

УДК 621.389

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-69-76

## Измерение рассогласований характеристик приемных каналов стенда цифровой антенной решетки на базе USRPX310

А. С. Раев, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*software-definedradio (SDR).*

*SDR.*

*SDR-*

*SDR-*

$\pm 2 \%$

$\pm 4 \%$

$\pm 7 \%$

**Ключевые слова:** программно определяемая радиосистема, фазированная антенная решетка, USRPX310, UBX 160 MHz, Twin RX 80 MHz, Gnu Radio, MATLAB.

### Введение

В настоящее время наблюдается концепция широкого использования методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) в радиотехнике, в частности радиолокации. Это связано в большой степени с развитием сферы производства устройств цифровой обработки. На данный момент при их проектировании большое внимание уделяется компьютерному моделированию [1]. При этом в ходе отладки алгоритмов работы моделируются не только сами отлаживаемые платформы, но и обрабатываемые сигналы.

Развитие технологии программно определяемых радиосистем (*software-definedradio*) – самый яркий пример данного направления. Программно определяемая радиосистема сегодня представляет собой радиоприемник/передатчик, использующий технологию, позволяющую с помощью программного обеспечения устанавливать и изменять рабочие параметры [2].

Появление и совершенствование данной технологии привело к созданию цифровых методов формирования диаграммы направленности (ДН) фазированных антенных решеток для радиолокационной техники. Данный путь развития привел к тому, что радиолокационные системы могут конструироваться в виде стендов цифровых антенных решеток (ЦАР). Цифровые антенные решетки имеют не только достаточно малые габариты относительно аналоговых систем, но также возможность быстрой конфигурации под определенные задачи без изменения самой конструкции, а лишь с корректировкой алгоритмов. Данный принцип формирования диаграммы направленности стал настолько популярным, что в научной литературе имеется достаточно много описанных примеров реализации систем, в основе которых лежит такой принцип [3, 4 и др.].

Однако для корректной работы цифровой антенной решетки, исходя из теории фазированных антенных решеток [5], необходимо, чтобы

SDR-модули в своей структуре имели идентичные каналы как по фазе, так и по амплитуде.

**Цель исследования** – численная оценка несоответствия характеристик между каналами SDR-устройств стенда цифровой антенной решетки.

### Структурная схема ЦАР

В качестве исследуемого макета рассматривается стенд цифровой антенной решетки. Состав стенда [6]:

- антенная решетка – 1 передающая антенна, имеющая каналы горизонтальной и вертикальной плоскости поляризации [7], и 4 приемных антенны с той же конфигурацией;

- software-defined radio (SDR) модули модели USB PX 310 (URL: [https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/X300\\_X310\\_Spec\\_Sheet](https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/X300_X310_Spec_Sheet)).

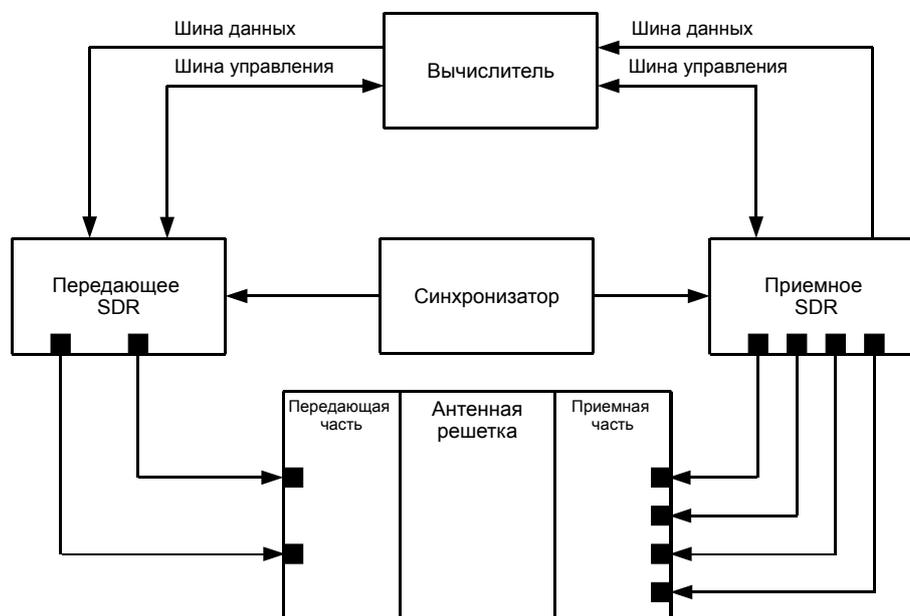
pdf), которые применяются в качестве приемопередатчиков:

- для формирования зондирующего сигнала – USB PX 310 с дочерними платами UBX 160MHz (URL: [https://www.ettus.com/content/files/UBX\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/UBX_Data_Sheet.pdf));

- для приема и преобразование отраженного сигнала – USB PX 310 на 4 приемных канала с дочерними платами Twin RX 80MHz (URL: [https://www.ettus.com/content/files/Twin\\_RX\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/Twin_RX_Data_Sheet.pdf));

- персональный компьютер (ПК), необходимый как для разработки и загрузки SDR-алгоритмов излучения и приема сигналов, так и для сбора и обработки принятых данных.

Структурная схема макета рассматриваемого стенда представлена на рисунке 1.



1. Структура стенда цифровой антенной решетки

Fig. 1. Structure of stand digital antenna array

В процессе работы над проектом при построении системы было обнаружено, что у выбранных SDR-устройств отсутствует идентичность в каналах приема. Поэтому встала задача определения численных значений рассогласований приемных каналов стенда ЦАР с последующей их калибровкой. Для решения данной задачи необходимо заменить антенную решетку эквивалентом, а сигнал, формируемый передатчиком, через делитель мощности следует подавать одновременно на два приемных канала для проведения исследований и проведения измерений [8]. Полученная таким образом структура для измерения рассогласований примет вид, представленный на рисунке 2.

Пользуясь данной структурной схемой, следует составить методику, по которой и будут производиться измерения.

### Разработка методики измерения SDR-модулей

На первом этапе определения методики измерения характеристик SDR-платформ необходимо задаться параметрами сигналов, используемых в рамках измерений. После чего непосредственно разрабатывается сам способ определения фазовых сдвигов между каналами, так как он представляет собой основу методики их измерений, а значит, для проведения практических измерений появляется базовая инструк-

ция, определяющая процедуру проверки и оценки характеристик.

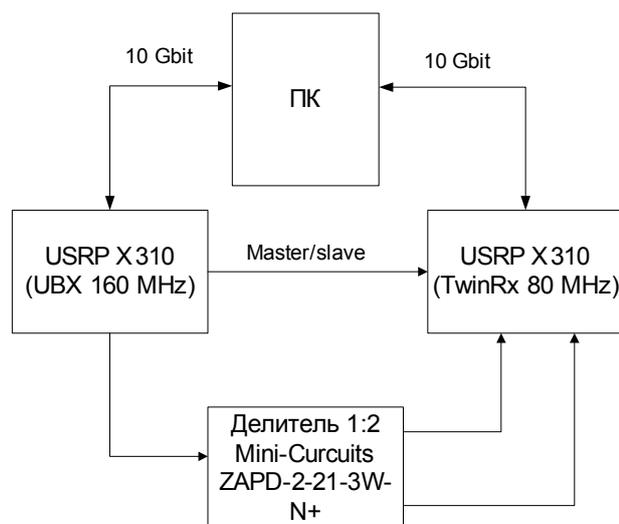


Рис. 2. Схема подключения измерительной аппаратуры

Fig. 2. Hard ware connection diagram

В рамках испытаний SDR-платформ требуется провести прием гармонического сигнала со следующими параметрами:

- частота дискретизации 10 МГц;
- частота гармонического сигнала 10 кГц;
- уровень гармонического сигнала 1 В.

Сформированный сигнал средствами программного обеспечения, в частности программного продукта GNU Radio [9] под управлением операционной системы Linux, загружается на передатчик USRP X 310 с дочерними платами UBX 160 MHz, после чего сигнал излучается на несущей частоте 1,5 ГГц. Прием сформированного сигнала необходимо производить в синхронном режиме работы системы. Синхронизация между передающим USRP X 310 с дочерними платами UBX 160 MHz и приемным USRP X 310 с дочерними платами Twin RX 80 MHz производится по принципу Master-slave [10]. За режим работы в устройствах отвечают выходы опорного генератора REF и вывод PPSTRIG.

В качестве канала передачи выступает коаксиальный кабель с делителем мощности модели Mini-Circuits ZAP D-2-21-3W-N+. Передатчик подает сигнал на приемник одновременно на два из четырех приемных каналов. Средствами программы GNU Radio осуществляется запись принятых сигналов в файлы в формате wav. Полученная таким образом запись представляет собой дискретные отчеты сигнала в виде двумерного массива данных, где строки соответствуют действительной и мнимой части

комплексного сигнала, а столбцы – номеру дискретного отчета.

Полученные в процессе исследований файлы подвергаются анализу согласно алгоритму, созданному в программе MATLAB, в результате работы которого и находится фазовая задержка между каналами [11]. После этого поочередно производится запись всех остальных приемных каналов относительно первого и осуществляется сравнение найденных фазовых задержек и их возможный дрейф между всеми каналами приема.

С целью упрощения и большей наглядности алгоритм разработанной методики испытаний SDR-модулей для измерения рассогласований между каналами можно представить в виде блок-схемы (рис. 3).

### Испытания SDR-устройства согласно разработанной методики

С использованием разработанной методики были проведены испытания SDR-платформ стенда цифровой антенной решетки. Схема подключения исследуемых SDR-платформ и оборудования соответствовала рисунку 2.

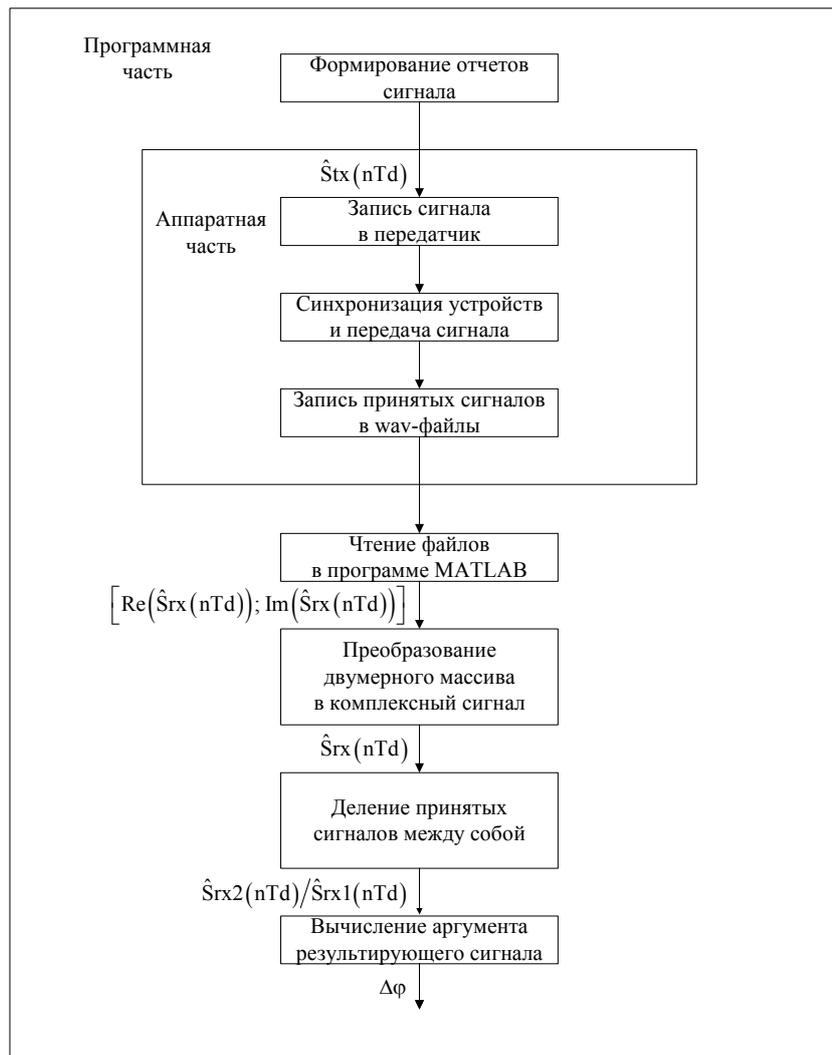
В результате испытаний были получены записи сигналов в виде файлов в формате wav поочередно для всех приемных каналов относительно первого. Программа, отвечающая за передачу, прием и запись сигнала в файлы формата wav, была создана в среде разработки GNU Radio [12] и структурирована в виде потокового графа (рис. 4).

Следующий шаг включал в себя анализ записанных wav-файлов в программе, работающей в пакете прикладных программ MATLAB [13], согласно разработанному алгоритму. Алгоритм работы программы предполагал поочередный анализ каждого из полученных файлов. В результате проведенных исследований были построены графики изменения фазовых рассогласований всех приемных каналов относительно первого.

В соответствии с программой исследования были получены результаты, приводимые ниже (рис. 5–7).

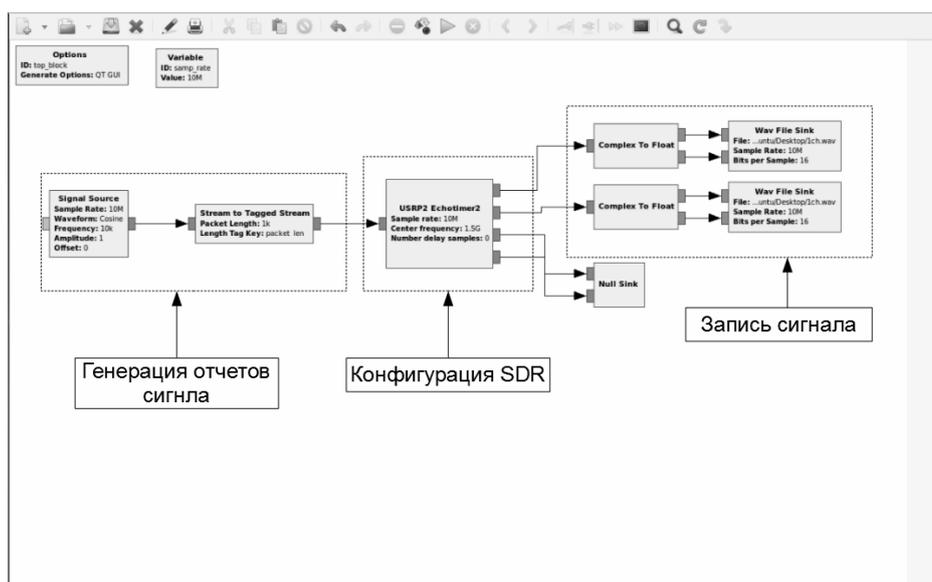
Анализ представленных на рисунке 5 результатов показывает, что значение фазового рассогласования между 1-м и 2-м каналами флуктуирует по гармоническому закону относительно постоянного значения  $172,3^\circ$  с отклонениями на уровне  $0,4 \pm 0,25^\circ$ .

В свою очередь, на рисунке 6 можно заметить, что значение фазового рассогласования между 1-м и 3-м каналами мало меняется во времени и определяется на уровне  $173,8^\circ$  с возможной случайной флуктуацией  $\pm 0,3^\circ$ .



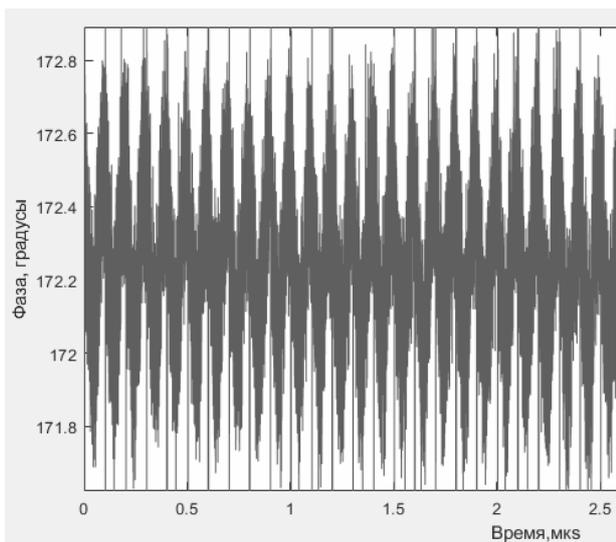
3. Блок-схема алгоритма вычисления фазовых задержек между каналами

Fig. 3. Block diagram of algorithm for calculating phase shifts



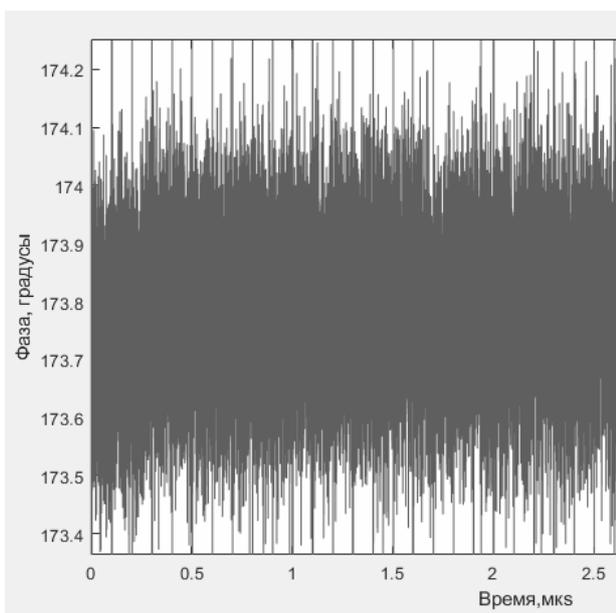
4. Поточный граф работы системы в программе Gnu Radio

Fig. 4. Flow graph system operation in Gnu Radio



5. Измерение фазового сдвига между 1-м и 2-м каналами

Fig. 5. Measuring the phase shift between the 1st and 2nd channels



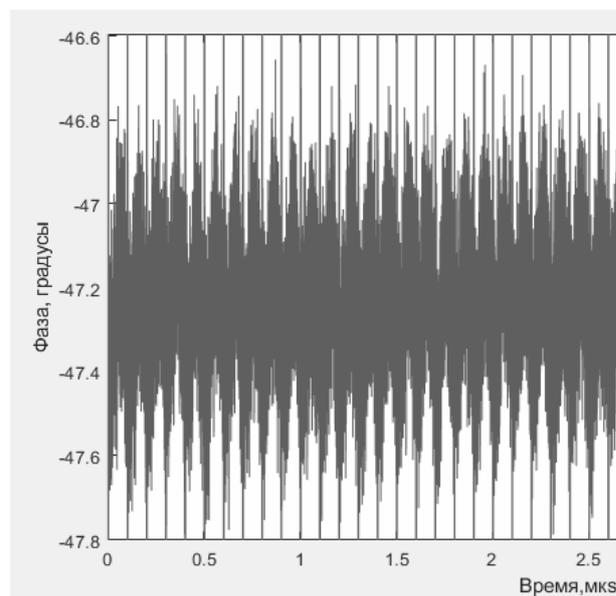
6. Измерение сдвига фаз между 1-м и 3-м каналами

Fig. 6. Measurement of the phase shift between the 1st and 3rd channels

Рисунок 7 иллюстрирует тот факт, что значения фазового рассогласования между 1-м и 4-м каналами имеет усредненное постоянное значение на уровне  $-47,2^\circ$ . В то же время, как и в случае, изображенном на рисунке 5, также наблюдается флуктуация по гармоническому закону относительно постоянного значения с величиной на уровне  $0,2 \pm 0,2^\circ$ .

Стоит отметить, что полученные оценки хотя и имеют специфические характеристик измене-

ния, но значения фазовых рассогласований приемных каналов изменяются в допустимых пределах. Следовательно, допускается применение полученных постоянных значений в качестве калибровочных поправок. Полученные в результате исследования и оценки численные значения найденных сдвигов фазы сведены в таблицу 1.



7. Измерение сдвига фаз между 1-м и 4-м каналами

Fig. 7. Measuring phase shift between 1st and 4th channels

**1. Результаты измерения сдвига фаз между каналами относительно первого канала**

Table 1. The results of measuring the phase shift between channels relative to the first channel

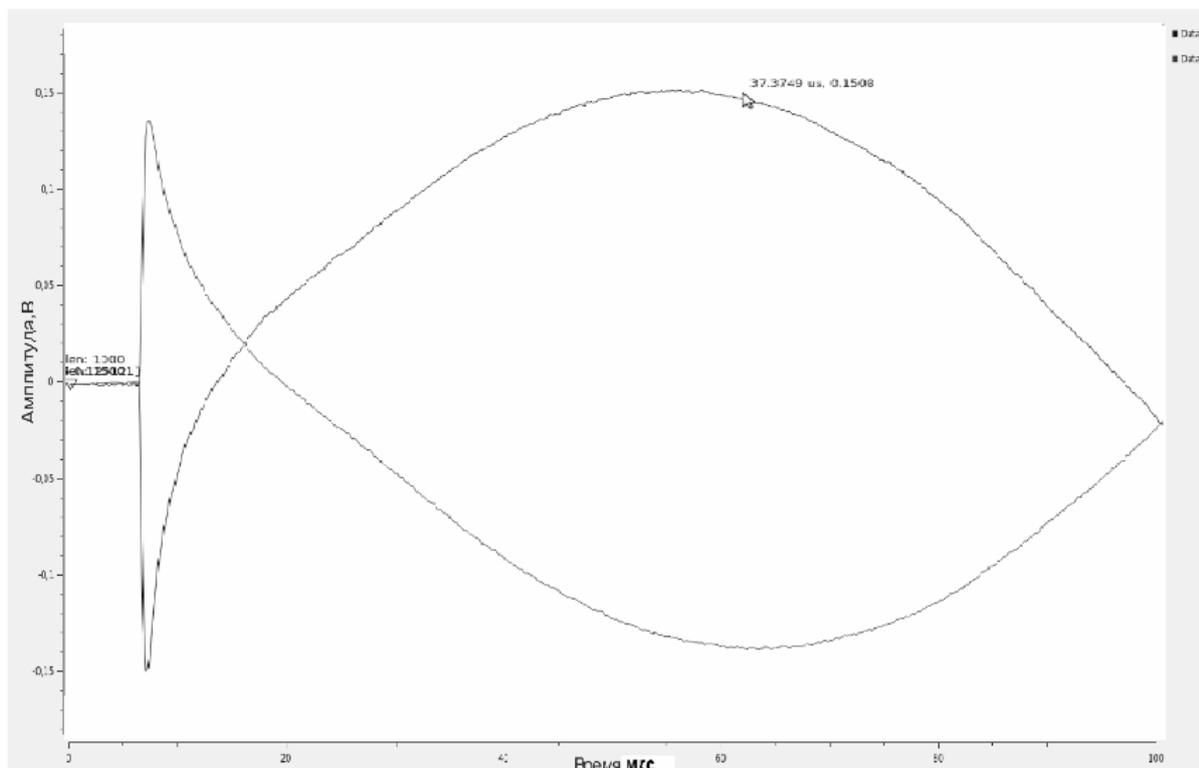
№ канала	1-й	2-й	3-й	4-й
Сдвиг фаз, градусы	0	172,3	173,8	-47,2

С использованием значений найденных фазовых задержек производилась их компенсация и строились графики сигналов после компенсации фазовых задержек в каждом канале с последующим сравнением их амплитуды относительно первого канала. Среднее значение для данных последовательностей было равно фазовому сдвигу между каналами.

На следующем этапе была произведена калибровка полученных фазовых сдвигов в каналах. Калибровка представляла собой программный сдвиг сигналов на соответствующее количество отчетов, что эквивалентно умножению сигнала в трактах на комплексную экспоненту соответствующим данным каналам фазовым сдвигам.

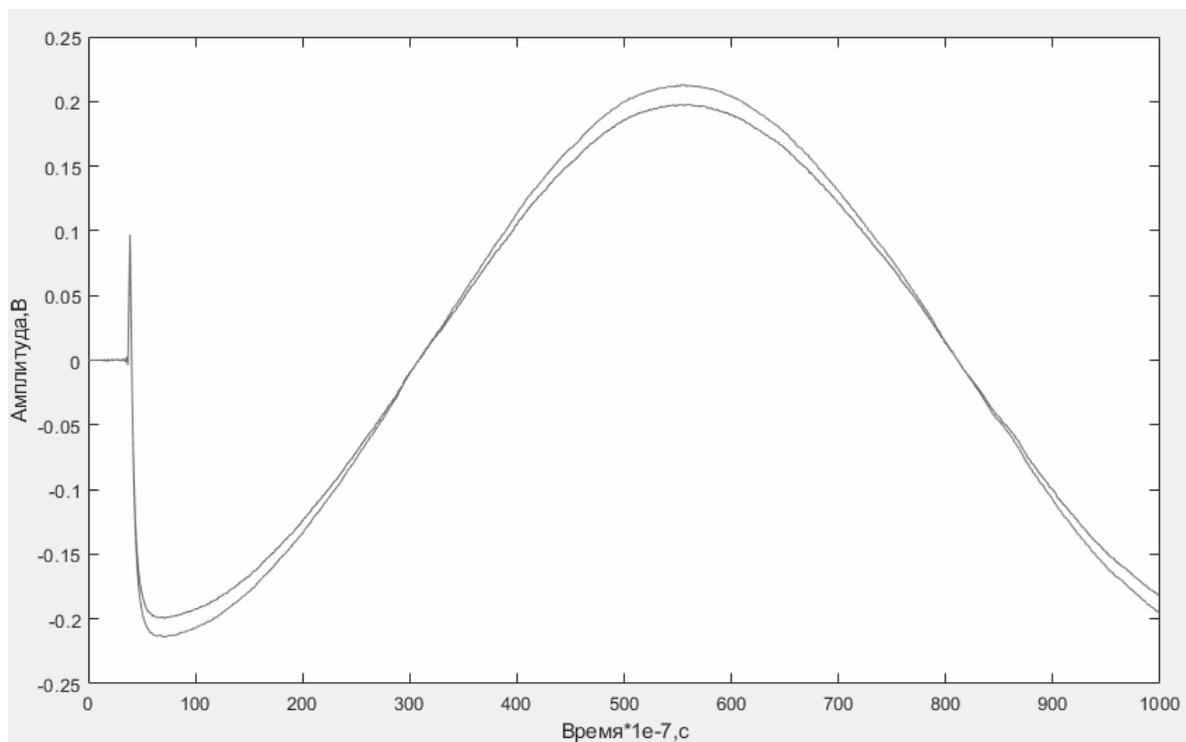
Для более качественного соотнесения результатов представлены графики сигналов до

произведенной калибровки и после нее для 1-го и 2-го каналов (рис. 8, 9).



. 8. Графики принятых сигналов без калибровки между 1-м и 2-м каналами

Fig. 8. Graphs of received signals without calibration between 1st and 2nd channels



. 9. Графики принятых сигналов после калибровки между 1-м и 2-м каналами

Fig. 9. Graphs of received signals after calibration between 1st and 2nd channels

Анализ полученных результатов позволяет говорить о том, что после калибровки уровни сигналов в каналах имеют незначительные отличия. Для сравнения значения оценки уровней сигналов в каналах представлены в таблице 2.

## 2. Результаты измерения уровней сигналов в каналах

Table 2. The results of measuring signal levels in channels

№ канала	1-й	2-й	3-й	4-й
Уровень сигнала	0,2	0,19	0,207	0,21

Исходя из найденных значений можно сделать вывод, что относительная погрешность по уровню сигнала между каналами составила  $\pm 2\%$  для 2-го канала,  $\pm 4\%$  – для 3-го и  $\pm 7\%$  – для 4-го канала относительно первого. Следует отметить, что калибровка уровней сигналов в каналах обусловлена большей частью выбором коэффициентов для каждого из каналов устройства.

### Результаты испытаний

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

- Разработана методика проверочных испытаний SDR-платформ стенда цифровой антенной решетки для оценки фазовых и амплитудных рассогласований между приемными каналами.

- Согласно предложенной методике для оценки фазовых и амплитудных рассогласований приемных трактов стенда ЦАР были проведены испытания и получена оценка результатов исследования.

- Выявлено, что каналы четырехканального приемника имеют постоянный сдвиг фаз относительно первого канала и равны 172 градусам для 2-го канала, 173 – для 3-го и –47 – для 4-го канала. Данный сдвиг фаз не зависит от времени.

- С использованием полученных результатов была проведена калибровка фазовых сдвигов, в ходе которой было установлено, что на графиках наблюдается несоответствие уровней сигналов между каналами. Уровни сигналов на каждом канале равны 0,2, 0,19, 0,207, 0,21 соответственно для каждого канала при усилении 40 dB.

- Было установлено, что относительная погрешность по уровню сигнала между каналами составляет  $\pm 2\%$  для 2-го канала относительно первого,  $\pm 4\%$  – для 3-го и  $\pm 7\%$  – для 4-го канала соответственно. Кроме того, необходимо отметить, что калибровка уровней сигналов в каналах обусловлена большей частью выбором коэффициентов для каждого из каналов устройства.

## Библиографические ссылки

1. Dmitriev D.D. Methods beam forming adaptive digital array and their study using a computer model, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018. 8 p.

2. Vannucci G., Bletsas A. and Leigh D.A software-defined radio system for backscatter sensor networks. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, vol. 7, no. 6, pp. 2170-2179.

3. Nechaev Yu.B., Peshkov Iliia. The Multibeam Digital Antenna Array with Directive Emitters for Pseudo Noise (PN) Signals Spatial Filtering, Conf., 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2019, 6 p.

4. Vasin A.A., Ponomarev L.I. High-accuracy direction finding of arbitrarily correlated multipath signals with the use of digital antenna arrays. J. of Communications Technology and Electronics, 2015, vol. 60, no. 12, pp. 1311-1321.

5. Angelo A. Beltran Jr., Francisco I. Alano. A simulation research on linear beam forming transmission. International J. of Scientific Engineering and Technology, vol. 3, no. 12, pp. 1431-1435.

6. Исследование и оценка характеристик сквозного тракта стенда, реализующего цифровую антенную решетку / А. С. Раев, П. М. Касимов, А. А. Зайцева, А. Н. Копысов // Приборостроение в XXI веке: интеграция науки, образования производства : Сб. материалов XV Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 20–22 ноября 2019 г.). Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. С. 277–285.

7. . . . Поляризационный след и поляризационный контраст малоразмерных радиолокационных объектов : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 111 с.

8. Srikanth Pagadarai, Travis Collins, Neel Pandeya. Phase Synchronization Capability of Twin RXD aughterboards and DoA Estimation. Available from World Wide Web. Ettus Research, 2016, 15 p.

9. . . . К вопросу выбора программных инструментов для моделирования радиолокационных систем // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 72–81. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-72-81.

10. Neel Pandeya, Nate Temple. Synchronization and MIMO Capability with USRP Devices. Available from World Wide Web. Ettus Research, 2016, 8 p.

11. . . . Основы спектрального анализа : пер. с англ. С. М. Смольского ; под ред. Ю. А. Гребенко. Изд. 2-е, испр. М. : Горячая линия – Телеком, 2014. 226 с. ISBN 978-5-9912-0429-3.

12. . . . MATLAB. Полный самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2017. 768 с.

## References

1. Dmitriev D.D. Methods beam forming adaptive digital array and their study using a computer model, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018. 8 p.

2. Vannucci G., Bletsas A. and Leigh D.A software-defined radio system for backscatter sensor networks.

IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, vol. 7, no. 6, pp. 2170-2179.

3. Nechaev Yu.B., Peshkov Iliia. The Multibeam Digital Antenna Array with Directive Emitters for Pseudo Noise (PN) Signals Spatial Filtering, Conf., 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2019, 6 p.

4. Vasin A.A., Ponomarev L.I. High-accuracy direction finding of arbitrarily correlated multipath signals with the use of digital antenna arrays. *J. of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 12, pp. 1311-1321.

5. Angelo A. Beltran Jr., Francisco I. Alano. A simulation research on linear beam forming transmission. *International J. of Scientific Engineering and Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 1431-1435.

6. Raev A.S., Kasimov P.V., Zajceva A.A., Kopysov A.N. *Yssledovaniye i otsenka harakteristik skvoznoho trakta stenda, realizuyushchego tsifrovuyu antenmuyu reshetku (Izhevsk, 20–22 noyabrya 2019 g.)* [Research and Evaluation of Characteristics of Through Path of the Stand That Implements a Digital Antenna Array (Izhevsk, November 20-22, 2019)]. *Sbornik materialov XV Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferencyi "Proborostroeniye v 21 veke: yntegratsiya nauki, obrat-*

*zovaniya, proizvodstva*. [Instrumental Engineering in the XXI Century. Proc. XV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ., 2019, pp. 277-285 (in Russ.).

7. Krivin N.N. *Polyarizatsionnyi sled i gjkyarizatsionnyi contrast malorazmernih radiolokatsionnykh obyektov* [Polarizing trace and polarizing contrast of small-size radar object]: PhD thesis. Tomsk, 2015, 111 p. (in Russ.).

8. Srikanth Pagadarai, Travis Collins, Neel Pandeya. Phase Synchronization Capability of Twin RXD aughterboards and DoA Estimation. Available from World Wide Web. Ettus Research, 2016, 15 p.

9. Raev A.S., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V. [On the issue of choosing software tools for modeling radar systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 72-81 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-72-81. (in Russ.)

10. Neel Pandeya, Nate Temple. Synchronization and MIMO Capability with USRP Devices. Available from World Wide Web. Ettus Research, 2016, 8 p.

11. Christofer Rausher, Volker Janssen, Roland Minihold. Fundamentals of spectrum analysis. Moscow, Telecom Publ., 2014, 226 p. ISBN: 978-5-9912-0429-3.

12. Dyakonov V.P. MATLAB. A complete introduction. Moscow, DMKPress Publ., 2017, 768 p. (in Russ.).

#### Development of Software and Hardware for Simulating the Measurement of the Mismatch of the Characteristics of the Receiving Channels of the Digital Antenna Array Stand Based on USRPX310

A.S. Raev, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.A. Kopysov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Currently, with the development of digital signal processing methods, there is a transition of all spheres of human activity to a new standard of equipment. This aspect has greatly affected the military sphere, in particular, the field of radar. The development of devices supporting digital processing has led to the creating of software-defined radio (SDR) technology. As a result of this technology's formation, it became possible to develop modern radar systems using software models based on SDR technology. However, there is a problem with the qualitative construction of these systems associated with SDR devices' imperfect parameters. For example, the lack of identity in the channels.*

*This paper aims to numerically evaluate the mismatch of characteristics between channels of SDR devices. The object of research is a digital antenna array stand. To achieve this goal, it is necessary to develop a method for measuring characteristics based on which the tests are carried out.*

*During the tests, graphs of changes in the phase shifts between channels from time to time, and numerical estimates of the values are constructed. It is revealed that the channels of a four-channel receiver have a constant phase shift relative to the first channel. This phase shift is maintained over time for each channel.*

*After determining the absolute values of phase shifts, a method for their calibration was developed. It will allow you to use the selected tools when developing a phased array antenna. However, during calibration, there was a discrepancy of signal levels between the channels. The relative level error was  $\pm 2\%$  for the second channel,  $\pm 4\%$  for the third one, and  $\pm 7\%$  for the fourth one relative to the first channel.*

**Keywords:** software defined radio, phased antenna array, USRPX310, UBX 160 MHz, Twin RX 80 MHz, Gnu Radio, MATLAB.

Получено 04.08.2020

#### Образец цитирования

Раев А.С., Копысов А.А., Хворенков В.В. Изменение рассогласований характеристик приемных каналов стenda цифровой антенной решетки на базе USRPX310 // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 69–76. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-69-76.

#### For Citation

Raev A.S., Kopysov A.A., Khvorenkov V.V. [Development of Software and Hardware for Simulating the Measurement of the Mismatch of the Characteristics of the Receiving Channels of the Digital Antenna Array Stand Based on USRPX310]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 69-76 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-69-76.