

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.396.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА ПРИ КОГЕРЕНТНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО ШУМА

Поздняков Александр Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника и радиосистемы»
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: 11alexpoz@mail.ru.

Поздняков Владислав Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника и радиосистемы»
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: Vlad_23@mail.ru.

Калюжный Александр Александрович

аспирант кафедры «Радиотехника и радиосистемы»
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: alex.kalyuzhnyy77@gmail.com.

Адрес: 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: Рассмотрен метод восстановления периодического сигнала в шумах в виртуальном стробоскопическом приёмнике путём накопления и усреднения отсчётов. Для расширения полосы пропускания до десятков гигагерц применяется когерентная дискретизация, при которой в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число равномерных отсчётов. Массив данных, полученных с помощью аналого-цифрового преобразователя, выстраивается в нужном порядке путём вычисления положения каждой точки в интервале одного или нескольких периодов сигнала. Восстановление осуществляется путём многоциклического накопления и усреднения в каждой точке повторяющегося сигнала и стационарного некоррелированного шума с нулевым средним значением. Результаты апробации и моделирования, представленные в виде графиков исходных отсчётов и восстановленных сигналов, показывают работоспособность метода накопления и усреднения даже при десятикратном превышении шума над сигналом.

Ключевые слова: восстановление сигнала, стробирование, аналого-цифровой преобразователь, трансформация временного масштаба, дискретизация, метод накопления и усреднения.

Постановка задачи

В системах радиолокации, радиочастотного зондирования, мониторинга радиоканала, а также при передаче тестовых и пилот сигналов в каналах связи возникает необходимость обнаружения и восстановления слабых периодических сигналов с известной частотой на фоне сильного шума. Например, при передаче сигналов радиоуправления с целью скрытности работают при низких отношениях сигнал/шум со значениями $-10 \dots -20$ дБ, т.е. уровень шума может многократно превышать уровень сигнала. Для расширения полосы пропускания

подобных анализаторов сигналов до десятков гигагерц применяется когерентное стробирование, при котором в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число равномерных отсчётов [1–4]. Структура виртуального комплекса, предназначенного для мониторинга и испытаний радиоканала, представлена на рис. 1. Основой комплекса является персональный компьютер (ПК), в свободный слот которого включена плата расширения, содержащая модули аналогового адаптера, цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей (ЦАП и АЦП).

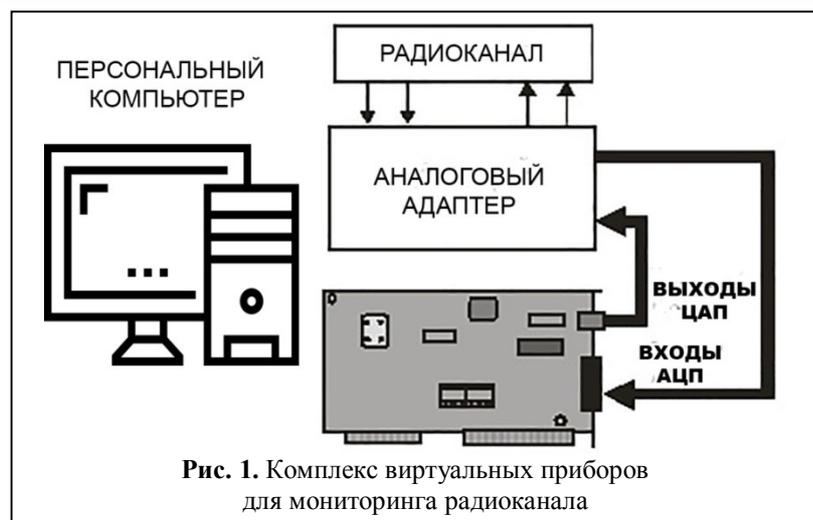


Рис. 1. Комплекс виртуальных приборов для мониторинга радиоканала

На выходе цифро-аналогового преобразователя формируется испытательный сигнал, подаваемый на вход радиоканала через аналоговый адаптер, который нормализует выходные параметры в соответствии с задачей испытаний.

При стробировании с равномерным последовательным считыванием мгновенных значений сигнала [5, 6] отношение T_D/T_S является числом близким, но не равным целому: $T_D = nT_S \pm \Delta t$, $T_D/T_S = n \pm \Delta t/T_S$, где n – целое число периодов сигнала между точками стробирования; Δt – заданный шаг считывания в пределах периода сигнала; $T_S/\Delta t = N$ – целое число отсчётов в периоде восстановленного сигнала ($\Delta t \ll T_S$). На выходе АЦП формируется последовательность отсчётов, повторяющих форму исходного сигнала.

Актуальным является восстановление тестового периодического сигнала по массиву дискретных отсчётов, получаемых в результате когерентного стробирования при высоком уровне шума.

Восстановление сигнала методом перестановки отсчётов

В общем случае на выходе АЦП образуется последовательность отсчётов, не повторяющих форму исходного сигнала. Методом восстановления при этом является нелинейная трансформация временного масштаба сигнала с перестановкой мгновенных отсчётов, полу-

чаемых путём стробирования в интервале M периодов сигнала. В этом режиме рабочие частоты дискретизации могут принимать значения в более широком диапазоне, чем в режиме когерентного стробирования с равномерным последовательным считыванием мгновенных значений сигнала.

Отсчёты, получаемые на выходе АЦП, располагаются в интервале восстанавливаемых периодов сигнала в нужном порядке, который определяется их положением

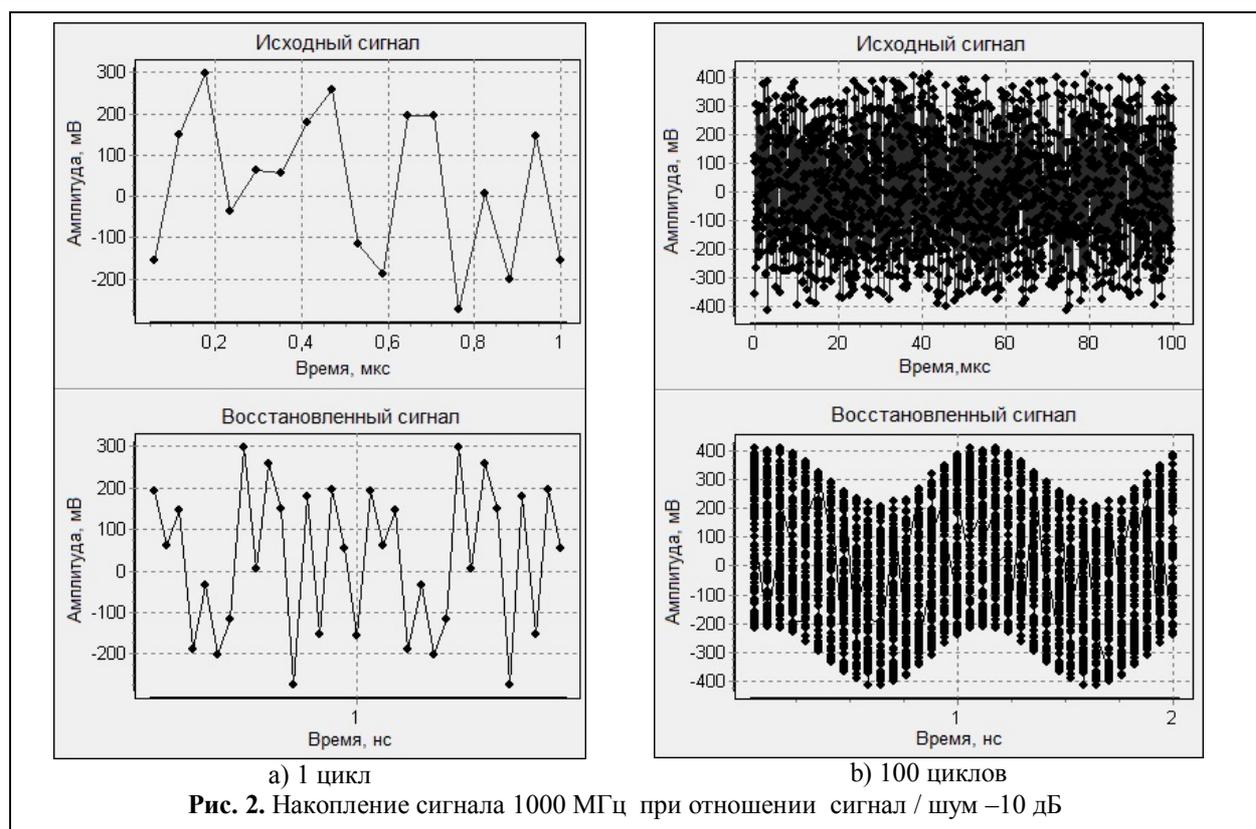
(t_i) в соответствии с выражением [7, 8]:

$$t_i = jT_D - iT_S,$$

где j – порядковый номер (целое число) отсчёта; i – целое число, для которого выполняется условие $T_S \geq jT_D - iT_S > 0$; T_S и T_D – периоды сигнала и дискретизации.

В зависимости от частоты сигнала устанавливается удобная частота дискретизации АЦП, формируются отсчёты и выводится график сигнала на монитор компьютера. В зависимости от соотношения периодов сигнала (T_S) и дискретизации (T_D) применяются режимы восстановления сигнала путём линейной или нелинейной трансформации временного масштаба [9].

В режиме когерентного стробирования величина $T_S/T_D = N/M$ является несократимым отношением целых чисел, показывающих, какое количество отсчётов N делается за один полный цикл, содержащий M периодов сигнала. Если продолжить сбор данных в дополнительных циклах, то при отсутствии шумов и малой нестабильности сигнала по частоте и амплитуде будут получены отсчёты в тех же точках периода восстановленного сигнала, что и в первом цикле. За $2M$ периодов формируется два цикла отсчётов, за $3M$ – три цикла, и так далее.



Многоциклическое стробирование с восстановлением сигнала в шумах

Цикл сбора данных с частотой дискретизации $F_D = F_S / M$ можно начинать в любой момент периода тестового сигнала для получения N неповторяющихся отсчётов в интервале M периодов сигнала. Для выделения периодического сигнала, замаскированного стационарным шумом, необходимо усреднить входной периодический процесс за большое число циклов когерентного стробирования. Каждый цикл – это реализация одного или нескольких периодов сигнала в виде массива цифровых отсчётов, в которых присутствует сумма мгновенных значений анализируемого коррелированного сигнала и некоррелированного шума.

Будем считать, что шум стационарный, некоррелированный и имеет нулевое среднее значение. При уровне шума, превышающем сигнал на $10 \dots 20$ дБ, восстановление формы возможно методом накопления путём многократного повторения циклов и усреднения полученных реализаций. Метод применим, если полезный сигнал в течение всех циклов сбора

данных является периодической функцией. В таких случаях метод называется синхронным или когерентным накоплением [10, 11].

На рис. 2 приведены графики исходной последовательности когерентного стробирования и двух периодов восстановленных точек сигнала 1000 МГц для 1 и 100 циклов сбора данных при 17 отсчётах в интервале периода в одном цикле и отношении сигнал/шум -10 дБ.

Исходные 17 точек одного цикла путём перестановки восстанавливаются в виде двух периодов сигнала, однако искомым гармонический сигнал не обнаружен, но при 100 циклах он хорошо виден как по среднему значению, так и по огибающим снизу и сверху.

Усреднение

На рис. 3 показано восстановление синусоиды 1000 МГц по 51 отсчёту в интервале 4-х периодов с усреднением по 100 циклам при отношении сигнал/шум $+6$ дБ. Амплитуда сигнала превышает уровень шума в два раза. Суммарный сигнал исходная последовательность и совокупность отсчётов после перестановки

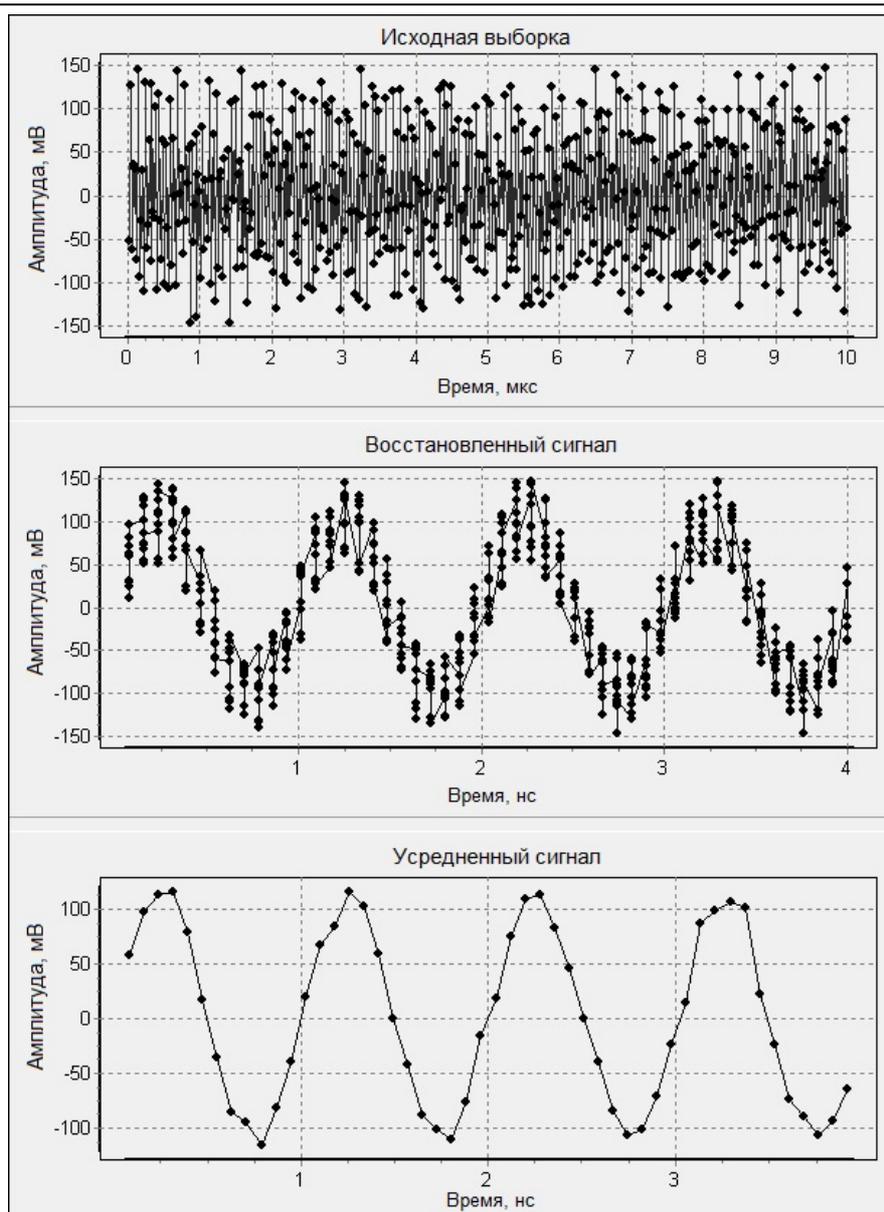


Рис. 3. Восстановление 4-х периодов синусоиды за 100 циклов

имеет размах около 300 мВ. Восстановленный сигнал после усреднения близок к гармоническому. Всего отсчётов $51 \cdot 100 = 510$ за 10000 периодов сигнала по 1 нс, т.е. за 10 мкс. Коэффициент трансформации временного масштаба равен 10000.

Метод восстановления путём накопления и усреднения хорошо работает с периодически сигналами разной формы. На рис. 4 представлено восстановление синусоиды (а), меандра (b), треугольного (c) и пилообразного (d) сигналов при равенстве шума и сигнала. Ис-

ходная амплитуда сигнала 100 мВ. При равенстве амплитуд шума и сигнала размах суммарного колебания достигает 400 мВ. Показано усреднение по 100 циклам с 27-ю точками стробирования в одном цикле.

Метод усреднения применяется в практической метрологии при фильтрации шумов путём многократных измерений [12] с нахождением среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО) среднего, которые соответственно равны:

$$U_s = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K U_i,$$

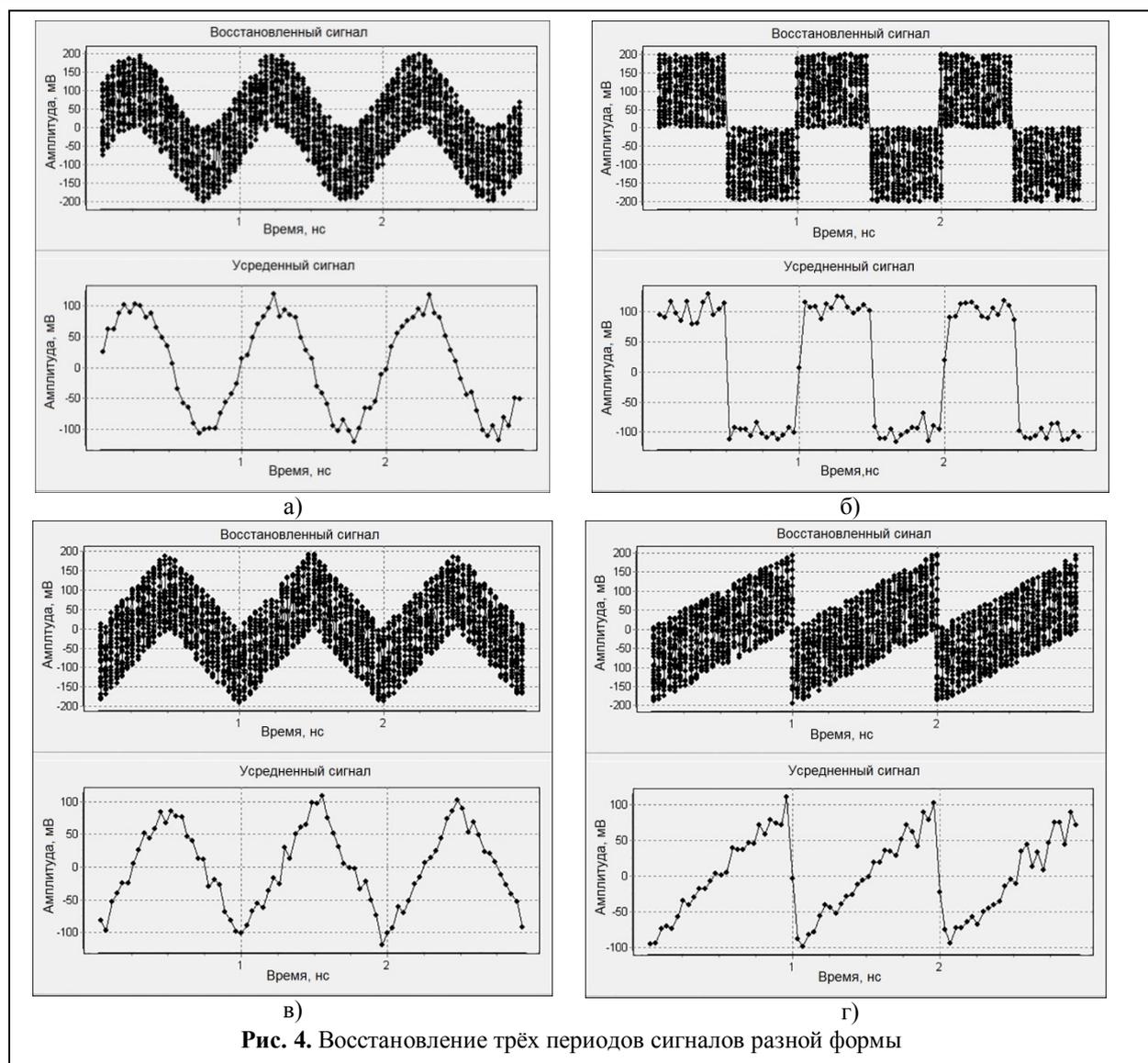
$$\sigma_{CP} = \sigma_1 / \sqrt{K}$$

т.е. СКО уменьшается в \sqrt{K} раз, где K – число отсчётов в каждой точке, равное числу полных циклов; σ_1 – СКО однократного измерения. В каждом цикле реализация

представляет собой сумму полезного сигнала с шумом. После суммирования K реализаций отношение сигнала к шуму возрастет в \sqrt{K} раз.

Алгоритм обнаружения и восстановления тестового сигнала

Шаг 1. В режиме дежурного приёма сигналы и шумы поступают на вход обнаружителя, настроенного на преобразование стробирующих отсчётов в тестовый периодический сиг-



нал известной формы и структуры. При ожидании нескольких сообщений опрос и преобразование осуществляются в последовательном или параллельном режиме.

Шаг 2. При появлении в радиоканале искомого источника сообщения на выходе обнаружителя появляется слабый замаскированный в шумах сигнал, плавно растущий по мере накопления в течение заданного количества циклов.

Шаг 3. Параметры и форма восстановленного сигнала оцениваются для принятия решения о дальнейшем приёме и взаимодействии с источником информации.

Выводы

1. При когерентном стробировании применение алгоритма многоциклического сбора данных с накоплением и усреднением в каждой точке восстанавливаемого периодического сигнала позволяет фильтровать шумы.

2. Многократное считывание значений суммы периодического сигнала и стационарного шума позволяет оценить форму методом накопления и усреднения сигнала даже когда шум десятикратно превышает сигнал.

3. Апробация восстановления сигналов путём моделирования исходных последовательностей отсчётов показала успешное восстановление замаскированного в шумах сигнала раз-

ной формы: гармонического, прямоугольного, треугольного и пилообразного.

4. Важными требованиями при реализации метода накопления и усреднения являются периодичность тестового сигнала с известной частотой и стационарность шума.

Литература

1. Pat. No. WO 2006086257. Coherent interleaved sampling: Kobayashi K., Ems S., Demott J., Schnecker M. Publ. Aug 17, 2006; prior. Feb 7, 2005.

2. A Theoretical View of Coherent Sampling [Электронный ресурс]: Renesas Electronic Corporation. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/application-note/an9705.pdf> (дата обращения 18.09.2019).

3. Вьюхин В.Н., Попов Ю.А., Тани Ю.Л. Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП // Автотметрия. 1997. № 5. С. 9–14

4. Захарченко В.Д. Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами // АН СССР. Радиотехника и электроника. 1980. № 10. С. 2099–2104.

5. Захарченко В.Д. Обработка сигналов при наличии фазовой нестабильности в стробоскопиче-

ской локации // Изв. ВУЗов. Электромеханика. 1999. № 2. С. 37–41.

6. Никитин О.Р., Поздняков В.А., Поздняков А.Д. Восстановление формы сигнала на экране виртуального осциллографа // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы докл. четвертой междунар. науч.-техн. конф. Владимир. 2001. С. 190–192.

7. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем. М.: Радиотехника, 2004. 207 с.

8. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Вычислительный метод восстановления формы дискретизированного периодического сигнала в компьютерных системах испытаний электронных средств // Проектирование и технология электронных средств. 2008. № 1. С. 57–61.

9. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применения цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 545 с.

10. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. Радио. 1978. 296 с.

11. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Сов. Радио. 1975. 304 с.

12. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. 1991. 304 с.

Поступила 18 сентября 2019 г.

English

TEST SIGNAL RECONSTRUCTION WITH COHERENT SAMPLING AMIDST STATIONARY NOISE

Alexander Dmitriyevich Pozdnyakov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: 11alexpoz@mail.ru.

Vladislav Aleksandrovich Pozdnyakov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: Vlad_23@mail.ru.

Alexander Aleksandrovich Kalyuzhny – Postgraduate Student, Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: alex.kalyuzhny77@gmail.com.

Address: 600000, Russia, Vladimir, Gorky Street, 87.

Abstract: A need arises to detect and restore weak periodic signals with known frequency amidst intense noise in radar systems, radio frequency sensing, radio channel monitoring, as well as during transmission of test and pilot signals in telecommunication system channels. For example, noise level can be tenfold higher than the signal level when transmitting wireless control signals for stealth purpose and it is necessary to operate with low signal-to-noise ratios. To expand the bandwidth of such signal analyzers to tens of gigahertz, a coherent sampling is used, in which integral number of uniform sample units is confined in restored signal period. All sample units obtained by analog-to-digital converter are presented in the form of data array, forming order of which is

defined by calculating the position of each sample unit in the interval of one or more periods. If noise level exceeds the signal by 10 ... 20 dB, then form recovery is possible via accumulation mode: through repeated cycles and averaging at each point of the repeated signal and stationary signal-independent noise with zero mean value. One of the main criteria for method applicability is rendering wanted signal in the form of periodic function throughout all data collection cycles. Method performance is considered in the context of virtual facility designed for radio channel monitoring and testing. Testing and simulation results of original sequences of sample units and reconstructed signals manifest successful signal restoration from one to several signal periods of different shapes (harmonic, rectangular, triangular, saw-toothed) amid steady-state noise.

Keywords: signal restoration, strobing, analog-to-digital converter, time scale transformation, sampling, accumulation and averaging method.

References

1. Pat. No. WO 2006086257. Coherent interleaved sampling. Kobayashi K., Ems S., Demott J., Schnecker M. Publ. Aug 17, 2006; prior. Feb 7, 2005.
2. A Theoretical View of Coherent Sampling [Electronic source]: Renesas Electronic Corporation. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/application-note/an9705.pdf> (access date 18.09.2019).
3. *Vjukhin V.N., Popov Yu.A., Tani Yu.L.* Method research of coherent sampling for testing high bit ADC. *Avtometriya*. 1997. No. 5. Pp. 9–14.
4. *Zakharchenko V.D.* Processing of complex radio signals by stroboscopic methods. AS USSR. *Radiotekhnika i elektronika*, 1980. No. 10. Pp. 2099–2104.
5. *Zakharchenko V.D.* Signal processing with phase instability in stroboscopic location. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika*. 1999. No. 2. Pp. 37–41.
6. *Nikitin O.R., Pozdnyakov V.A., Pozdnyakov A.D.* Waveform restoration in virtual oscilloscope screen. *Perspective Technologies in Information Transmission Systems: Academic papers. Fourth International Scientific and Technical Conference Vladimir*. 2001. Pp. 190–192.
7. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A.* Automation of experimental research, tests and monitoring of radio systems. Moscow: Radiotekhnika, 2004. 207 p.
8. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A.* Recovery computational method of the sampled signal shape in the computer systems of electronic instrumentation testing. *Design and technology of electronic means*. 2008. No. 1. Pp. 57–61.
9. *Rabiner L., Gold B.* Theory and Application of Digital Signal Processing. Moscow: Mir, 1978. 545 P.
10. *Kulikov E.I., Trifonov A.P.* Estimation of signal parameters amidst noise. Moscow: Sov. Radio. 1978. 296 p.
11. *Rosenberg V.Ya.* Introduction to the theory: Measuring System Accuracy. Moscow: Sov. Radio. 1975. 304 p.
12. *Novitsky P.V., Zograf I. A.* Error Estimation of Measuring Results. Leningrad: Energoatomizdat. 1991. 304 p.