

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.396.67

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ НЕСИНХРОНИЗИРОВАННОМ СТРОБИРОВАНИИ МЕТОДОМ ПЕРЕСТАНОВКИ ОТСЧЁТОВ

Поздняков Александр Дмитриевич

доктор технических наук, профессор; профессор кафедры «Радиотехника и радиосистемы» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: 11alexpoz@mail.ru.

Калюжный Александр Александрович

магистрант кафедры «Радиотехника и радиосистемы» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: aleksandrkaluzhnyy@mail.ru.

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

Аннотация: Рассмотрен метод несинхронизованного стробирования, в котором периодический сигнал восстанавливается путём перестановки полученных отсчётов во времени. При известном периоде сигнала отсчёты располагают в порядке, который определяется в результате вычисления их положения в интервале периода. Моделирование метода перестановки показало, что нужно выбирать такую частоту дискретизации, для которой в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число отсчётов с равномерным шагом. Отношение числа отсчётов к целому числу периодов сигнала основной частоты в интервале сбора массива данных должно быть простой несокращаемой дробью. Для одного и того же числа отсчётов с равномерным шагом существует несколько вариантов выбора частоты стробирования и интервала сбора массива данных, при которых последовательности получения отсчётов отличаются, но итоговая совокупность считываемых значений одинаковая, в результате диапазон рабочих частот дискретизации многократно расширяется. Увеличение времени сбора свыше одного цикла при целом числе отсчётов с равномерным шагом приводит к повторному считыванию уже полученных данных. При установке частоты сигнала с отклонением $10^{-9} \dots 10^{-4}$ и увеличении интервала дискретизации свыше одного цикла в восстановленном сигнале появляются дополнительные точки со смещением, по величине которого можно оценить погрешность частоты сигнала.

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

Важным направлением развития цифровой измерительной техники является переход от прямых методов измерений к косвенным методам, которые благодаря цифровой обработке становятся всё более точными и быстрыми при простой и надёжной аппаратной реализации. Развитие вычислительной техники и измерительных алгоритмов значительно расширило сферы применения численных методов оценки параметров радиосигналов [1–6]. Использование алгоритмов цифровой обработки сигналов

(ЦОС) делает возможным применение компьютера, оснащённого аналого-цифровым преобразователем (АЦП), в качестве адаптируемого комплекса виртуальных приборов, способного совместить процессы получения и обработки ограниченного массива дискретных отсчётов. Основная задача, возникающая перед исследователем, как с помощью цифровых данных, полученных на конечном интервале времени, сформировать максимально достоверное пред-

ставление о форме сигнала и его основных характеристиках.

При измерениях периодических сигналов для расширения полосы пропускания приборов применяется метод синхронизированного стробирования, в котором осуществляется линейная трансформация временного и частотного масштаба сигнала. Положение каждого стробирующего импульса синхронизируется с периодом исследуемого сигнала так, чтобы получить заданный шаг считывания по времени Δt . Важным требованием является стабильность частоты дискретизации, устанавливаемой в соответствии с выражением:

$$F_D = 1/(nT_S \pm \Delta t),$$

где n – целое число, T_S – период сигнала. С каждым шагом формируется последовательность импульсов, огибающая амплитуд которых повторяет форму исходного сигнала.

Современные алгоритмы ЦОС позволяют восстановить периодический сигнал путём обработки массива мгновенных отсчётов, полученных с помощью АЦП. В настоящее время серийно выпускаемые стробирующие АЦП могут работать в полосе рабочих частот до десятков гигагерц, что позволяет проводить исследования сигнала в широком диапазоне радиочастот. Благодаря цифровой обработке можно решать измерительные задачи на программном уровне, трансформировать временной масштаб без сложных аппаратных средств

задержки и синхронизации.

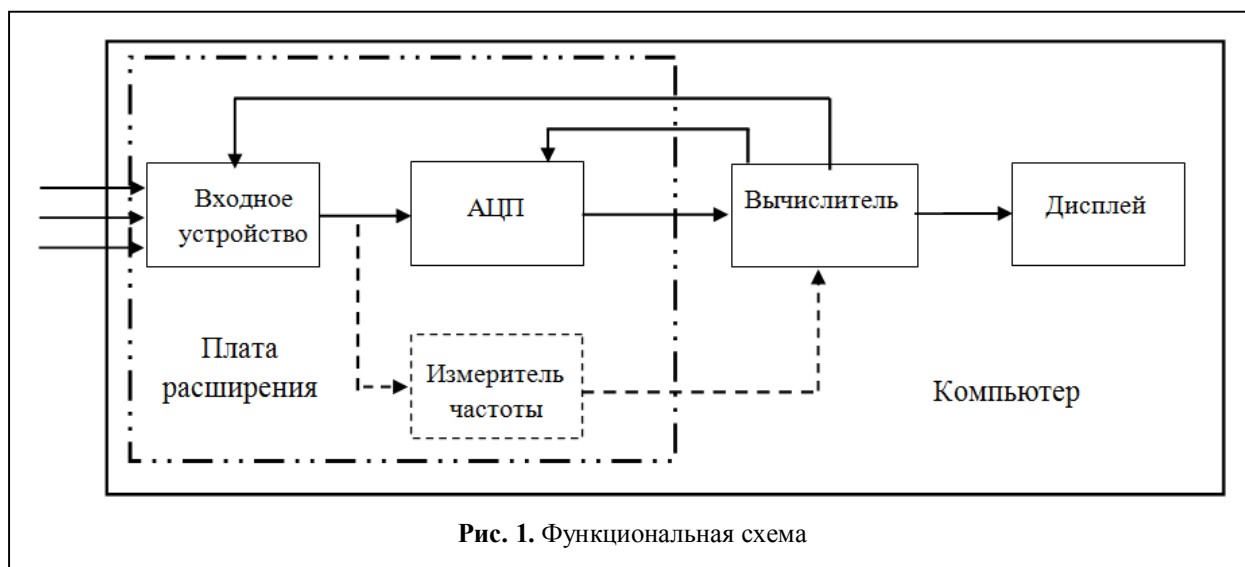
Метод восстановления формы периодического дискретизированного сигнала при несинхронизированном стробировании путём нелинейной трансформации временного масштаба рассмотрен в работах [7–10]. Перестановка мгновенных отсчётов, получаемых путём стробирования в интервале целого числа периодов сигнала, является главной особенностью метода. При известном периоде сигнала отсчёты располагают на оси времени в порядке, который определяется перестановкой их положения (t_i) в соответствии с выражением:

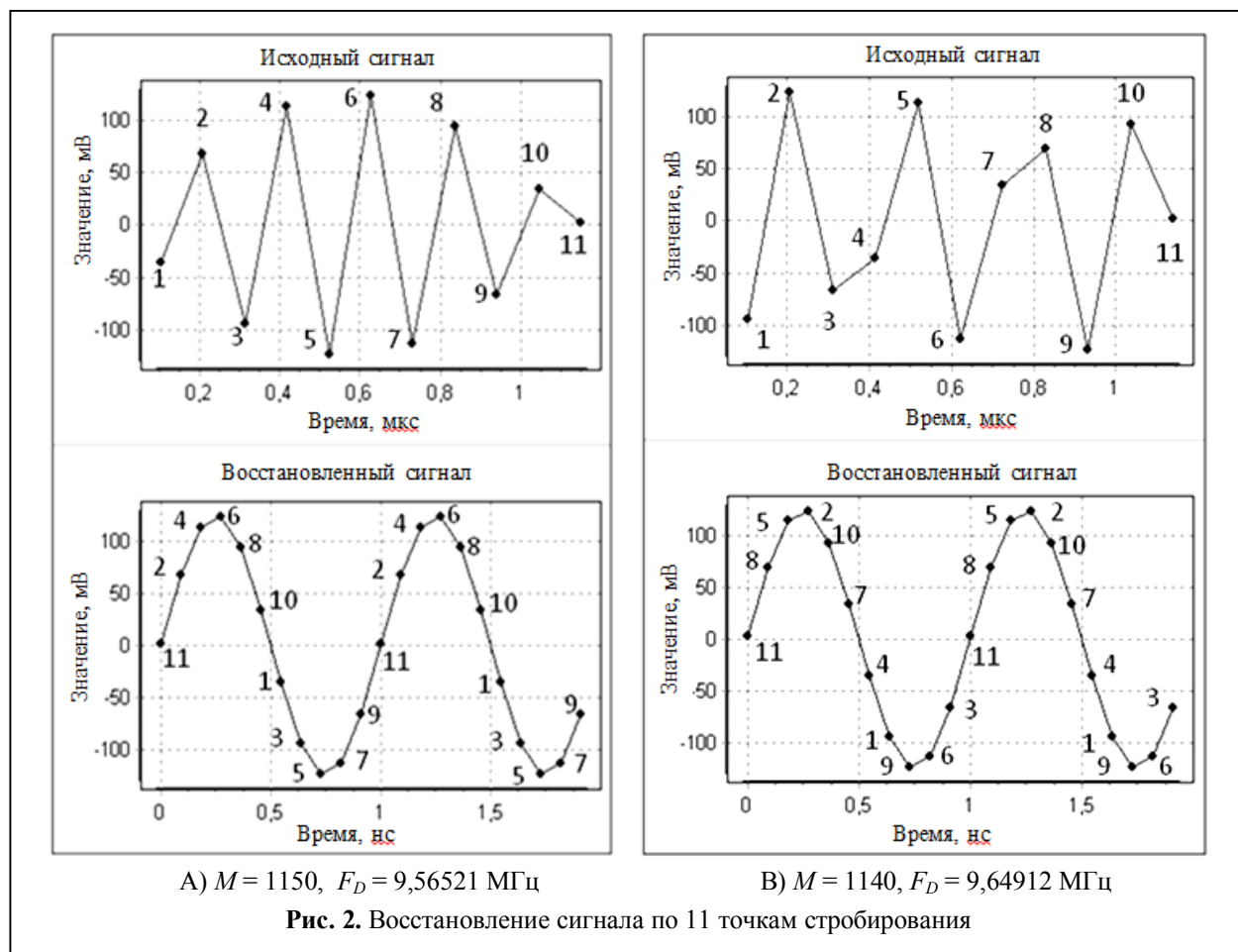
$$t_i = jT_D - iT_S,$$

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.

Функциональная схема, реализующая метод несинхронизированного стробирования в структуре компьютерного комплекса виртуальных приборов, представлена на рис. 1. Входное устройство выполняет функции аналогового адаптера. Вычислитель устанавливает доступную частоту дискретизации АЦП, переставляет отсчёты и выводит график сигнала на индикатор или дисплей компьютера. Определить частоту сигнала можно по данным АЦП или в дополнительном канале виртуального измерителя.

Моделирование метода перестановки пока-





зало, что нужно выбирать такую частоту дискретизации, для которой в цикле сбора данных в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число отсчётов N с равномерным шагом. Период дискретизации сигнала задается выражением: $T_D = MT_S N$, где M – коэффициент трансформации временного масштаба, численно равный целому числу периодов сигнала, укладываемых в интервале сбора массива неповторяющихся отсчётов.

Частота равномерной дискретизации $F_D = F_S N/M$, где F_S – частота сигнала, N/M – простая несокращаемая дробь, показывающая, какое число отсчётов N делается в M периодах сигнала. Значение N выбирается исходя из требований к разрешающей способности во времени. Для гармонического сигнала рекомендуемый диапазон от 7 до 27 точек на период. При восстановлении сигнала с высшими гармониками можно работать с более высокими

значениями N . В зависимости от частот сигнала и дискретизации величина M выбирается от десятков до сотен тысяч. Для получения несокращаемого отношения N/M можно взять простое число M и удобное N , или наоборот – удобное M и простое N .

Восстановление сигнала 1000 МГц по 11 отсчётам для двух комбинаций M и F_D показано на рис. 2. Последовательности получения исходных данных отличаются, но совокупность считываемых значений одинаковая. Таким образом, восстановленный сигнал пересчитывается в идентичную последовательность. Исходный сигнал представляет собой массив равноотстоящих последовательных N отсчётов с шагом T_D . При этом отношение $T_D/T_S = M/N$ показывает число периодов сигнала, укладываемых в периоде дискретизации.

Порядок расположения точек стробирования изменяется, при восстановлении послед-

Таблица 1. Параметры стробирования для получения одинаковой совокупности отсчетов

Параметры	Зависимость F_D [МГц] от M при $F_S = 1000$ [МГц], $N = 11$									
	M	1110	1120	1130	1140	1150	1160	1170	1180	1190
F_D	9,90991	9,82143	9,73451	9,64912	9,56521	9,48276	9,40171	9,32203	9,24370	

Таблица 2. Выбор частоты дискретизации для разных N

Параметры	Зависимость F_D [МГц] от N при $F_S = 1000$ МГц; $M = 10000$									
	N	7	9	11	13	17	19	21	23	27
F_D (МГц)		0,70	0,90	1,10	1,30	1,70	1,90	2,10	2,30	2,70
N		31	37	41	47	51	57	67	77	111
F_D (МГц)		3,1	3,7	4,1	4,7	5,1	5,7	6,7	7,7	11,1

ний отсчёт может стать первым. На рис. 2 показаны исходные отсчёты для двух значений F_D в виде последовательностей 1-2-3-...-10-11, перестановки которых отличаются:

А) 11-2-4-6-8-10-1-3-5-7-9-(11)....

В) 11-8-5-2-10-7-4-1-9-6-3-(11)....

Восстановленные сигналы при этом одинаковые, т.е. считываются те же самые по фазе точки, но в другой последовательности. В таблице 1 представлено 9 вариантов значений F_D и M для получения идентичной совокупности из 11 отсчётов, и только один вариант соответствует режиму синхронизированного стробирования без перестановки отсчётов. Таким образом, перечень рабочих частот дискретизации F_D при несинхронизированном стробировании многократно расширяется.

Выбором выполнимого отношения F_S [МГц]/ M можно обеспечить удобное значение F_D [МГц]/ N . В таблице 2 приведены значе-

ния $F_D = 0,1N$ [МГц] для $F_S = 1000$ МГц, $M = 10000$ и F_S [МГц]/ $M = 0,1$. Для произвольной частоты $F_S = 12345$ МГц можно выбрать $M = 12345$. Тогда $F_D = N$, то есть является целым числом.

Если в периоде восстановленного сигнала укладывается нецелое число отсчётов N , то их смещение может привести к погрешности измерений по оси времени. Для числа периодов сигнала M формируется один полный цикл сбора отсчётов, для массива отсчётов $2M$ формируется два цикла, для $3M$ – три цикла, и так далее. На рис. 3 показано, что увеличение времени сбора данных, превышающее M в 5 раз, приводит к образованию групп точек с шагом 1 пс в каждой группе. Это обусловлено считыванием смещённых значений сигнала, положение которых определяется погрешностью установки частот сигнала и дискретизации.

Установленная с высокой точностью частот-

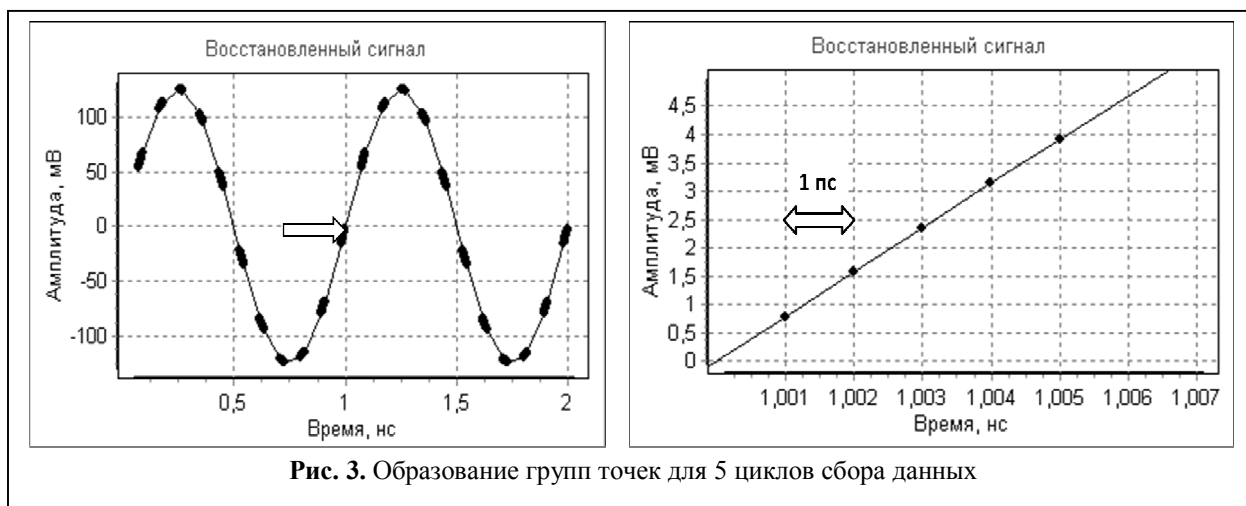


Рис. 3. Образование групп точек для 5 циклов сбора данных

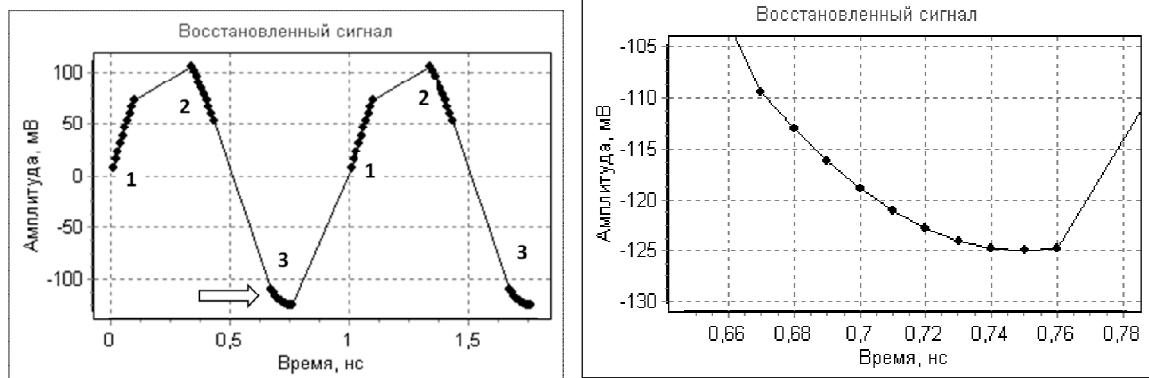


Рис. 4. Смещение для 10 циклов считывания при 3-х отсчётах на периоде

та дискретизации позволяет оценить отклонение частоты сигнала по расстоянию между положениями отсчётов в пределах одной группы точек в разных циклах считывания. Достижимым является разрешение по времени при оценке периода сигнала $10^{-5} \dots 10^{-9}$ с.

На рис. 4 показано смещение отсчётов для 10 циклов со сдвигом в каждом цикле 0,01 нс. Качество восстановления ограничивается нестабильностью частот дискретизации и исследуемого периодического сигнала в интервале сбора массива отсчётов. Частота дискретизации должна устанавливаться с точностью до 5–9 знаков, что достигается в современных схемах синтеза частот [11–13].

В зависимости от ожидаемого отклонения частоты можно выбрать интервал накопления временного сдвига до тысяч циклов сбора данных M . При этом минимальный массив сбора данных с одним смещённым отсчётом равен $M_C = M + M/N$. Например, для отклонения частоты сигнала $dF_S = 100$ Гц, $N = 7$, $F_S = 1000$ МГц, $F_D = 0,7$ МГц и $M = 10000$ получим $M_C = 11430$, $dt = 0,01$.

Для повышения точности восстановления можно внутри каждого интервала осуществить интерполяцию функцией $\sin(x)/x$ [14, 15].

Компьютерное моделирование восстановления дискретизированного сигнала при несинхронизированном стробировании позволило сделать следующие выводы:

1. Восстановление периодического сигнала методом перестановки отсчётов расширяет

возможности выбора рабочих частот дискретизации АЦП.

2. Частоту дискретизации при нелинейной трансформации временного масштаба следует выбирать такую, для которой в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число отсчётов с равномерным шагом.

3. Для установленной с высокой точностью частоты дискретизации метод перестановки отсчётов позволяет оценить отклонение частоты сигнала по расстоянию между положениями отсчётов в пределах одной группы точек в разных циклах считывания.

Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Спб. : Питер. 2005. 604 с.
2. Степанов А.В., Матвеев С.А. Методы компьютерной обработки сигналов и систем радиосвязи. М. : СОЛОН-Пресс. 2003. 208 с.
3. Афонский А.А., Суханов Е.В. Интерполяция в цифровой осциллографии // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2010. № 5. С. 13–16.
4. Варенцова С.А., Трофимов В.А. Восстановление сигнала и его мгновенных спектральных характеристик методом скользящих окон // Журнал технической физики. 2007. № 5. С. 58–64.
5. Волович Г.И. Аналого-цифровое измерение переменного напряжения и теорема // Компоненты и технологии. 2010. № 7. С. 144–149.
6. Зиатдинов С.И. Восстановление сигнала по его выборкам на основе теоремы отсчетов Котельникова // Изв. вузов Приборостроение. 2010. № 5. С. 44–47.
7. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний

и мониторинга радиосистем. М. : Радиотехника, 2004. 208 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. 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.

10. 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.

11. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 5–20.

Поступила 4 июня 2018 г.

12. Ромашов В.В., Якименко К.А. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 3. С. 3–9.

13. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». 2017. № 1(33). С. 6–7.

14. Руфов А.А., Поздняков А.Д. Интерполяционный алгоритм восстановления и измерения среднеквадратического значения гармонического сигнала при малом числе отсчетов // Известия Института инженерной физики. 2015. № 1. С. 13–18.

15. Руфов А.А., Поздняков А.Д. Интерполяционный алгоритм определения гармонического сигнала по ограниченной выборке мгновенных значений // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 1. С. 38–42.

English

PERIODIC SIGNAL RECOVERY WITH ASYNCHRONOUS STROBING VIA SAMPLING TRANSPOSITION METHOD

Pozdnyakov Alexander Dmitrievich – Doctor of Engineering, Professor; 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.

Kalyuzhny Alexander Aleksandrovich – Master's Degree Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs".

E-mail: aleksandrkaluzhny@mail.ru.

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

Abstract: The synchronous strobing method is used when measuring periodic signals for device bandwidth widening where linear transformation of temporary and frequency signal level is carried out. The position of each strobing pulse is synchronized with the period of the studied signal so that to obtain the preset timed sampling pace. The computer equipped with multichannel ADC (analog-to-digital converter) enables to computerize collecting and processing of the particular array of quantified sampling, to transform time scale without use of delay and synchronization intricate hardware. The asynchronous strobing method enables to extend ADC operating frequency sampling range, the peculiarity of which is the instantaneous sample rearrangement shift obtained through strobing between the integral number of the signal cycle with the known or measured frequency. Samples are settled in the appropriate order which is defined as a result of their position calculation within the signal cycle. The transposition method simulation revealed that it is necessary to choose such a sampling frequency for which the recovered signal cycle contains the samples integral number with an even spacing when the ratio of the samples number to the signal cycles number in the interval of collecting data array is the common irreducible fraction. The equal number of samples number with an even spacing in case of asynchronous strobing can be obtained for several strobing frequency values and data collection intervals. However, the sequences of obtaining samples differ, but the sum of the read-out values is the same and therefore the sampling frequencies choice manifoldly expands. It is possible to estimate the signal frequency instability according to the distance between the sample points within one cluster of points in different read cycles for the preset sampling

frequency with high precision. It is possible to choose an interval of temporary shift accumulation up to hundreds of thousands of data collection cycles depending on the expected frequency deviation.

Keywords: signal recovery, strobing, analog-to-digital converter, transformation of time scale, sampling.

References

1. *Sergienko A.B.* Digital signal processing. SPb. : Piter, 2005. 604 p.
2. *Stepanov A.V., Matveev S.A.* Computer processing methods of signals and systems of radio communication. M. : SOLON-Press. 2003. 208 p.
3. *Afonskiy A.A., Sukhanov E.V.* Interpolation in digital oscillography // *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*. 2010. No. 5. Pp. 13–16.
4. *Varentsova S.A., Trofimov V.A.* Signal recovery and its instant spectral characteristics by the sliding windows method // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2007. No. 5. P. 58–64.
5. *Volovich G.I.* AC voltage analog-digital measurement and the sampling theorem // *Komponenty i tekhnologii*. 2010. No. 7. Pp. 144–149.
6. *Ziatdinov S.I.* Signal recovery according to its sample values selections based on the sampling theorem // *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye*. 2010. No. 5. Pp. 44–47.
7. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A.* Automation of experimental research, tests and monitoring of radio systems. M. : Radiotekhnika. 2004. 208 p.
8. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A.* Recovery computational method of the sampled signal shape in the computer systems of electronic instrumentation testing // *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2008. No. 1. Pp. 57–61.
9. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A., Kalyuzhny A.A.* Sampled signal recovery in case of asynchronous strobing // *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii*. 2017. Iss. 19. Pp. 4–7.
10. *Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A., Kalyuzhny A.A.* Periodic signal recovery in the virtual oscilloscope in case of asynchronous strobing // *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2017. No. 3. Pp. 52–56.
11. *Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A.* Noise properties simulation in hybrid frequency synthesizers // *Radiotekhnicheskkiye i telekommunikatsionnyye sistemy*. 2014. No. 1. Pp. 5–20.
12. *Romashov V.V., Yakimenko K.A.* Mathematical tools development for hybrid frequency synthesizers frequency planning // *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2016. No. 3. P. 3–9.
13. *Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Romashova L.V.* The noise properties experimental research of hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods // *Bulletin of the Volga State University of Technology*. Iss: "Radiotekhnicheskkiye i infokommunikatsionnyye sistemy". 2017. No. 1(33). Pp. 6–7.
14. *Rufov A.A., Pozdnyakov A.D.* Interpolation algorithm of recovery and measurement of the mean square value of the harmonious signal with small number of samples // *News of Institute of Engineering Physics*. 2015. No. 1. Pp. 13–18.
15. *Rufov A.A., Pozdnyakov A.D.* Interpolation algorithm of defining harmonious signal in limited sampling of instant values // *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2015. No. 1. P. 38–42.