

3. *Минеев, А.В.* Классификация способов измерения радиальных зазоров / А.В. Минеев, В.Х. Ясовеев // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы I Международной научно-технической конференции / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2017. –С. 119-125.

4. *Губайдуллин, И.Т.* Анализ основных технических требований, предъявляемых к системам измерения радиальных зазоров авиационных двигателей/ И.Т. Губайдуллин, А.В. Минеев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч. – техн. конф. 12 - 14 сентября 2018 г. – Самара, 2018. –С. 47-49.

5. *Иноземцев, А.А.* Микроновые системы измерения радиальных зазоров ГТД. /А.А. Иноземцев, М.А. Снитко, В.К. Сычев, Масловский, М.Г. Бакулин, И.С. Табачук. // Авиационная промышленность. – 2013. –№2. – С. 29-32.

6. *Боровик, С.Ю.* Одновитковые вихретоковые преобразователи для измерения механических параметров. / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – №4(42). – С. 94-101.

7. *Боровик, С.Ю.* Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков/ С.Ю. Боровик, М.М. Кутейкин, Ю.Н. Секисов [и др.] // Автометрия. – 2017. –№ 4. – С. 104–111.

8. *I. García.* Desarrollo de un sensor de fibra óptica para la medida del tip clearance y tip timing en motores aeronáuticos // Sensors. – 2017.

*Материал поступил в редколлегию 15.10.18.*

УДК 621.396

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e60b9a2324.97778914

А.Д. Поздняков, А.А. Калюжный

(г. Владимир, Владимирский государственный университет)

## **ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ И НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В РАДИОКАНАЛЕ МЕТОДОМ СТРОБИРОВАНИЯ**

*Рассмотрено применение метода стробирования при оценке неустойчивости и отклонения частоты. Проведено компьютерное моделирование радиоканала для определения границ применимости метода.*

*The application of the gating method in the evaluation of instability and frequency deviation is considered. A computer simulation of the radio channel was carried out to determine the limits of applicability of the method.*

*Ключевые слова: стробирование, неустойчивость частоты, радиоканал.*

*Key words: gating, frequency instability, radio channel.*

Для оценки смещения и неустойчивости частоты периодического сигнала с низким уровнем шума в радиоканале можно использовать методы обработки сигнала во временной области, достоинствами которых являются

малые вычислительные затраты и высокое быстродействие. К таким методам можно отнести стробирование [1-4] с получением массива дискретных отсчетов и последующим восстановлением сигнала в широком диапазоне частот. В зависимости от соотношения периодов сигнала ( $T_s$ ) и дискретизации ( $T_D$ ), можно выделить типовые режимы работы и виды получаемых временных последовательностей.

Синхронизированное стробирование с линейным сдвигом отсчетов:  $T_D / T_s$  – число, близкое, но неравное целому. Осуществляется линейная трансформация временного масштаба сигнала:  $T_D = (nT_s \pm \Delta t)$ , где  $n$  – целое число периодов сигнала между точками стробирования;  $\Delta t$  – заданный шаг считывания по времени в пределах периода исходного сигнала ( $\Delta t \ll T_s$ ). Восстановление сигнала осуществляется путем последовательного считывания отсчетов.

Синхронизированное стробирование и нелинейная трансформация временного масштаба в пределах блока данных:  $T_D / T_s = N / M$  – несократимая дробь, показывающая, какое целое число отсчетов  $N$  делается за один полный цикл в  $M$  периодах сигнала. Это метод когерентной выборки с равномерной дискретизацией, позволяющий восстановить сигнал путем нелинейной трансформации временного масштаба.

Несинхронизированное стробирование и нелинейная трансформация временного масштаба:  $T_s / T_D$  – число, неравное целому.  $T_D = (nT_s \pm \Delta t) = T_s M / N$ . Шаг считывания по времени выбирается в пределах периода исходного сигнала ( $0 < \Delta t < T_s$ ) так, чтобы последующие отсчеты не повторяли уже полученные данные. Восстановление сигнала осуществляется путем перестановки всех точек в интервал одного периода с уточнением промежуточных значений функции в последующих циклах стробирования.

Для детального исследования возможностей синхронизированного и несинхронизированного стробирования была создана компьютерная моделирующая программа, пользовательский интерфейс которой представлен на рис. 1.

Программа позволяет ввести исходные данные и вывести результаты: график последовательности точек стробирования; график двух периодов восстановленного сигнала; таблицу пересчета положения полученных при стробировании отсчетов в интервал двух периодов (двух для большей наглядности).

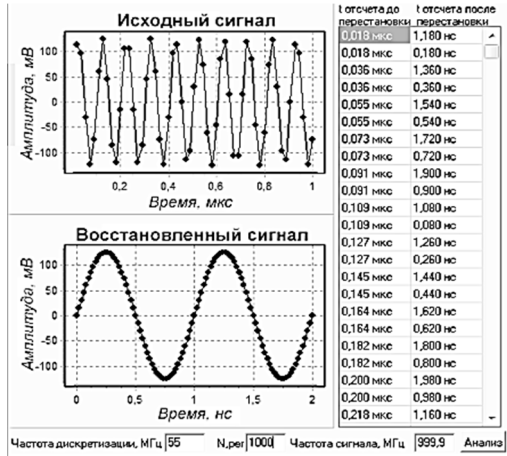


Рис. 1. Интерфейс моделирующей программы

Структура компьютерного комплекса виртуальных приборов, предназначенного для мониторинга и испытаний условного радиоканала, по которому передается периодический сигнал, представлена на рис. 2.

На выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) формируется испытательный сигнал, который нормализует выходные параметры в соответствии с задачей испытаний. Отсчеты, получаемые на выходе АЦП, располагаются в интервале одного восстанавливаемого периода сигнала в



Рис. 2. Структура комплекса

нужном порядке, который определяется их положением ( $t$ ) в соответствии с выражением [5,6]:  $t_i = jT_D - iT_S$ , где  $j$  – порядковый номер (целое число) отсчета;  $i$  –

целое число, для которого выполняется условие  $T_S \geq jT_D - iT_S > 0$ . Приведенное выражение работает во всех режимах стробирования как при линейной, так и при нелинейной трансформации временного масштаба исследуемого сигнала.

Для  $M$  периодов сигнала формируется 1 полный цикл отсчетов, для  $2M$  отсчетов формируется 2 цикла, 3 цикла для  $3M$ , и так далее. При синхронизированном стробировании во втором и последующих циклах отсчеты снимаются в тех же точках периода сигнала, что и в первом цикле, если частота и фаза стабильны. По отклонению отсчетов можно оценить нестабильность и смещение частоты сигнала. На рис. 3 показано, что

увеличение времени сбора данных, превышающее  $M$ , приводит к образованию групп точек. Это обусловлено считыванием значений сигнала со смещением  $dt$ , величина которого определяется нестабильностью сигнала и погрешностями установки частот сигнала и дискретизации. Смещение накапливается за  $M$  периодов сигнала, поэтому, увеличив  $M$ , можно повысить разрешающую способность  $R$ , что подтверждают результаты моделирования, представленные в табл. 1.

Предельная разрешающая способность во времени определяется точностью установки и стабильностью сигнала и частоты дискретизации, Смещение между положениями отсчетов в пределах одной группы точек в соседних циклах можно оценить с разрешающей способностью до  $10^{-12}$  с=1 пс.

Таблица 1. Влияние частоты дискретизации и числа отсчетов на смещение отсчетов в соседних циклах и на оценку отклонения частоты сигнала

Влияние частоты дискретизации $F_D$ , числа отсчетов $M$ и смещения положения отсчетов в соседних циклах $dt$ на оценку отклонения частоты сигнала $S$ для $F_S = 1000$ МГц и $N = 7$						
$F_D$ , МГц	$M$	$dt$ , нс	$S$ , нс	$dF_S$ , КГц	$F_S$ , МГц	$R$
70	100	0,01	$1 \cdot 10^{-4}$	100	1000,1	$10^{-7}$
70	100	0,02	$2 \cdot 10^{-4}$	200	1000,2	
70	100	0,05	$5 \cdot 10^{-4}$	500	1000,5	
7	1000	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$	10	1000,01	$10^{-8}$
7	1000	0,02	$2 \cdot 10^{-5}$	20	1000,02	
7	1000	0,05	$5 \cdot 10^{-5}$	50	1000,05	
0,7	10000	0,01	$1 \cdot 10^{-6}$	1	1000,001	$10^{-9}$
0,7	10000	0,02	$2 \cdot 10^{-6}$	2	1000,002	
0,7	10000	0,05	$5 \cdot 10^{-6}$	5	1000,005	

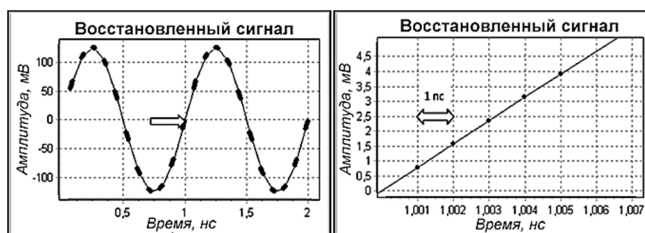


Рис. 3. Образование групп точек для 5 циклов сбора данных

Минимальный интервал сбора данных с одним смещенным отсчетом равен  $M_C = M + M / N$ . В абсолютном представлении сдвиг  $S = dt / M$ , в

относительных единицах  $ds = dt / (MT_s)$ . Так, для частоты сигнала  $F_s = 1000$  МГц, установленной с погрешностью  $+1$  кГц (см. рис. 4) при параметрах стробирования  $N = 7$ ,  $F_D = 0,7$  МГц,  $M = 10000$ , получим  $dt = 0,01$  нс,  $ds = 0,000001$ . Значение  $dt = 0,01$  нс определяется по задержке начала 2-го цикла в точке 8 по отношению к положению точки 1. Задержка показывает, что период дискретизации больше, чем ожидался. Расчетное значение смещения по сдвигу  $0,01$  нс получится  $dF_s = 1$  кГц.

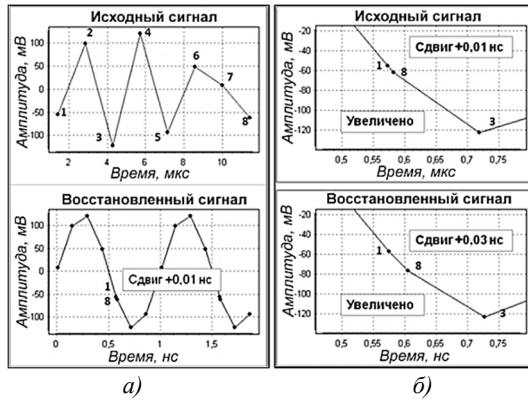


Рис. 4. Смещение дополнительного 8-го отсчета в начале 2-го цикла:  
 а –  $t_8 - t_1 = 0,01$  нс; б – увеличено  $t_8 - t_1 = 0,01$  нс и  $0,03$  нс

В зависимости от ожидаемого отклонения частоты и требуемой разрешающей способности по времени, можно выбрать интервал накопления временного сдвига до сотен тысяч периодов сигнала, а также использовать несколько циклов сбора данных  $M$ , как показано на рис. 5.

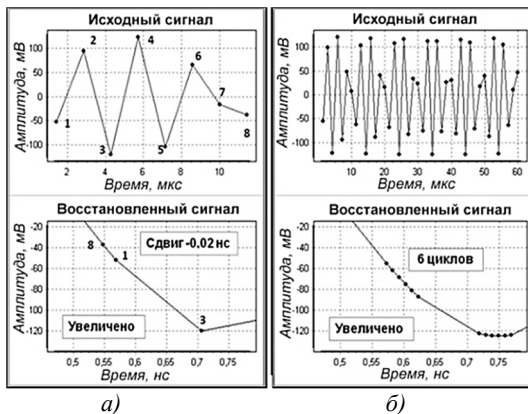


Рис. 5. Смещение дополнительного 8-го отсчета в начале 2-го цикла:  
 а –  $t_8 - t_1 = -0,02$  нс; б – увеличено для 6 полных циклов

На рис. 5а показано, что при сдвиге в противоположном направлении на  $-0,02$  нс показывает расчетное изменение частоты на  $dF_s = -2$  кГц. Работа в многоциклическом режиме при смещении или доплеровском сдвиге частоты показана на рис. 5б. Компьютерное моделирование позволило сделать следующие выводы: метод стробирования позволяет оценить отклонение и нестабильность частоты сигнала по расстоянию между положениями отсчетов в пределах одной группы точек в разных циклах считывания; увеличение времени сбора свыше одного цикла при целом числе отсчетов с равномерным шагом приводит к повторному считыванию в тех же точках периода, если его частота и частота стробирования равны; наличие разностного отклонения и нестабильности частот сигнала и дискретизации приводит к смещению точек отсчета в соседних циклах стробирования; созданная программа моделирования восстановления периодического сигнала позволяет выбрать параметры стробирования и оценить границы отклонения частот дискретизации исследуемого процесса.

#### Список литературы

1. A Theoretical View of Coherent Sampling, RENESAS APPLICATION NOTE, AN9705, Rev.0.00, Jun 1, 1997.
2. *Вьюхин, В.Н.* Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП / В.Н. Вьюхин, Ю.А. Попов, Ю.Л. Тани // Автотриетрия. – 1997. – №5. – С.9-14.
3. *Захарченко, В.Д.* Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами / В.Д. Захарченко // Радиотехники и радиоэлектроника. – 1980. – №10. – С. 2099-2104.
4. *Захарченко, В.Д.* Обработка сигналов при наличии фазовой нестабильности в стробоскопической локации / В.Д. Захарченко // Изв. вузов. Электромеханика.– 1999. – №2. – С.37-41.
5. *Поздняков, А.Д.* Вычислительный метод восстановления формы дискретизированного периодического сигнала в компьютерных системах испытаний электронных средств / А. Д. Поздняков, В. А. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств. – 2008. – № 1. – С.57 – 61.
6. *Поздняков, А.Д.* Восстановление дискретизированного сигнала при несинхронизированном стробировании / А.Д. Поздняков, В.А. Поздняков, А.А. Калужный // Методы и устройства передачи и обработки информации. –2017. – №19. – С.4-7.

*Материал поступил в редколлегию 10.10.18.*