

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВТОРЯЮЩЕЙСЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ В КАНАЛЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ СТРОБИРОВАНИИ

Калюжный Александр Александрович

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: alex.kalyuzhnyy77@gmail.com

Аль Рубеи Мохаммед

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: alrubeim1109@gmail.com

Поздняков Александр Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: 11alexpoz@mail.ru

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: Рассмотрен метод восстановления повторяющейся последовательности импульсов в виртуальном стробоскопическом анализаторе путём перестановки, накопления и усреднения отсчётов, полученных при нелинейной когерентной дискретизации тестового или зондирующего сигнала. Массив данных выстраивается в нужном порядке путём вычисления положения каждой точки в выбранном интервале восстановления сигнала. При передаче тестовых и пилот сигналов в каналах передачи возникает необходимость восстановления в шумах повторяющейся импульсной последовательности известной длительности. Показано, что метод когерентного стробирования позволяет восстанавливать во временной области как периодические сигналы произвольной формы, так и повторяющиеся импульсные последовательности при низком отношении сигнал/шум. Основой комплекса является персональный компьютер (ПК), в свободный слот которого включена плата расширения, содержащая устройства аналогового ввода-вывода, цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей (ЦАП и АЦП). На выходе ЦАП формируется сигнал в виде тестовой последовательности, подаваемой на вход радиоканала в соответствии с задачей испытаний. Результаты моделирования и апробации представлены в виде графиков исходных последовательностей отсчётов и восстановленных сигналов.

Ключевые слова: восстановление сигнала, когерентное стробирование, аналого-цифровой преобразователь, канал передачи данных, отсчёт, трансформация временного масштаба, дискретизация.

В системах радиолокации, зондирования, автоматического управления, спасения, аварийной и охранной сигнализации могут передаваться кодовые импульсные последовательности малой разрядности. Они могут многократно повторяться в виде кодов одного или нескольких сообщений. Это могут быть команды и информационные сообщения типа SOS, ON, OFF, RUN, STOP и другие. Задача обнаружения таких сообщений осложняется, если присутствуют шумы превышающие сигнал.

Стремительное развитие компьютерной техники, контрольно-измерительного оборудо-

вания, вычислительных алгоритмов и использование методов цифровой обработки сигналов расширило возможности восстановления и распознавание импульсов, а также их последовательностей. Открытая архитектура персонального компьютера (ПК) предоставляет возможность оснастить его аналого-цифровым преобразователем (АЦП), реализующим разнообразные алгоритмы цифровой обработки, тем самым превращая ПК в комплекс специальных виртуальных приборов. Такая измерительная система обладает универсальностью и гибкостью, что позволяет настроить её под уз-

коспециализированный набор задач, оперативно изменяя конфигурацию и набор параметров комплекса. Это является существенным преимуществом перед стационарным измерительным оборудованием с функциональностью строго ограниченной производителем.

При измерении периодических сигналов для расширения полосы рабочих частот до десятков гигагерц применяется стробирование с линейной трансформацией временного масштаба [1–4]. В зависимости от соотношения периодов сигнала (T_S) и дискретизации (T_D) можно выделить режимы линейного и нелинейного стробирования:

Когерентное стробирование с линейной трансформацией времени.

Осуществляется равномерное последовательное считывание соседнего значения сигнала с шагом стробирования:

$$T_D = (nT_S \pm \Delta t) = (nT_S \pm T_S/N) = T_S(n \pm 1/N),$$

где n — целое число периодов сигнала между точками стробирования; Δt — заданный шаг считывания по времени в пределах периода сигнала ($\Delta t \ll T_S$); N — целое число отсчётов за один полный цикл. Восстановление сигнала осуществляется путём последовательного соединения получаемых отсчётов. Цикл сбора

данных составляет $M = nN$ периодов сигнала с шагом восстановленного сигнала $\Delta t = T_S/N$.

Когерентное стробирование с нелинейной трансформацией времени.

Здесь отношение $T_S/T_D = N/M$ — несократимая дробь, показывающая, какое целое число отсчётов N делается за один полный цикл длиной M периодов сигнала. Это условие когерентной выборки [5–8] с равномерной дискретизацией и возвращением сигнала перестановкой отсчётов в свою точку времени и фазы сигнала.

Отсчёты, получаемые стробирующим аналого-цифровым преобразователем, располагаются в восстанавливаемом отрезке сигнала в нужном порядке в соответствии с выражением: $t_i = jT_D - iT_S$, 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. Отношение $T_S/T_D = N/M$ — несократимая дробь, показывающая, какое целое число отсчётов N делается за один полный цикл длиной M периодов сигнала.

Отношение $F_D/F_S = N/M$ является несократимой дробью, т.е. это режим когерентного стробирования. Исходная последовательность от-

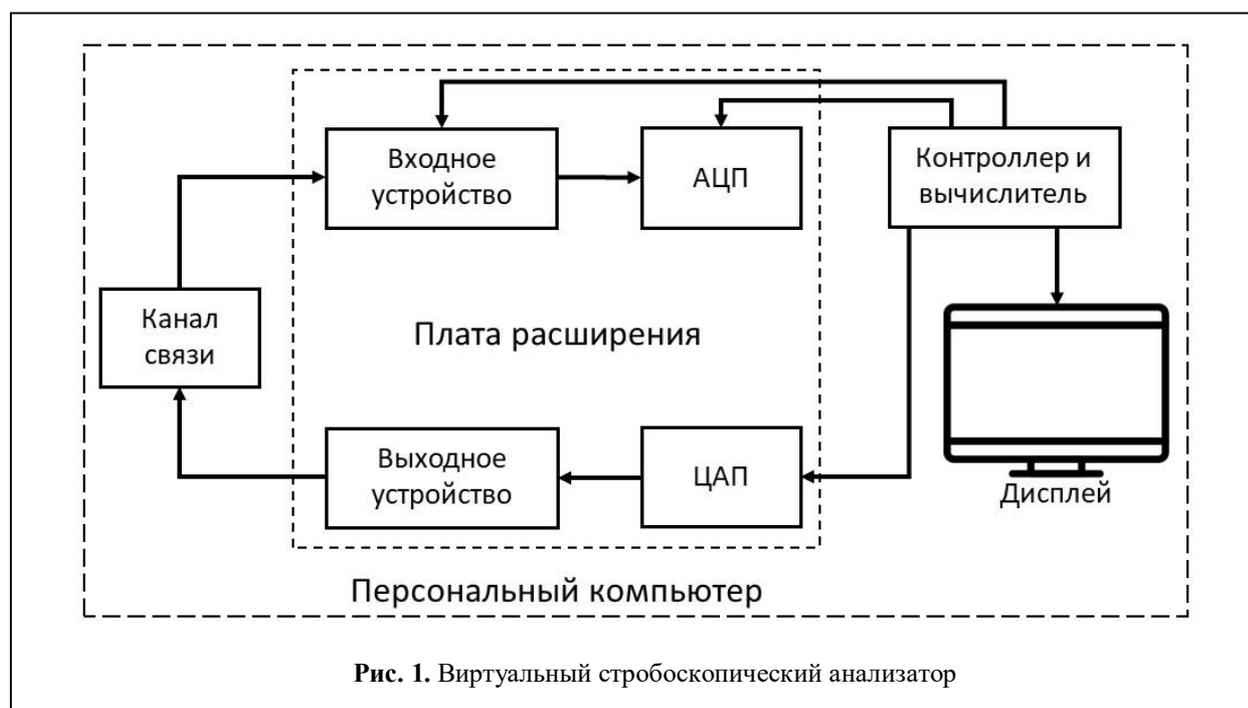


Рис. 1. Виртуальный стробоскопический анализатор

счётов выглядит как сигнал подобный шуму. Для числа периодов сигнала M реализуется первый цикл сбора данных, для массива отсчётов $2M$ реализуется 2 цикла, для $3M$ — 3 цикла, и так далее.

В зависимости от ожидаемого отклонения частоты и требуемой разрешающей способности по времени можно выбрать интервал накопления временного сдвига до сотен тысяч периодов. Из отношения когерентности следует, что $F_D = F_S N / M$ или $F_D M = F_S N$. Считаем, что частота сигнала задана, например 1000 МГц, а число точек в интервале периода тоже может быть заранее выбрано, например 11. Тогда для доступного значения частоты стробирования рассчитывается общее число периодов сигнала и длительность получения N отсчётов.

В режиме когерентного стробирования с нелинейным считыванием мгновенных значений сигнала величина $T_D / T_S = M / N$ является несократимым отношением целых чисел, которые показывают, какое количество отсчётов N делается за один полный цикл длиной M периодов сигнала.

При линейной трансформации временного масштаба сигнала на выходе широкополосного стробирующего аналого-цифрового преобразователя формируется последовательность отсчётов, повторяющих форму исходного сигнала. Чтобы получить заданный коэффициент трансформации и необходимое число N отсчётов в пределах периода сигнала T_S , выбирается шаг считывания по времени Δt и период дискретизации $T_D = n T_S \pm \Delta t$, где n — целое число периодов сигнала между точками стробирования; $\Delta t \ll T_S$. При линейной трансформации временного масштаба шаг считывания равен эквивалентному шагу дискретизации и восстановления периода сигнала.

В расширенном диапазоне значений шага считывания $0 < \Delta t < T_S$ реализуется нелинейная трансформация временного масштаба и образуется массив отсчётов, последовательность которых не повторяет форму исходного сигнала. Для восстановления формы нужна перестановка отсчётов.

Восстановление импульсных последовательностей.

Метод восстановления периодического сигнала путём перестановки, накопления и усреднения, рассмотрен в работах [5–11]. Отсчёты, получаемые на выходе АЦП, располагают в интервале восстанавливаемого периода сигнала в порядке, который соответствует линейной трансформации временного масштаба. Исследования показали, что можно восстанавливать периодические кодовые последовательностей импульсов любой другой формы. Для этого вместо периода сигнала T_S следует ввести интервал $T_M = m T_T$, где m — число периодов тактовой частоты. При этом восстанавливаться будет последовательность импульсов с периодом T_T и общей длительностью m тактов. Отсчёты располагают на оси времени в соответствии с уточнённым выражением:

$$t_i = j T_D - i T_M,$$

где i — целое число, для которого выполняется условие $m T_T = T_M \geq j T_D - i T_M > 0$.

В методе когерентного стробирования и восстановления периодического сигнала полученные отсчёты располагают на оси времени в правильном порядке путём вычисления их положения (t_i) в соответствии с выражением:

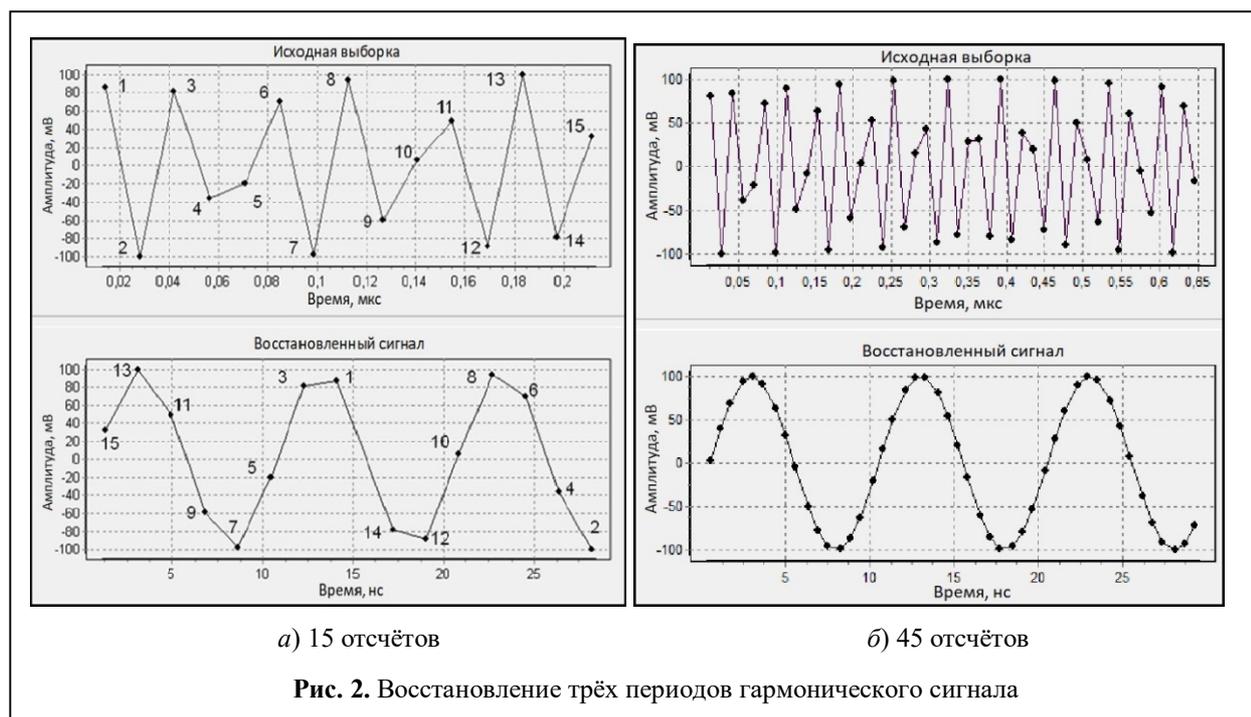
$$t_i = j T_D - i T_S, \quad (1)$$

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

При равномерной дискретизации в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число отсчётов N с постоянным шагом. Период дискретизации сигнала можно задать выражением $T_D = M T_S / N$, где M — коэффициент трансформации временного масштаба, численно равный целому числу периодов сигнала, укладываемых в интервале сбора массива отсчётов. Для частоты сигнала F_S частота равномерной дискретизации

$$F_D = F_S N / M. \quad (2)$$

Если N/M — простая несократимая дробь, то стробирование является когерентным, при от-



сутствии шума дополнительные отсчёты повторяют данные полученные в первом цикле. В соответствии с выражением (2) для частоты сигнала F_S можно получить сетку частот когерентного стробирования $F_D = F_S N / M$ при произвольном числе точек в интервале периода.

В зависимости от соотношения частот сигнала и дискретизации число периодов M выбирается целым от единиц до сотен тысяч. Для получения несократимого отношения N/M можно взять простое число M и удобное N , или удобное M и простое N , или оба простых числа.

На рис. 2 показано восстановление 3-х периодов гармонического сигнала для 15 отсчётов при отсутствии шума, частоты сигнала 100 МГц и частоты дискретизации 71 МГц. Получены отсчёты в виде последовательности с 1 по 15, которая после перестановки стала иной 15-13-11-9-7-5-3-1-14-12-10-8-6-4-2.

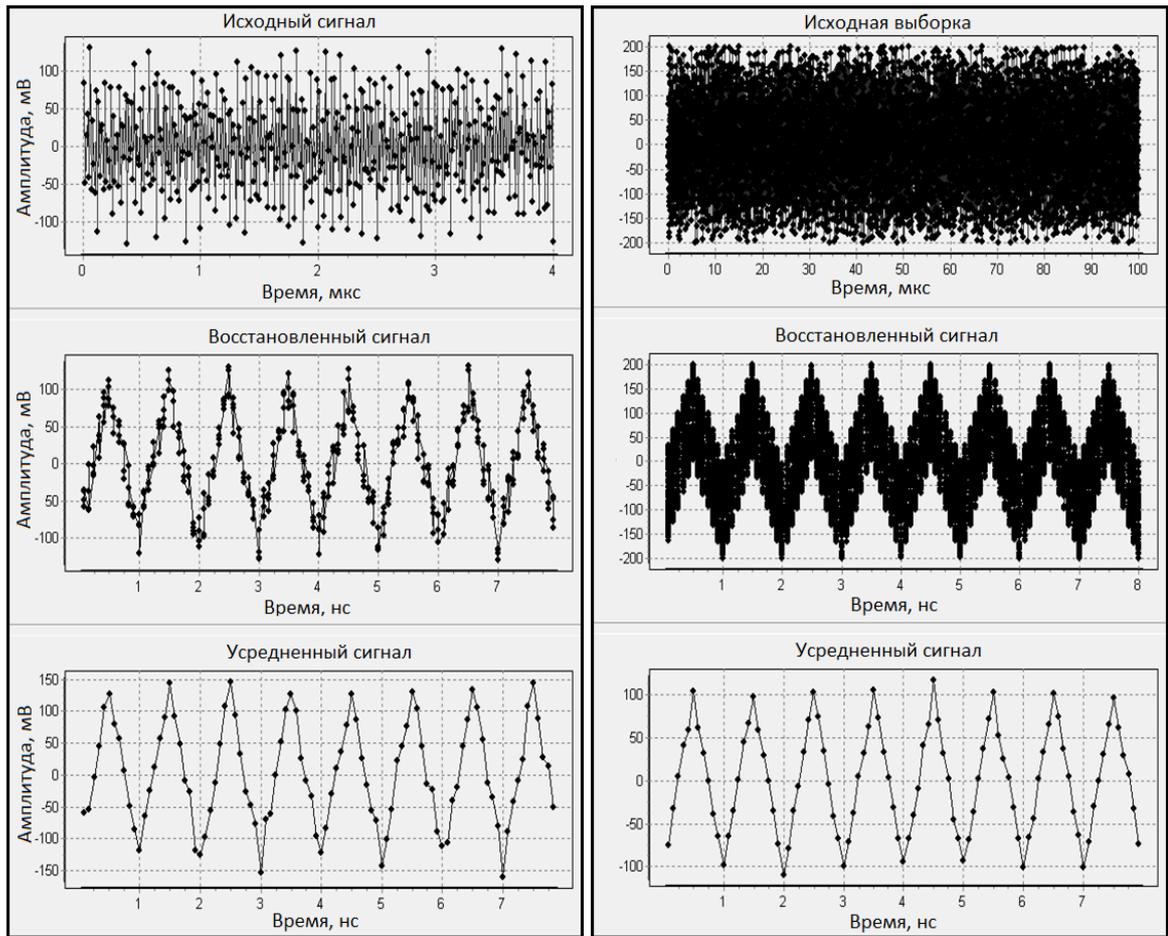
Для выделения периодического сигнала, замаскированного стационарным шумом, необходимо усреднить отсчёты в одной и той же фазе сигнала за большое число циклов когерентного стробирования. Каждый цикл — это реализация одного или нескольких периодов сигнала в виде массива цифровых отсчё-

тов, в которых присутствует сумма мгновенных значений анализируемого сигнала и шума [12–15].

На рис. 3 приведены результаты моделирования восстановления 8 периодов треугольного сигнала 1000 МГц для 4 и 100 циклов соответственно при отношении сигнал/шум 10 дБ и 0 дБ.

На верхнем графике показан исходный массив последовательных отсчётов, получаемых с частотой дискретизации (здесь 96 МГц) во временном интервале 4 и 100 циклов по 1000 периодов сигнала 1000 МГц. Исходные последовательности выглядят как шум. На среднем графике представлен тот же массив после перестановки отсчётов на нужные позиции в пределах восстанавливаемого интервала длительностью 8 периодов треугольных импульсов. На нижнем графике приведены усреднённые данные, показывающие, что для отношения С/Ш=10 дБ достаточно взять 4 цикла, а для 100 циклов можно работать с шумами равными и даже более высокими, чем сигнал.

Число отсчётов N в одном цикле выбирается исходя из требований к разрешающей способности, оно может достигать сотен для большого числа тактов и сложной формы им-



а) 4 цикла, сигнал/шум 10 дБ

б) 100 циклов, сигнал/шум 0 дБ

Рис. 3. Восстановление последовательности 8 треугольных импульсов

пульсов. В среднем для одного такта последовательности требуется от 7 до 29 точек, а некоторых случаях еще больше, если информация содержится в форме импульсов, например, когда форма ступенчатая или комбинированная из треугольных, пилообразных и других форм сигналов.

Для выделения периодического сигнала, замаскированного стационарным шумом, необходимо усреднить отсчеты в одной и той же фазе сигнала за большое число циклов когерентного стробирования. Каждый цикл — это реализация одного или нескольких периодов сигнала в виде массива цифровых отсчетов, в которых присутствует сумма мгновенных значений анализируемого коррелированного сигнала и некоррелированного шума.

число циклов и соответственно отсчетов в каждой точке восстановленного сигнала.

Алгоритм работы содержит следующие шаги:

1. Для ожидаемого сигнала выбирается период тактовой частоты, число тактов в цикле и число циклов повторяющейся последовательности.
2. В режиме дежурного приёма путём накопления проверяется появление сигнала с заданной тактовой частотой и длительностью.
3. Собирается массив данных в требуемом объёме для получения нужного разрешения по времени.
4. Осуществляется перестановка дискретных отсчетов, полученных в результате стробирования.

5. Осуществляется накопление данных во всех фиксированных точках каждого такта или фазы сигнала.

5. Реализуется усреднение по массиву отсчётов в каждой точке с фильтрацией шумов.

6. Восстанавливается импульсная кодовая последовательность или заданное число периодов сигнала специальной формы.

Моделирование показало, что метод перестановки, накопления и усреднения отсчётов позволяет восстанавливать во временной области не только периодические сигналы специальной формы, но также повторяющиеся импульсные последовательности при превышении шума над сигналом более, чем в 10 раз. Представленный метод позволяет восстанавливать сложные сигналы и периодические кодовые последовательности импульсов.

Литература

1. A Tutorial in Coherent and Windowed Sampling with A/D Converters [Электронный ресурс]: Renesas application note, 1997. URL: <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/an9675-tutorial-coherent-and-windowed-sampling-ad-converters> (дата обращения 1.12.2022).
2. A Theoretical View of Coherent Sampling [Электронный ресурс]: Renesas application note, 1997. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/document/apn/an9705-theoretical-view-coherent-sampling> (дата обращения 1.12.2022).
3. Pat. WO2006086257A2 Coherent interleaved sampling // Kobayashi K., Ems S., Demott J., Schneckner M. Appl. 06.02.2006. Publ. 17.08.2006.
4. Вьюхин В.Н., Попов Ю.А., Тани Ю.Л. Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП // Автометрия. 1997. №5. С. 9–14.
5. Поздняков А.Д., Калюжный А.А. Оценка частоты периодического сигнала при когерентном стробировании // Проектирование и технология электронных средств. 2018. №4. С. 19–23.
6. Захарченко В.Д. Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами // АН СССР. Радиотехника и электроника. 1980. №10. С. 2099–2104.
7. Никитин О.Р., Поздняков В.А., Поздняков А.Д. Восстановление формы сигнала на экране виртуального осциллографа (материалы конференции) Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы докл. четвертой междунар. науч.-техн. конф. Владимир. 2001. С. 190–192.
8. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем: [научное издание] М.: Радиотехника, 2004. 208 с.
9. 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.
10. Поздняков А.Д., Поздняков В.А., Калюжный А.А. Восстановление дискретизированного сигнала при несинхронизированном стробировании // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2017. Вып.19. С. 4–7.
11. Поздняков А.Д., Поздняков В.А., Калюжный А.А. Восстановление периодического сигнала в виртуальном осциллографе при несинхронизированном стробировании // Проектирование и технология электронных средств. 2017. №3. С. 52–56.
12. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применения цифровой обработки сигналов. М.: Мир. 1978. 545 с.
13. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. Радио. 1978. 296 с.
14. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Сов. Радио. 1975. 304 с.
15. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. 1991. 304 с.

Поступила 14 ноября 2021 г.

RESTORATION OF RECURRENT PULSE TRAIN IN DATA TRANSMISSION CHANNEL WITH COHERENT STROBING

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

E-mail: alex.kalyuzhnyy77@gmail.com

AL Rubei Mohammed — Postgraduate Student of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: alrubeim1109@gmail.com

Alexander Dmitrievich Pozdnyakov — Grand Dr. in Engineering, the Professor of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: 11alexpoz@mail.ru

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

Abstract: There is need to detect and restore weak periodic signals of known frequency amid intense noise in radar systems, radio frequency sensing, radio channel monitoring, as well as when transmitting test and pilot signals in communication channels. This may occur for instance, when transmitting telemetry and radio control signals for stealthiness purpose and there is need to operate at low signal-to-noise ratios, i.e. the noise level can be ten-fold more than that of the wanted signal level. These can be short commands and informational messages of various types, for example, SOS, ON, OFF, RUN, STOP and others. Strobings with time-scale linear transformation is used when measuring periodic signals to expand operating frequency band to tens of gigahertz. Reshaping can be done by accumulation method through looped cycles and by averaging the obtained implementations when noise level exceeds the signal by 10 ... 20 dB. The method is applicable for periodic signals of particular shape, recurrent pulse trains, and it enables also to restore aggregate signals and pulse periodic code-chains. Signal is generated at DAC output in the form of test sequence fed to the radio channel input according to test objectives. The results of simulation and method testing are presented as graphs of source pulse trains and restored signals. Illustrations clearly demonstrate time warping during coherent strobing under stationary noise impact. Lastly, procedure for singling out a periodic signal from a noisy signal is described, and a step-by-step algorithm is given as well.

Keywords: signal restoration, coherent strobing, analog-to-digital converter, data transmission channel, countdown, time warping, sampling.

References

1. A Tutorial in Coherent and Windowed Sampling with A/D Converters [Electronic source]: Renesas application note, 1997. URL: <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/an9675-tutorial-coherent-and-windowed-sampling-ad-converters> (access date 1.12.2022).
2. A Theoretical View of Coherent Sampling [Electronic source]: Renesas application note, 1997. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/document/apn/an9705-theoretical-view-coherent-sampling> (access date 1.12.2022).
3. Pat. WO2006086257A2 Coherent interleaved sampling. Kobayashi K., Ems S., Demott J., Schneckner M. Appl. 06.02.2006. Publ. 17.08.2006.
4. Vyukhin V.N., Popov Yu.A., Tani Yu.L. Investigation of the coherent sampling method for testing high-bit ADCs // *Autometrya*. 1997. No. 5. Pp. 9–14.
5. Pozdnyakov A.D., Kalyuzhny A.A. Estimation of the frequency of a periodic signal during coherent strobing // *Design and technology of electronic means*. 2018. No. 4. Pp. 19–23.
4. Zakharchenko V.D. Processing of complex radio signals by stroboscopic methods. USSR Academy of Sciences. *Radiotekhnika i elektronika*. 1980. No. 10. Pp. 2099–2104.
5. Nikitin O.R., Pozdnyakov V.A., Pozdnyakov A.D. Restoration of the waveform on the screen of a virtual oscilloscope (conference proceedings) Promising technologies in the means of information transmission: Materials of the fourth international. sci.-tech. conf. Vladimir. 2001. Pp. 190–192.
6. Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A. Automation of experimental research, testing and monitoring of radio systems: [scientific publication] Moscow: Radiotekhnika, 2004. 208 p.

7. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A.* Computational method for restoring the form of a discretized periodic signal in computer systems of electronic means testing. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnyh sredstv.* 2008. No. 1. Pp. 57–61.

8. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A., Kalyuzhny A.A.* Restoration of a sampled signal with unsynchronized strobing. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii.* 2017. Issue 19. Pp. 4–7.

11. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A., Kalyuzhny A.A.* Restoration of a periodic signal in a virtual oscilloscope with unsynchronized strobing // *Design and technology of electronic means.* 2017. No. 3. Pp. 52–56.

12. *Rabiner L., Gould B.* Theory and applications of digital signal processing. Moscow: Mir. 1978. 545 pp .

13. *Kulikov E.I., Trifonov A.P.* Estimation of signal parameters against the background of interference. Moscow: Sov. Radio. 1978. 296 p.

14. *Rosenberg V.Ya.* Introduction to the theory of accuracy of measuring systems. Moscow: Sov. Radio. 1975. 304 p.

15. *Novitsky P.V., Zograf I.A.* Estimation of measurement results errors. Leningrad: Energoatomizdat. 1991. 304 p.