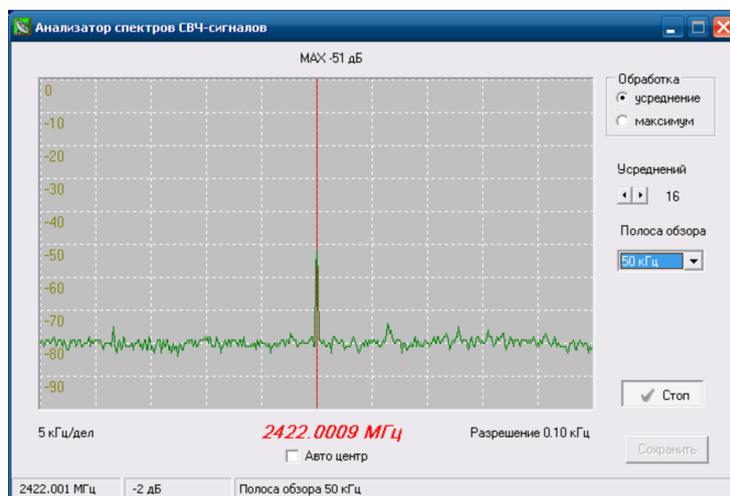


Рисунок 3 – СПМ ASK при 10 символах/с.

10 символов/с. Такая форма спектра в некотором приближении является дельта-функцией, удобной для поверки оборудования.

После определения исследуемых величин и их выборки, диапазона частот, условий проведения эксперимента, необходимо более точно определиться с методикой поверки:

1. Расположение оборудования выберем так, чтобы спектроанализатор Омега был рядом с передатчиком USRP: 3 метра – оптимальное расстояние. Также важно, чтобы на линии «передатчик-приемник Омеги» не было никаких препятствий, в том числе сам исследователь не должен собой препятствовать излучению сигнала, иначе получится искусственное затухание, влияющее на чистоту эксперимента. Частично, данную проблему, например, можно решить с помощью использования направленной антенны.

2. Далее нужно определить такой важный метрологический параметр, как погрешность измерения частоты. Безусловно, т.к. этот параметр может зависеть от частоты, то необходимо проверить его на всем диапазоне.

3. В статье [25] приведено исследование чувствительности и динамического диапазона устройства RTL-SDR (SDR приёмника на базе RTL2832U + R820T). В частности, в результате исследования были построены графики зависимости СПМ от частоты при нулевом и максимальном усилении сигнала, а также график их разницы. Отмечено, что усиление сигнала эффективнее на низких частотах. Отсюда необходимость проверить гипотезу о получении схожих результатов при использовании подобной методики при построении аналогичных зависимостей на интересующем нас диапазоне 2,4 ГГц.

4. Если предположить, что функция усиления сигнала нелинейна, то возможно определить эффективность усиления построением зависимости фактического фиксируемого усиления на спектроанализаторе при изменении усиления программно (параметр gain) с определенным шагом на одной и той же частоте.

5. Эффективность работы USRP также характеризуется и дальностью передаваемого сигнала: уровень сигнала как функция зависимости от расстояния до передатчика. Если полученная зависимость будет совпадать с теоретической, это подтвердит изотропность среды эксперимента.

6. Так как существует возможность работы USRP без подключения блока питания (питание по интерфейсу USB), то целесообразно проверить эффективность работы устройства как с блоком питания, так и без него.

## Эксперимент 1. Определение погрешности частоты

*Цель.* На рис. 1 и 3 видно, что значение центрального пика СПМ не соответствует точному выставленному на оборудовании 2,422 ГГц. Наблюдается отклонение от эталона на 0,9 кГц. Возникает необходимость проверить и оценить погрешность работы USRP, так как в технической документации к оборудованию данный сдвиг частоты не указан.

*Результаты.* Данное значение на рис. 3 было получена при работе Омеги в режиме анализа, а значит погрешность измерений составляет не более 0,2 кГц. Отсюда можно сделать вывод, что это отклонение не является погрешностью анализатора Омеги, а является погрешностью работы USRP 2901. То есть в конкретном случае истинное значение лежит в диапазоне  $2422000,9 \pm 0,2$  кГц. Чтобы убедиться в устойчивости данной погрешности в работе USRP, необходимо сменить радиоканал.

Проведение серии экспериментов на всех каналах диапазона 2,4 ГГц показало, что погрешность частоты обладает девиацией от 0,9 до 1,2 кГц. На рис. 4 представлен в качестве примера результат анализа частоты 2412 МГц и 2427 МГц. Из него видно, что на первом радиоканале погрешность составила  $1,2 \pm 0,2$  кГц, а на 4 –  $1,1 \pm 0,2$  кГц.

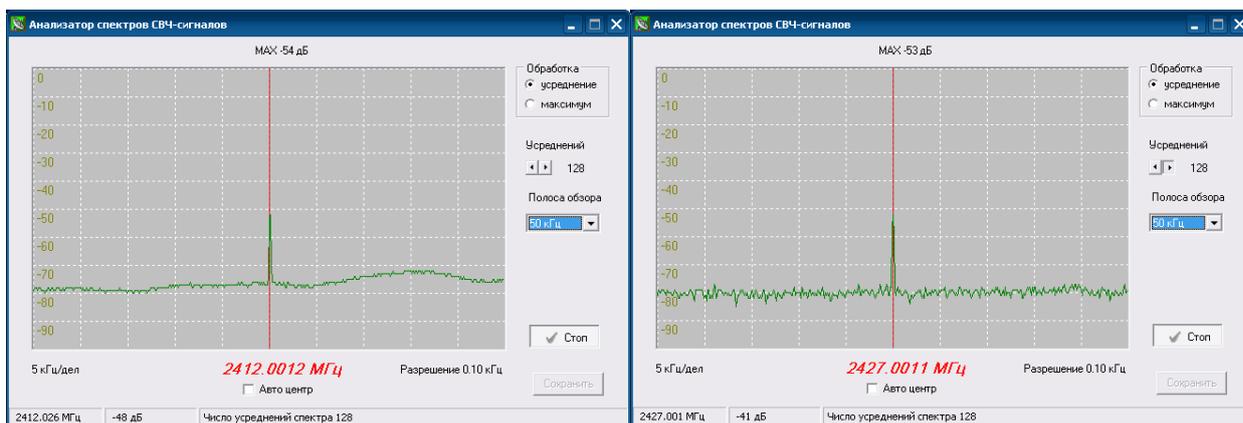


Рисунок 4 – Погрешность частоты 1 (2412 МГц) и 4 (2427 МГц) каналов Wi-Fi.

Данные из графика зависимости погрешности частоты от радиоканала на рис. 5 показывают, что в среднем значение погрешности равняется 1 кГц и не обладает большой дисперсией. Также нельзя отметить какую-либо зависимость данного показателя от частоты: линия графика при аппроксимации соответствует функции  $f(x) = 1$ , параллельной оси абсцисс.

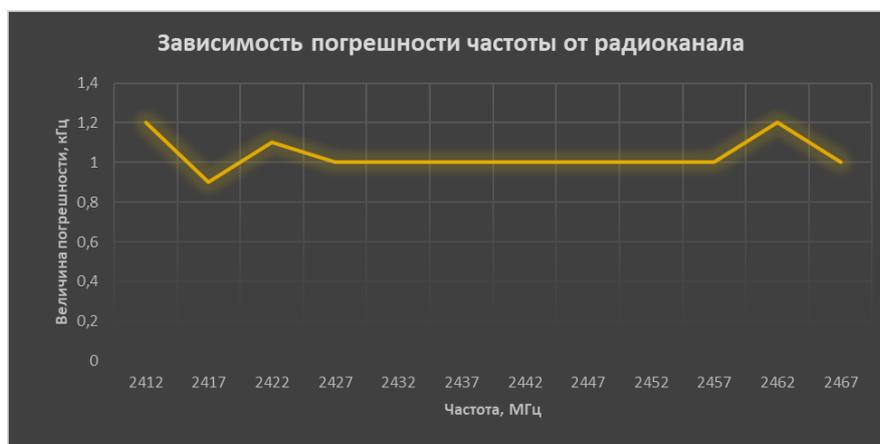


Рисунок 5 – График зависимости частоты от частоты радиоканала.

*Выводы.* Устройство NI USRP 2901 обладает погрешностью выставления частоты передаваемого сигнала. Несмотря на то, что погрешность по среднему значению не превышало 1 кГц, её стоит учитывать при проведении высокоточных исследований.

## **Эксперимент 2. Определение диапазона отклонения и устойчивости средней мощности сигнала при отсутствии усиления в зависимости от частоты**

*Цель.* Необходимо провести измерение средней мощности (дБ) в зависимости от частоты исследуемого диапазона при нулевом усилении сигнала. Это даст возможность оценить эффективность и точность работы оборудования на разных участках диапазона.

*Результаты.* В качестве границ диапазона взяты центральные частоты 1-го и 13-го каналов: [2,412; 2,472]. Шаг измерения отсчетов принят равным 0,005 ГГц: каждый отсчет, включая на границах диапазона, соответствует центральным частотам 13-ти каналов Wi-Fi.

Значение каждого отсчёта – среднее арифметическое значение СПМ ранее рассчитанной выборки в 2328 опытов. Для того чтобы сократить время получения такого большого количества опытов, используется 128-кратное усреднение. Данное значение параметра является максимальным из поддерживаемых радиокomплексом. Перед тем как начать снимать показания, производится прослушивание диапазона на наличие узкополосных помех.

Результаты представлены в виде таблицы на рис. 6. Выборка состояла из 128 усреднений 18 отсчетов, а также 24 дополнительных значения усредненных в 19-ом отсчете, чтобы суммарно вышло ранее рассчитанных  $128 * 18 + 24 = 2328$  отсчётов выборки. Для удобства заполнения таблицы и её отображения значения 19 отсчетов указаны по модулю. Однако средняя мощность указана с необходимым знаком «минус».

Частота	Средняя мощность	Выборка																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2400	-48,42105263	48	48	49	50	48	49	48	49	49	48	48	49	48	49	48	48	47	48	49
2412	-54,31578947	54	55	55	53	54	54	54	55	54	54	54	55	55	55	55	54	54	54	55
2417	-52,31578947	52	52	53	53	53	52	52	52	52	52	52	52	53	53	52	52	52	52	53
2422	-50,78947368	50	50	51	51	51	51	50	51	51	51	50	51	51	51	51	51	51	51	51
2427	-51,36842105	52	53	52	52	52	52	51	52	51	51	51	51	51	51	51	50	51	50	52
2432	-53,26315789	51	55	55	55	53	52	53	54	54	53	53	53	53	53	54	53	52	53	53
2437	-58,31578947	57	58	58	57	58	59	59	60	61	59	59	59	58	59	58	58	57	57	57
2442	-62,94736842	63	62	63	63	63	63	63	63	62	63	63	63	63	63	62	63	63	65	63
2447	-60,89473684	61	62	63	62	61	62	61	61	61	60	60	61	60	60	60	60	62	60	60
2452	-59,10526316	61	62	59	60	58	60	59	58	59	59	59	59	59	59	58	58	60	58	58
2457	-58,21052632	56	56	57	59	61	59	59	58	59	59	59	58	58	58	58	58	58	58	58
2462	-53,36842105	53	53	53	54	54	53	54	53	54	53	53	54	53	53	54	53	53	53	54
2467	-51,42105263	51	50	52	51	51	52	52	52	51	51	51	51	52	52	51	52	51	52	52
2472	-50,47368421	50	50	50	50	52	51	50	51	51	51	51	51	50	50	50	50	51	50	50

Рисунок 6 – Таблица результатов эксперимента 2.

Анализ таблицы наглядно представлен на графике зависимости средней мощности от частоты (рис. 7). Данный график показывает, что динамический диапазон изменения измеряемой величины составляет 16 дБ. Максимальное значение (в среднем -49 дБ) наблюдается на границах исследуемого диапазона. В середине наблюдается значительное падение средней мощности сигнала вплоть до 63 дБ.

*Выводы.* При работе в диапазоне радиоканалов 6–10 стоит учитывать, что будет



Рисунок 7 – График зависимости СПМ от частоты при усилении 0 дБ.

наблюдаться средняя мощность сигнала меньшая, чем в других радиоканалах. При отсутствии усиления сигнал излучается стабильный, девиация не превышает 7 дБ.

Особенно это заметно на 7 радиоканале (2437 МГц), где сигнал излучался устойчиво при средней мощности в 63 дБ (только одна выборка составила 62 дБ).

### Эксперимент 3. Определение диапазона отклонения и устойчивости средней мощности сигнала при максимальном усилении в зависимости от частоты

*Цель.* Из результатов ранее проведенного эксперимента 2 была замечена зависимость изменения средней мощности от частоты. Необходимо проверить устойчивость данной зависимости при максимальном значении усиления в поле gain (в дБ) проекта и сравнить с показателями, полученными в эксперименте 2.

*Результаты.* Проведение эксперимента аналогично предыдущему за

Частота	Средняя мощность	Выборка																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2412	-5,052631579	6	5	5	4	4	5	6	4	5	5	5	5	6	5	5	5	5	5	6
2417	-3,315789474	1	2	3	3	3	4	3	4	4	5	4	6	4	4	3	3	2	2	2
2422	-2,526315789	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	2	3	2
2427	-1,631578947	3	2	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
2432	-0,947368421	0	1	2	1	2	1	1	1	0	2	0	1	0	1	1	1	1	1	1
2437	-7,894736842	10	9	9	8	7	8	8	8	8	9	10	8	8	7	8	8	8	1	8
2442	-15,21052632	15	18	17	16	15	15	15	15	15	15	14	15	16	15	15	14	15	14	15
2447	-16,89473684	18	19	20	20	16	16	16	16	17	17	17	16	17	16	17	16	16	16	15
2452	-9,315789474	8	6	7	8	8	9	9	9	9	11	10	10	11	11	11	10	10	10	10
2457	-3	2	1	2	3	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	4
2462	-4,789473684	5	4	4	4	4	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5
2467	-2,052631579	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2
2472	-2,736842105	2	2	2	3	2	3	4	5	4	4	4	3	3	2	2	2	2	2	1

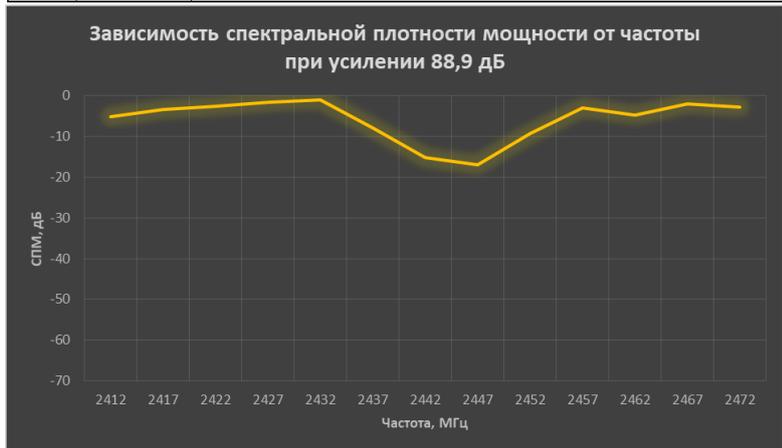


Рисунок 8 – Таблица результатов эксперимента 3 (сверху) и график зависимости СПМ от частоты при усилении 88,9 дБ (снизу).

исключением того, что был установлен параметр gain вместо 0 дБ на 89,8 дБ, т.е.

максимальное значение по техническим характеристикам. Результаты также представлены в таблице на рис. 8 (сверху).

Более наглядно значения могут быть интерпретированы в виде графика на рис. 8 (снизу). На нем также наблюдается прогиб графика в середине диапазона, особенно на 7-ом и 8-ом радиоканале. Однако теперь заметно, что дисперсия значений значительно выше, почти 20 дБ, что практически в 2 раза выше, чем в предыдущем опыте.

Также нестабильность усиления сигнала на каждой частоте хорошо видно, если наложить два графика (рис. 7 и рис. 8, сверху) друг на друга и построить их разность. Результат виден на рис. 9. Можно заметить, что график при определенном сглаживании напоминает волну: производная функции меняет знак каждые 10 МГц, т.е. на первом десятимегагерцовом участке производная отрицательная (функция убывает), далее производная меняет знак – функция возрастает и так далее. Отклонение от среднего значения в 50 дБ практически не превышает 5 дБ и даже при определенной аппроксимации график можно назвать линейным ( $f(x) = 50$ ).



Рисунок 9 – График разности СПМ при минимальном и максимальном усилении.

Данные результаты можно сравнить с подобными экспериментами в статье [24]. Сравнение с результатами экспериментов с USRP показывает значительное преимущество в точности усиления над RTL-SDR.

*Выводы.* При максимальном усилении сигнала следует учесть некоторую нестабильность формы сигнала из-за усиления дисперсии значений СПМ практически в два раза. В середине диапазона значения СПМ имеют наименьшую девиацию, однако при этом наблюдается небольшое падение средней мощности. Отсюда возникает рекомендация использовать другие радиоканалы, если требуется максимальный прирост средней мощности. USRP обладает мощным и точным усилителем в диапазоне Wi-Fi.

#### **Эксперимент 4. Определение эффективности усиления мощности сигнала при увеличении значения на одной частоте**

*Цель.* В продолжении анализа эффективности усиления следует проверить зависимость усиления от 0 дБ до максимального значения 89,8 дБ. Ожидается линейное усиление, которое необходимо проверить. В качестве опорной частоты логичнее будет принять канал с наименьшей дисперсией значений – 7 радиоканал (2442 МГц). Так как максимальное значение практически равно 90 дБ, то удобно взять шаг равный 9 дБ.

*Результаты.* Результаты также наглядно видны на графике (рис. 10).

Действительно, как и ожидалось, усиление до 54 дБ происходит стабильно линейно. Однако далее фактического усиления не наблюдается, и оно не превышает

отметку на 54 дБ. Полученные результаты говорят, о неэффективности усиления на диапазоне 2,4 ГГц при значениях выше 54 дБ.

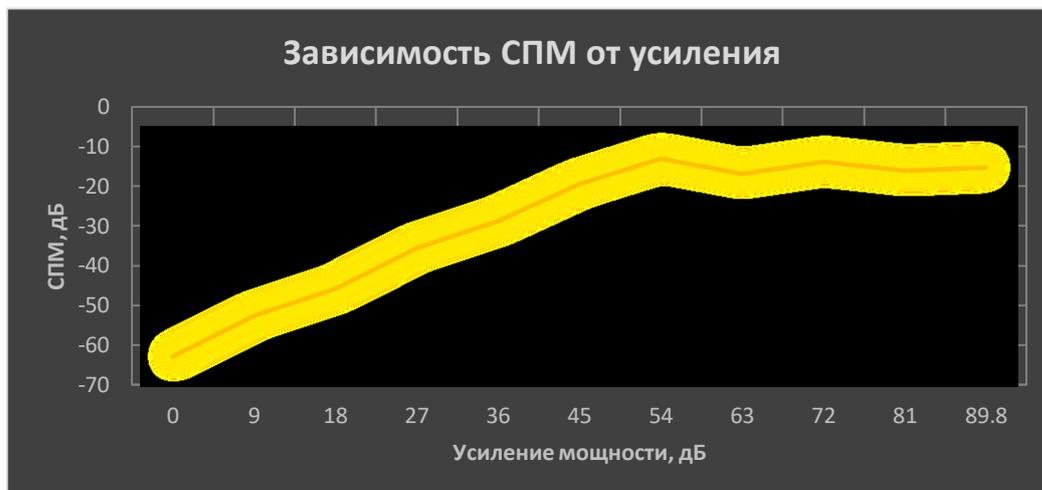


Рисунок 10 – График зависимости СПМ от усиления.

*Выводы.* Использовать усилитель на радиоканалах Wi-Fi целесообразно только до 54 дБ, далее – нерационально. Само усиление, благодаря малому шагу усилителя нарастает линейно без каких-либо отклонений, что говорит о высокой чувствительности и эффективности работы усилителя.

### **Эксперимент 5. Определение зависимости падения средней мощности сигнала с расстоянием**

*Цель.* Согласно теоретическим основам радиолокации [26], спектральная плотность мощности с расстоянием падает по формуле (4):

$$S = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (4)$$

S – СПМ сигнала, Вт/Гц; P – средняя мощность, Вт; R – расстояние до передатчика, м.

Таким образом, при уменьшении расстояния в два раза, СПМ должна уменьшиться в 4 раза (6 дБВт). Эксперимент, подтверждающий данный расчёт,

подтвердит чистоту экспериментов: если значение будет значительно выше ожидаемого, значит радиообстановка оказывала серьезное влияние на результаты исследования. Кроме того, также можно проанализировать точность излучаемой мощности USRP. Как было указано ранее, Омега изначально находится на расстоянии в 3 м от USRP. Минимальное расстояние между приемником Омеги и передатчиком USRP – несколько десятков сантиметров. Передаваться будет сигнал с BPSK [11, с. 129]. Пусть расстояние будет 37,5 см (1/8 часть от 3 метров). Отсюда получается, что:

- при увеличении расстояния в 4 раза (1,5 м от передатчика), то должно наблюдаться падение мощности в  $4^2 = 16$  раз (12,04 дБ), т.е. -30 дБ (исходное значение) – 12,04 дБ = -52,04 дБ.
- при увеличении расстояния в 8 раза (3 м от передатчика), то должно наблюдаться падение мощности в  $8^2 = 64$  раза (18,06 дБ), т.е. -30 дБ (исходное значение) – 18,06 дБ = -58,06 дБ.

*Результаты.* На рис. 11 представлены результаты СПМ на частоте 2 ГГц на расстоянии 1,5 м и 3 м. Как было рассчитано ранее, ожидалось получения -52 дБ и -58 дБ соответственно (Омега округляет значение до целого). В данном эксперименте

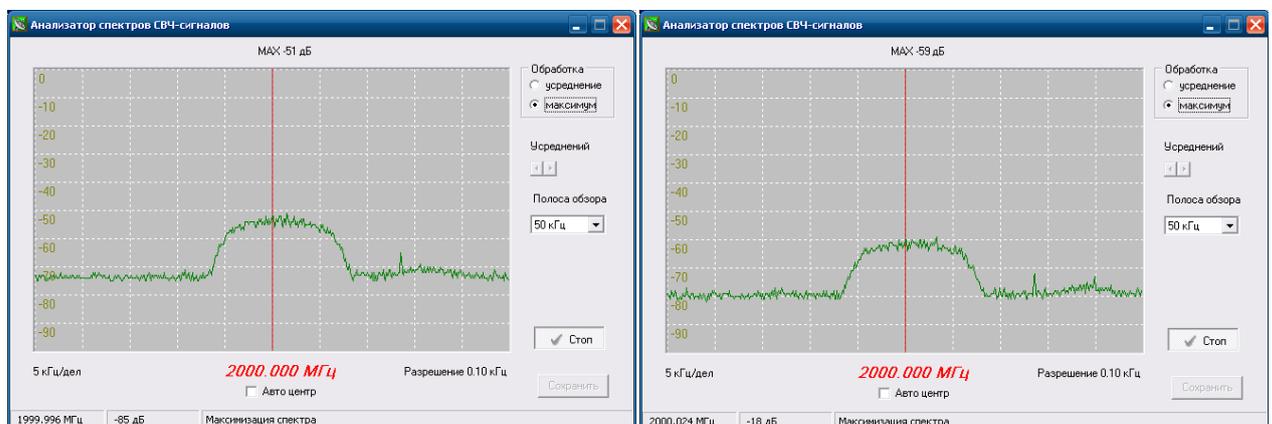


Рисунок 11 – СПМ BPSK на частоте 2 ГГц на расстоянии 1,5 м (слева) и 3 м (справа).

был использован другой режим спектроанализа: на спектрограмме выводилось не среднее значение величины СПМ, а максимум данной выборки, что более качественно выделяет форму сигнала, даже если средняя мощность значительно падает. Экспериментально полученные значения в -51 дБ и -59 дБ практически полностью соответствует ожиданиям.

*Выводы.* USRP излучает сигнал с высокой точностью согласно значению отображаемой средней мощности в LabVIEW. Также отмечено, что эксперимент проводится в изотропной радиообстановке без наличия помех или иных факторов, влияющих на электромагнитные свойства среды [27].

#### **Эксперимент 6. Определение необходимости использования дополнительного питания при высокоточных экспериментах**

*Цель.* Дополнительное подключение блока питания, необходимо если планируется использовать оба канала устройства USRP. Возникает необходимость проверить влияние данного фактора при использовании одного канала на форму спектра и уровень мощности сигнала.

*Результаты.* Результаты последнего эксперименты также наглядно демонстрирует рис. 12 со спектрограммами без использования блока питания и при его подключении. Сравнение двух спектрограмм показывает, что заметной разницы нет ни в форме спектра, ни в его значениях.

*Выводы.* Экспериментально было определено, что при использовании одного канала нет необходимости подключать блок питания к USRP: электропитания через

интерфейс USB вполне достаточно, т.к. существенного влияние на форму спектра или его отдельные значения обнаружено не было.

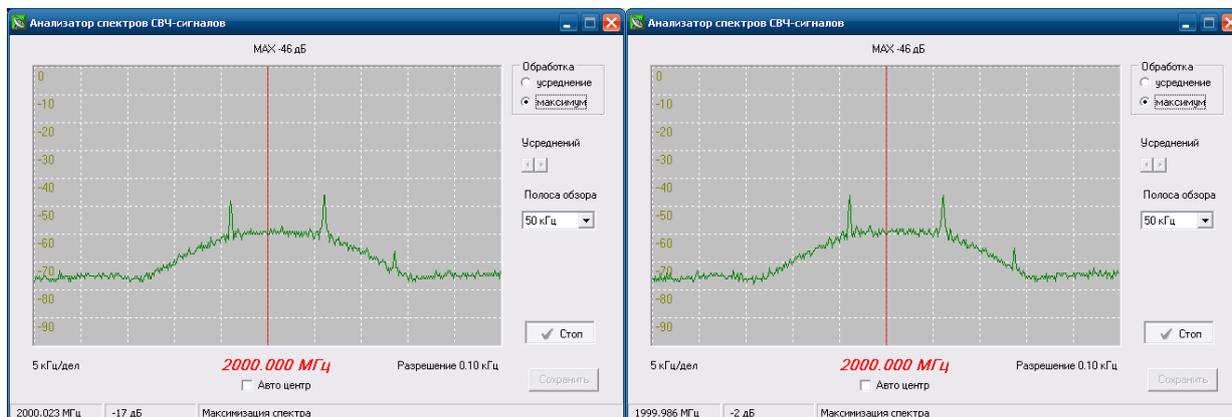


Рисунок 12 – СПМ передатчика без питания (снизу) и с ним (сверху).

### Заключение

Вследствие объективных причин сегодня технология SDR получает все большее распространение. Одной из высокоточных и недорогих моделей SDR является USRP 2901 от компании NI. Устройство предоставляет возможность как профессионалам, так и радиолюбителям работать в диапазоне от 70 МГц до 6 ГГц. Для его работы необходим компьютер с установленной средой LabVIEW и антенна для передачи или приема сигнала.

У данной технологии большие перспективы развития в рамках решения задач телекоммуникаций. Поэтому был разработан программно-аппаратный комплекс и методика метрологического обеспечения высокоточных экспериментальных работ на оборудовании USRP 29xx. На основе анализа проблем метрологического обеспечения экспериментальных исследований на физическом уровне была разработана универсальная методика поверки подобного оборудования с использованием радиоконкомплекса Омега.

В результате апробации данной методики было отмечено следующее:

1. Погрешность частоты передаваемого сигнала составляет не более 2 кГц, в среднем – на 1 кГц больше истинного значения. По умолчанию, подобного сдвига согласно документации [10] быть не должно, поэтому либо необходимо использовать функции сдвига частоты генератора на 1 кГц в меньшую сторону, либо устанавливать в панели проекта частоту на 1 кГц меньше, чем необходимо.

2. Необходимо учитывать, что сигнал, передаваемый по 6 – 10 радиоканалу, имеет среднюю мощность меньшую, чем на других радиоканалах 2,4 ГГц Wi-Fi. Поэтому слабые сигналы передавать по данному диапазону будет менее эффективно.

3. При усилении сигнала USRP равномерно увеличивает среднюю мощность сигнала независимо от частоты, при отклонении не более 5 дБ от среднего значения. Точность усилителя USRP значительно лучше усилителя других SDR.

4. Использовать усилитель на радиоканалах Wi-Fi целесообразно только до 54 дБ, далее – нерационально. Усиление нарастает стабильно линейно, что означает высокую чувствительность и точность передатчика.

5. USRP излучает среднюю мощность сигнала с высокой эффективностью согласно значению отображаемой средней мощности в LabVIEW. Также отмечено, что эксперименты были проведены в условиях благоприятной внешней радиообстановки, как и требовала разработанная ранее методика.

6. При использовании одного канала нет необходимости подключать блок питания к USRP: электропитания от интерфейса USB вполне достаточно и не влияет на точность экспериментов.

## Список источников

1. Губер Я.А., Михайлов В.Ю., Витомский Е.В. Разработка и тестирование сценариев, имитирующих интеллектуальное воздействие на инфраструктуру беспроводной сети // Технологии информационного общества. 2019. Т. 1. С. 204-208.
2. Шевцов В.А., Бородин В.В., Крылов М.А. Построение совмещенной сети сотовой связи и самоорганизующейся сети с динамической структурой // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=66417>
3. Mahajan R., Bagai D. Cognitive Radio Technology: Introduction and its Applications // International Journal of Engineering Research and Development, 2016, vol. 12, issue 9, pp. 17-24.
4. Kareem J Baddour, Octavia A. Dobre, Menguc Oner et al. Special issue on Cognitive radio: The road for its second decade // Physical Communication, 2013, vol. 9, pp. 145–147. DOI: [10.1016/j.phycom.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2013.08.002)
5. Muradi V.S., Paithane R.K., Ahmed A. Pawar A. Spectrum sensing in cognitive radio using Labview and NI USRP // 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India, 19-20 Jan., 2018. DOI: [10.1109/ICISC.2018.8399019](https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399019)
6. Thameur H.B., Dayoub I. Real-Time In-Lab Test of Eigenvalue-Based Spectrum Sensing Using USRP RIO SDR Boards, IEEE Communications Letters, 2021, vol. 25, issue 3, pp. 1029–1032. DOI: [10.1109/LCOMM.2020.3037010](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3037010)
7. Ramya V.U., Thanikaiselvan V. Image Encryption using DNA rules & Transmission of an encrypted digital image using USRP-2901 and MATLAB // 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN), Vellore, India, 14 Nov., 2019. DOI: [10.1109/ViTECoN.2019.8899561](https://doi.org/10.1109/ViTECoN.2019.8899561)

8. Serkin F.B. and Vazhenin N.A. USRP Platform For Communication Systems Research // 15th International conference on transparent optical networks, ICTON, 2013.  
DOI:[10.1109/ICTON.2013.6602738](https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602738)
9. Marín-García J.A., Romero-Franco C., Alonso J.I. A Software Defined Radio Platform for Decode and Forward Relay Nodes Implementation // 2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Granada, Spain, 16 Dec., 2019.  
DOI: [10.1109/CSCN.2019.8931410](https://doi.org/10.1109/CSCN.2019.8931410)
10. Брюс А. Блэк. Введение в системы радиосвязи. Лабораторные работы с NI USRP и LabVIEW Communications. – М.: National Instruments, 2014. – 157 с.
11. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Муравьев И.В. Возможности применения платформы быстрого прототипирования NI в учебном процессе кафедры ТКС МИЭТ в условиях дистанционного обучения // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2021. Т. 10. № 2. С. 4-11.
12. Криков Д.С. Синтезатор сетки частот в радиоэлектронных системах // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90403>
13. «ОМЕГА-М5» - комплекс радиоконтроля, «НОВО». URL: <https://novocom.ru/ru/node/11>
14. Федоров С.М., Бойко О.В., Пастернак Ю.Г., Пирогов А.А. Системы подвижной радиосвязи. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. – 146 с.
15. Крюков Я.В., Покаместов Д.А., Рогожников Е.В., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Анализ вычислительной сложности и времени выполнения стека протоколов в сетях 5G New Radio // Доклады Томского государственного университета систем

управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 3. С. 31-37. DOI: [10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37](https://doi.org/10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37)

16. Srilatha M., Harini S., Sushanth T. Community Radio Using USRP 2920 // 2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, 13 Nov., 2021. DOI: 10.1109/GCAT52182.2021.9587846.

17. Михайлов В.Ю., Мазепа Р.Б. Применение устройств USRP для моделирования сигналоподобных помех в беспроводных сетях // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2020. Т. 11. № 3. С. 43-51.

18. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.

19. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.

20. Паничев В.В., Соловьев Н.А. Компьютерное моделирование. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 130 с.

21. ГОСТ Р 50779.21-96. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. – М.: Госстандарт России, 1996.

22. 802.11-2016. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2016.

23. Гуревич О.С., Кессельман М.Г., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81143>
24. Rath H.K., Timmadasari S., Panigrahi B., Simha A. Realistic indoor path loss modeling for regular WiFi operations in India // 2017 Twenty-third National Conference on Communications (NCC), Chennai, India, 2017. DOI: [10.1109/NCC.2017.8077107](https://doi.org/10.1109/NCC.2017.8077107)
25. R820T, RTL2832U SDR USB STICK – Sensitivity, dynamic range. SimonsDialogs, available at: <http://www.simonsdialogs.com/2014/09/r820t-rtl2832u-sdr-usb-stick-sensitivity-dynamic-range>
26. Гавриленко В.Г., Яшнов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2003. – 148 с.
27. Боев С.Ф., Пименов П.Н., Пронин С.А., Шевырев А.В. Влияние параметров сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения на функционирование радиоэлектронных средств // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80441>

## References

1. Guber Ya.A., Mikhailov V.Yu., Vitomskii E.V. *Tekhnologii informatsionnogo obshchestva*, 2019, vol. 1, pp. 204-208.
2. Shevtsov V.A., Borodin V.V., Krylov M.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66417>

3. Mahajan R., Bagai D. Cognitive Radio Technology: Introduction and its Applications, *International Journal of Engineering Research and Development*, 2016, vol. 12, issue 9, pp. 17-24.
4. Kareem J Baddour, Octavia A. Dobre, Menguc Oner et al. Special issue on Cognitive radio: The road for its second decade, *Physical Communication*, 2013, vol. 9, pp. 145–147. DOI: [10.1016/j.phycom.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2013.08.002)
5. Muradi V.S., Paithane R.K., Ahmed A. Pawar A. Spectrum sensing in cognitive radio using Labview and NI USRP, *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, Coimbatore, India, 19-20 Jan., 2018. DOI: [10.1109/ICISC.2018.8399019](https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399019)
6. Thameur H.B., Dayoub I. Real-Time In-Lab Test of Eigenvalue-Based Spectrum Sensing Using USRP RIO SDR Boards, *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25, issue 3, pp. 1029–1032. DOI: [10.1109/LCOMM.2020.3037010](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3037010)
7. Ramya V.U., Thanikaiselvan V. Image Encryption using DNA rules & Transmission of an encrypted digital image using USRP-2901 and MATLAB, *2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN)*, Vellore, India, 14 Nov., 2019. DOI: [10.1109/ViTECoN.2019.8899561](https://doi.org/10.1109/ViTECoN.2019.8899561)
8. Serkin F.B., Vazhenin N.A. USRP Platform For Communication Systems Research, *15th International conference on transparent optical networks, ICTON*, 2013. DOI: [10.1109/ICTON.2013.6602738](https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602738)
9. Marín-García J.A., Romero-Franco C., Alonso J.I. A Software Defined Radio Platform for Decode and Forward Relay Nodes Implementation, *2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Granada, Spain, 16 Dec., 2019. DOI: [10.1109/CSCN.2019.8931410](https://doi.org/10.1109/CSCN.2019.8931410)

10. Bryus A. Blek. *Vvedenie v sistemy radiosvyazi. Laboratornye raboty s NI USRP i LabVIEW Communications* (Introduction to radio communication systems. Labs with NI USRP and LabVIEW Communications), Moscow, National Instruments, 2014, 157 p.
11. Bakhtin A.A., Omel'yanchuk E.V., Murav'ev I.V. *Metodicheskie voprosy prepodavaniya infokommunikatsii v vysshei shkole*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 4-11.
12. Krikov D.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90403>
13. «OMEGA-M5» - kompleks radiokontrolya, «NOVO», available at: <https://novocom.ru/ru/node/11>
14. Fedorov S.M., Boiko O.V., Pasternak Yu.G., Pirogov A.A. *Sistemy podvizhnoi radiosvyazi* (Mobile radio systems), Voronezh, Izd-vo VGTU, 2019, 146 p.
15. Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 31-37. DOI: [10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37](https://doi.org/10.21293/1818-0442-2020-23-3-31-37)
16. Srilatha M., Harini S., Sushanth T. Community Radio Using USRP 2920, *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, Bangalore, India, 13 Nov., 2021. DOI: [10.1109/GCAT52182.2021.9587846](https://doi.org/10.1109/GCAT52182.2021.9587846)
17. Mikhailov V.Yu., Mazepa R.B. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 43-51.
18. Pugachev B.C. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (Theory of Probability and Mathematical Statistics), Moscow, FIZMATLIT, 2002, 496 p.

19. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie system* (System modeling), Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 271 p.
20. Panichev V.V., Solov'ev N.A. *Komp'yuternoe modelirovanie* (Computer modeling: tutorial), Orenburg, GOU OGU, 2008, 130 p.
21. *GOST R 50779.21-96. Statisticheskie metody. Pravila opredeleniya i metody rascheta statisticheskikh kharakteristik po vyborochnym dannym. Chast' 1. Normal'noe raspredelenie* (Statistical methods. Rules for determining and methods for calculating statistical characteristics from sample data. Part 1. Normal distribution), Moscow, Gosstandart, 1996.
22. *802.11-2016. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2016.
23. Gurevich O.S., Kessel'man M.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81143>
24. Rath H.K., Timmadasari S., Panigrahi B., Simha A. Realistic indoor path loss modeling for regular WiFi operations in India, *2017 Twenty-third National Conference on Communications (NCC)*, Chennai, India, 2017. DOI: [10.1109/NCC.2017.8077107](https://doi.org/10.1109/NCC.2017.8077107)
25. *R820T, RTL2832U SDR USB STICK – Sensitivity, dynamic range. SimonsDialogs*, available at: <http://www.simonsdialogs.com/2014/09/r820t-rtl2832u-sdr-usb-stick-sensitivity-dynamic-range>

26. Gavrilenko V.G., Yashnov V.A. *Rasprostranenie radiovoln v sovremennykh sistemakh mobil'noi svyazi* (Propagation of radio waves in modern mobile communication systems), Nizhnii Novgorod, NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2003, 148 p.

27. Boev S.F., Pimenov P.N., Pronin S.A., Shevyrev A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80441>

Статья поступила в редакцию 15.06.2022

Статья после доработки 18.06.2022

Одобрена после рецензирования 10.08.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 15.06.2022; approved after reviewing on 10.08.2022; accepted for publication on 26.12.2022