

ТАБЛИЧНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАСХОДОМЕРА

С.И. Герасимов, В.Д. Глушнев

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», г. Москва

Корреляционная обработка сигналов как частный случай использования цифровой обработки данных, получаемых с акустических датчиков, находит широкое применение в современных ультразвуковых расходомерах жидкости и газа. К ним можно отнести как непосредственно корреляционные меточные расходомеры, так и расходомеры преимущественно время-импульсного или время-пролетного типов, где корреляционная обработка акустических сигналов является дополнением к общему методу измерения объемного расхода жидкости и газа. Применение корреляционной обработки позволяет повысить разрешающую способность расходомера в целом и обеспечить выделение полезного сигнала на фоне присутствия шумов с высокой степенью достоверности. В статье описан способ вычисления дискретных корреляционных функций на основе обобщенного определения дискретной корреляционной функции через свертку дискретизированных сигналов с выходов датчиков потока. Суть данного метода сводится к вычислению набора значений кумулятивных произведений отсчетов зондирующих сигналов, взятых с разным шагом в зависимости от общего количества отсчетов сигналов и предполагаемого числа значений корреляционной функции. Полученный набор значений оформляется в виде двумерного массива или матрицы, однако для большего понимания его можно представить как таблицу. Результаты суммы отдельных элементов этой таблицы или матрицы, выбранных согласно установленному правилу, и будут являться конечными значениями взаимной корреляционной функции акустических сигналов. В рамках работы составлены непосредственно алгоритм вычисления дискретной корреляционной функции в соответствии с рассмотренным методом расчета корреляционной функции, приведены примеры вычисления программным способом взаимной и автокорреляционной функций акустических сигналов, приближенных по своим свойствам к сигналам реальных ультразвуковых расходомеров. Предложенный вариант расчета дискретных корреляционных функций может быть применен в энергоэффективных вычислительных модулях расходомеров, предназначенных для длительной эксплуатации от источника автономного питания, обладающих низкой производительностью.

Ключевые слова: ультразвук, корреляционная функция, цифровая обработка сигналов, ЦОС, время распространения.

ВВЕДЕНИЕ

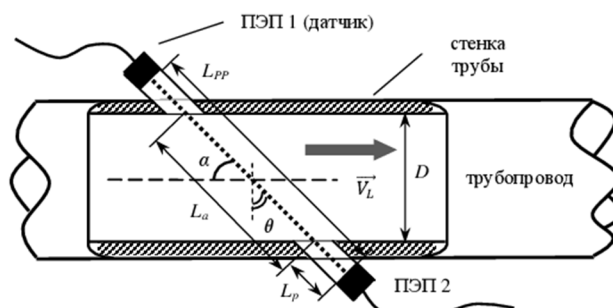
Применение ультразвуковых волн неразрывно связано с работой в области неразрушающего контроля материалов [1], медицинской диагностики (УЗИ) [2], эхолокации [3] и определении расстояний до объектов; робототехники и промышленной автоматизации. Другим важным направлением является измерение расхода жидкостей и газов [4].

Расходомерия [4] на протяжении длительного периода и в настоящее время глубоко интегрирована в производственные процессы на заводах и предприятиях, обеспечивает качественное сопровождение работы тепло и гидроэлектростанций, насосных и перекачивающих установок, практически безальтернативна при учете подачи теплоносителя (или потребления топлива, в т.ч. газа) на подводящих и магистральных трубопроводах. С этими задачами хорошо справляются электронные расходомеры с бесконтактным способом измерения [4, 5]. Нельзя не отметить широкое распространение ультразвуковых расходомеров (УЗР) время-импульсного (время-разностного) типа [4, 5].

ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗР

Принцип действия УЗР время-разностного типа

кратко показан на соответствующей схеме на рис. 1 [4]. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), выполняющие роль излучателей и приемников ультразвуковых сигналов (УЗС), поочередно излучают и принимают УЗС, по потоку жидкости или газа (от ПЭП1 к ПЭП2) и против потока соответственно.



L_a – часть пути ультразвукового сигнала, на котором скорость среды отлична от нуля, $L_a = D / \sin \alpha$; D – внутренний диаметр трубопровода; L_p – длина пути волн ультразвука (УЗВ) в полостях, образованных гнездами ПЭП; L_{pp} – полная длина пути прохождения луча УЗС, $L_{pp} = L_a + L_p$; v_L – средняя по длине луча УЗВ скорость потока; α – угол распространения УЗВ в трубопроводе.

Рис. 1. Иллюстрация измерения скорости потока ультразвуковым расходомером

Определение скорости потока жидкости или газа с помощью УЗР значительно зависит от точности измерения времен распространения акустических сигналов по потоку T_1 и против потока жидкости T_2 [4, 5]. Разность времен распространения УЗС $\Delta T = T_2 - T_1$ в общем случае, будет пропорциональна скорости потока v_L жидкости или газа и измеряемому расходу. Вместе с тем, к разрешающей способности и точности определения $T_{1,2}$ и ΔT предъявляются высокие требования – погрешность не должна превышать 20 пс [6].

С целью повышения точности определения ΔT – временного сдвига между УЗС применяются дополнительные методы цифровой обработки, в частности корреляционная обработка УЗС. Так, кросс-корреляционный метод обеспечивает более высокую устойчивость к шумам, которые часто присутствуют в реальных зондирующих акустических сигналах. Непосредственно метод заключается в вычислении взаимной корреляционной функции этих сигналов. Координата главного максимума функции по времени ΔT_{\max} и будет соответствовать искомому параметру ΔT [5, 7, 8].

Далее рассмотрим более подробно некоторые особенности корреляционных функций (КФ).

**АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ И ВЗАИМНАЯ
КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИИ**

Автокорреляционная функция (АКФ) [9, 10] является статистической характеристикой и содержит следующую информацию о сигнале – матожидание, дисперсия во времени, спектральное представление сигнала в частотной области. АКФ характеризует степень подобия сигнала с собственной копией, смещенной на τ единиц времени. По сути, АКФ – это не функция времени, а функция разности времени τ между сигналом и его смещенной копией [11].

Взаимная корреляционная функция (ВКФ) – позволяет уменьшить влияние шумов, поскольку обладает фильтрующими свойствами (на основе корреляторов, которые реализуют ВКФ, строятся согласованные фильтры). Вместе с этим, по характерным точкам (отсчетам) ВКФ относительно исследуемого сигнала возможно определить время распространения сигнала с высокой точностью [9, 10].

АКФ и ВКФ для стационарных, эргодических случайных процессов $f_1(t), f_2(t)$ можно представить как [9, 12]:

$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)f(t-\tau)dt, \tag{1}$$

причем АКФ $f(t)$ – централизованная функция ($m[f(t)] = 0$). Нормализованная АКФ [9, 12]:

$$r_f(\tau) = \frac{R_f(\tau)}{R_f(0)} = \frac{R_f(\tau)}{D[f(t)]}, \tag{2}$$

тогда, соответственно [9, 10, 12]:

$$R_{f_1, f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t)f_2(t-\tau)dt. \tag{3}$$

Если $f_1(t), f_2(t)$ – нецентрализованные функции, то (1) и (2) определяют ковариационные функции [9].

С помощью АКФ невозможно определить требуемое время распространения сигнала в потоке жидкости (или газа), но её можно использовать для поиска и выделения полезной части сигнала [6].

**ЦИФРОВЫЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ И
ВЗАИМНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИИ**

Дискретные аналоги взаимной корреляционной функции (ДВКФ) сигналов и взаимных корреляционных функций принимаемых сигналов и «эталона» (образца УЗС), хранящегося в памяти процессора, определяются согласно формулам (4), (5).

Так, дискретная АКФ (ДАКФ) для дискретизированных случайных процессов [9, 10, 12]:

$$\hat{R}_f(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N f(n)f(n-m). \tag{4}$$

Приведем подобную формулу для ДВКФ [9, 11]:

$$\hat{R}_{f_1, f_2}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N f_1(n)f_2(n-m), \tag{5}$$

где $f_{1,2}(n)$ – числовые последовательности УЗС, значения которых в каждой точке n «обременены» случайными значениями (случайные последовательности).

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД

Корреляционная обработка сигналов для действительных УЗС заключается в приближенной оценке их времен распространения в потоке среды и временного сдвига между этими сигналами [6].

Уточним смысл КФ – поскольку получаемые значения КФ связаны с моментами дискретизации сигнала (по времени), тогда расчет КФ производится по характерным точкам этой КФ, например, по максимуму, который совпадает в момент приема сигнала по месту, где этот сигнал применяется [6, 7].

Взаимные корреляционные функции в дискретном представлении – ДВКФ, вычисляются согласно следующим формулам [6, 7]:

$$\hat{R}_{1,2}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m} Y_1(n)Y_2(n-m), \tag{6}$$

$$\hat{R}_{i,\varepsilon}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m} Y_{Ci}(n)Y_{\varepsilon}(n-m), \tag{7}$$

где $Y_i(n)$ – последовательности входных сигналов, содержащие полезный сигнал и шум; $Y_{Ci}(n)$ – последовательности входных сигналов, содержащие только полезный сигнал; Y_{ε} – последовательность сигнала-«эталона» (при отсутствии шумовой составляющей).

Поскольку ВКФ характеризуют степень сходства исходных функций, положение её глобального максимума соответствует временной задержки одинаковых сигналов относительно друг друга. По сути, ВКФ можно рассматривать как отдельный сигнал, несущий информацию о времени распространения УЗС.

ТАБЛИЧНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДВКФ

Для определения корреляционных функций в цифровой технике известен и широко применяется подход, в основе которого вычисление находится комбинация прямого и обратного быстрых преобразований Фурье (БПФ) последовательностей сигналов [13, 14].

Данный метод весьма эффективен по сравнению со способом расчета дискретных КФ через прямую свертку сигналов [13]. Современные высокопроизводительные микроэлектронные устройства (микроконтроллеры и микропроцессоры) имеют поддержку расчета БПФ на аппаратном уровне, что позволяет существенно экономить доступные ресурсы и общее время вычисления КФ.

Однако, вычисление БПФ в целом не столь тривиально и требует значительных вычислительных ресурсов, которые могут быть ограничены в случае использования бюджетных по стоимости и малопотребляющих контроллеров. Контроллеры подобного типа (нередко являются частью комплексной системы «SoC» – «System on Chip»), включающей в свой состав помимо непосредственно ядра, выполняющего функции управления и вычислительных операций, необходимую периферию (преобразователи, интерфейсы и пр.). Примером микроконтроллеров упомянутого вида может служить модель MSP430FR6047 компании Texas Instruments [15], которая обладает невысокими характеристиками производительности, но, при этом, способны длительное время функционировать от автономного источника питания – батареи или аккумулятора. Данная опция часто устанавливается в эффективных по стоимости УЗР (применяются в системах магистральной подачи воды по трубопроводам, на объектах ЖКХ и промышленности), где не во всех ситуациях оказывается возможным обеспечить бесперебойное сетевое питание устройства. Из ключевых особенностей этого контроллера можно отметить наличие встроенного АЦП (частота выборок 8 МГц), которого в большинстве ситуаций оказывается достаточно для операций с УЗС $F_C \approx 1$ МГц при соблюдении требуемой точности.

С учетом обозначенных недостатков вычисления КФ с помощью БПФ, для последовательностей сигналов короткой длины ($N \leq 64$) может быть разумным использовать способ расчета дискретных КФ через прямую свертку сигналов [13].

Так, в дискретном представлении был составлен следующий упрощенный алгоритм расчета ДВКФ, который предполагается как более оптимизированный вариант в сравнении с непосредственной реализацией прямой свертки сигналов. В основу данного алгоритма положено общее определение КФ – через свертку дискретных последовательностей сигналов, при этом процесс вычисления подразделяется на несколько более простых по сложности этапов.

Главная особенность предлагаемого алгоритма – все вычисленные значения дискретной свертки сигналов с заданными смещениями отсчетов располагаются в условной таблице (см. табл. 1) и имеют строго определенную структуру. Графическая интерпретация в виде таблицы оказывается весьма удобной для визуального восприятия и понимания принципа вычисления КФ в целом. Помимо этого, программная реализация таблицы и расположение значений свертки в памяти контроллера сводится к её классическому представлению в математике – двумерной матрице [14]. Данная особенность позволяет достаточно просто оперировать значениями свертки и производить адресацию элементов в памяти контроллера.

Стоит отметить, что данный способ расчета ДВКФ является фактически переработанной версией существующего подхода к оценке ДВКФ, который приведен в [14], с поправкой на приоритетные направления применения корреляционного метода в УЗР.

Непосредственно алгоритм расчета ДВКФ с соответствующими пояснениями для каждой стадии его исполнения (в формате псевдокода), представлен на рис. 2. Далее перечислим основные параметры, необходимые для выполнения алгоритма оценки ДВКФ:

- N, M – конечные значения порядковых номеров (индексов) заданных последовательностей сигналов u, w и вычисляемой корреляционной функции соотв. (при нумерации с нуля);

- n, m – наборы значений порядковых номеров (индексов) для сигналов УЗС (при различных начальных смещениях одного сигнала относительно другого) и вычисляемой КФ соотв., т.е. $n = 0, 1, \dots, N$ и $m = 0, 1, \dots, M$.

Структурно алгоритм расчета ВКФ состоит из двух циклов – внешнего и внутреннего. Всего для функционирования алгоритма потребуется три переменные для организации счетчиков циклов (два основных i, j и один вспомогательный k). Результатом работы 1-ого этапа данного алгоритма в общем случае является массив (или квадратная матрица) c размером $\{N+1; N+1\}$, содержащая набор значений КФ для заданных сигналов u, w (при различных начальных смещениях одного сигнала относительно другого).

Второй этап работы рассматриваемого алгоритма заключается в вычислении сумм элементов матрицы c

по столбцам (накопление результатов свертки), как это представлено в формуле (8). Конечные значения этих сумм c_{sum} и будут отражать фактические значения дискретной КФ.

$$\hat{R}(m) = \frac{\sum c_{0..N,m}}{N-1-m}, \quad (8)$$

где параметр m варьируется от 0 до M с шагом 1.

Заметим, что информативными значениями матрицы c (которые непосредственно участвуют в вычислении дискретной КФ) являются элементы, выделенные серым цветом в табл. 1. Фактически, полезную

часть матрицы c можно ограничить пространством $0..N$ (по строкам), $0..M$ (по столбцам), тогда конечный размер матрицы c можно определить как $\{N+1; M+1\}$, соответственно, остальные элементы являются необязательными при вычислениях. Это справедливо и для последовательности значений КФ (информативная часть массива c_{sum} отсекается по M).

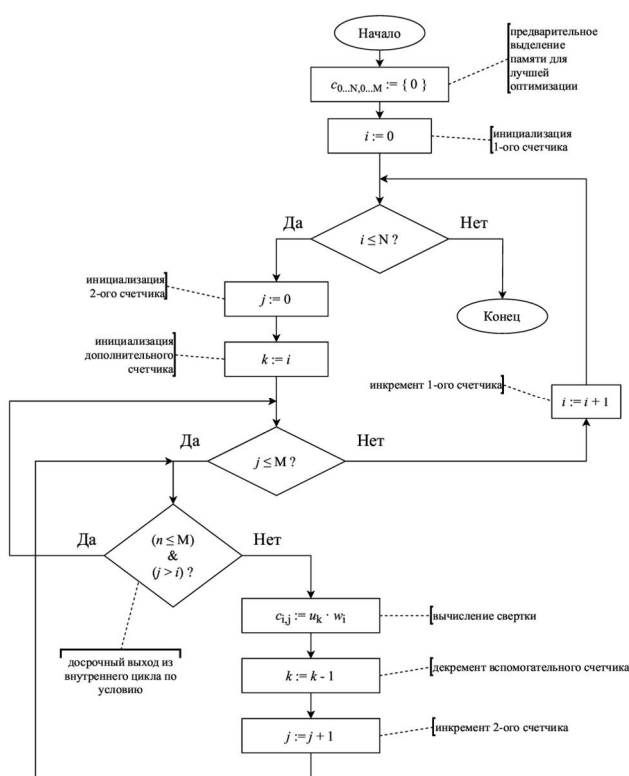


Рис. 2. Схема алгоритма вычисления дискретной КФ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ДВКФ

Приведем некоторые примеры вычисления дискретных КФ с помощью представленного алгоритма. Все действия были проведены в

программном пакете для математических расчетов MatLab.

Рассмотренный алгоритм позволяет производить определение не только ВКФ, но и АКФ. В этом случае, свертка сигнала УЗС осуществляется с самим собой. Так, на рис. 3,а. представлена числовая последовательность $F(n)$ исследуемого сигнала УЗС. На рис. 3,б показана полученная ДАКФ сигнала. Параметры моделирования работы алгоритма: $N = 57$, $M = 23$, шаг выборки отсчетов сигнала $T_d = 35$ мкс.

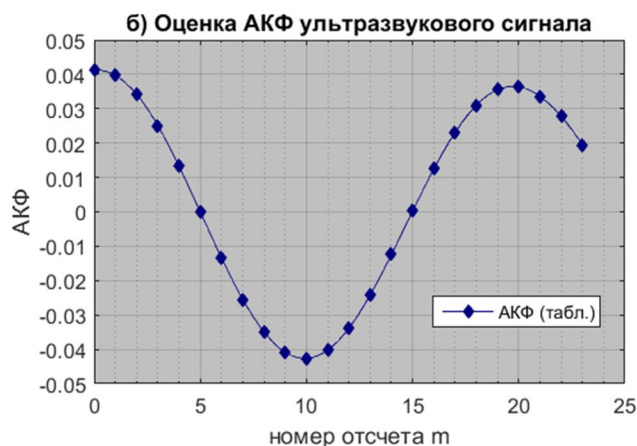
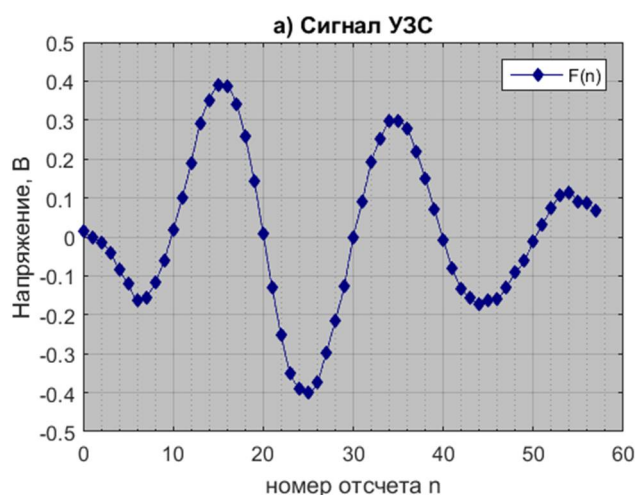


Рис. 3. а) График последовательности отсчетов сигнала УЗС без начального смещения («эталон»); б) График значений вычисленной АКФ табличным способом как свертка УЗС; значения отсчетов последовательностей сигнала-«эталона» и ДАКФ отмечены точками

Табл. 1. Иллюстрация способа вычисления ДВКФ в «табличном» или матричном представлении

n	t	F(n)	F(n+d)	m													
				0	1	2	3	4	5	...	M-1	M	M+1	...	N-1	N	
0	t ₀	u ₀	w ₀	u ₀ ·w ₀	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0
1	t ₁	u ₁	w ₁	u ₁ ·w ₁	u ₀ ·w ₁	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0
2	t ₂	u ₂	w ₂	u ₂ ·w ₂	u ₁ ·w ₂	u ₀ ·w ₂	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0
3	t ₃	u ₃	w ₃	u ₃ ·w ₃	u ₂ ·w ₃	u ₁ ·w ₃	u ₀ ·w ₃	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0
4	t ₄	u ₄	w ₄	u ₄ ·w ₄	u ₃ ·w ₄	u ₂ ·w ₄	u ₁ ·w ₄	u ₀ ·w ₄	0	0	...	0	0	0	...	0	0
...
M-1	t _{M-1}	u _{M-1}	w _{M-1}	u _{M-1} ·w _{M-1}	u _{M-2} ·w _{M-1}	u _{M-3} ·w _{M-1}	u _{M-4} ·w _{M-1}	u _{M-5} ·w _{M-1}	u _{M-6} ·w _{M-1}	...	u ₀ ·w _{M-1}	0	0	...	0	0	
M	t _M	u _M	w _M	u _M ·w _M	u _{M-1} ·w _M	u _{M-2} ·w _M	u _{M-3} ·w _M	u _{M-4} ·w _M	u _{M-5} ·w _M	...	u ₁ ·w _M	u ₀ ·w _M	0	...	0	0	
M+1	t _{M+1}	u _{M+1}	w _{M+1}	u _{M+1} ·w _{M+1}	u _M ·w _{M+1}	u _{M-1} ·w _{M+1}	u _{M-2} ·w _{M+1}	u _{M-3} ·w _{M+1}	u _{M-4} ·w _{M+1}	...	u ₂ ·w _{M+1}	u ₁ ·w _{M+1}	u ₀ ·w _{M+1}	...	0	0	
...	
N-1	t _{N-1}	u _{N-1}	w _{N-1}	u _{N-1} ·w _{N-1}	u _{N-2} ·w _{N-1}	u _{N-3} ·w _{N-1}	u _{N-4} ·w _{N-1}	u _{N-5} ·w _{N-1}	u _{N-6} ·w _{N-1}	...	u _{N-M-2} ·w _{N-1}	u _{N-M-1} ·w _{N-1}	u _{N-M} ·w _{N-1}	...	u ₀ ·w _{N-1}	0	
N	t _N	u _N	w _N	u _N ·w _N	u _{N-1} ·w _N	u _{N-2} ·w _N	u _{N-3} ·w _N	u _{N-4} ·w _N	u _{N-5} ·w _N	...	u _{N-M-1} ·w _N	u _{N-M} ·w _N	u _{N-M+1} ·w _N	...	u ₁ ·w _N	u ₀ ·w _N	
csum(m) = $\hat{R}_m = \hat{R}(m)$				csum ₀	csum ₁	csum ₂	csum ₃	csum ₄	csum ₅	...	csum _{M-1}	csum _M	csum _{M+1}	...	csum _{N-1}	csum _N	

На рис. 4 отображены вычисленная ДВКФ для свертки сигнала-«эталона» F(n), без начального смещения, и сигнала УЗС F(n+d), задержанного относительно «эталона» на время t₃, не кратное периоду дискретизации T_d (t₃ = 5,8; период дискретизации T_d = 125 нс; центральная частота сигнала F_c ≈ 1,43 МГц). Остальные установки остались без изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье был рассмотрен способ вычисления дискретных КФ в основе которого — прямая дискретная свертка сигналов. Приведены схемы алгоритма расчета КФ и его подробное описание. Данный способ во многом базируется на ранее известном обобщенном определении КФ как дискретной свертки сигналов [13], но является его некоторым упрощенным представлением. При этом, обозначенный метод не предполагает глубокой модификации структуры и априорных аналитических зависимостей вычисления КФ (пример реализации можно наблюдать в работе [16]).

Исследуемый алгоритм расчета ВКФ может быть использован в приложениях измерения расхода жидкости или газа, где в составе вычислительных блоков применяются малопотребляющие, но низкопроизводительные микроконтроллеры.

Из недостатков обозреваемого способа вычисления КФ можно упомянуть тот факт, что КФ будет иметь только положительные значения смещения τ по времени (см. рис. 3,б; 4,б). Это может послужить ограничением для последующего применения методов цифровой обработки результатов вычисленной КФ с целью повышения точности поиска T_{1,2} и ΔT.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. [Текст] / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
2. Dietrich, C. F., Ultrasound Elastography, Applied Sciences, MDPI, July 2019, 144 p.
3. Домаркас, В. Й. Ультразвуковая эхоскопия [Текст] / Домаркас В. Й., Пилецкас Э. Л. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 276 с.
4. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справ. [Текст] / П. П. Кремлевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
5. Lynnworth L. C., Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications. Academic Press, 1989.
6. Gasimov, S., V. Glushnev, and M. Panov, “Applications of Digital Signal Processing Methods in Ultrasonic Flowmeters,” IV Int. Conf. on Information Technologies in Engineering Education, Moscow, pp. 399–404, April 2018.

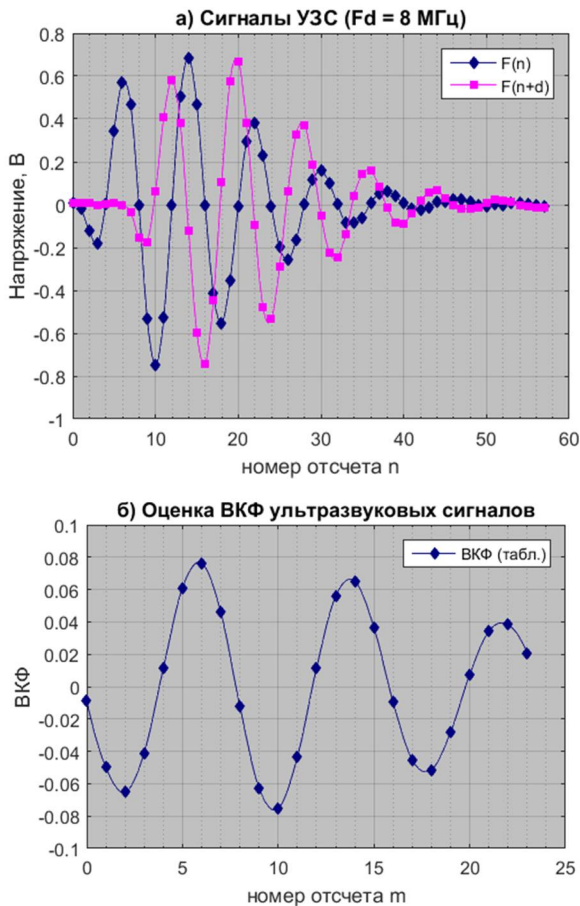


Рис. 4. а) Графики последовательностей отсчетов сигнала-«эталона» (без смещения) и сигнала УЗС (со смещением); б) График значений вычисленной ВКФ как свертка сигналов УЗС и «эталона»; значения отсчетов последовательностей сигналов «эталона», УЗС и ДВКФ отмечены точками

7. Beck, M. S. and A. Plaskowski, Cross Correlation Flowmeters – Their Design and Application, UK: Adam Hilger, 1987.

8. Jacobson, S. A., Lynnworth, L. C., and Korba, J. M., “Differential correlation analyzer,” USA Patent 4 787 252, 1988.

9. Жовинский, В. Н. Корреляционные устройства [Текст] / В. Н. Жовинский, В. Ф. Арховский. – М., «Энергия», 1974. – 248 с.

10. Винокуров, В. И. Вопросы обработки сложных сигналов в корреляционных системах [Текст] / В. И. Винокуров, Р. А. Ваккер. – М. «Советское радио», 1972. – 216 с.

11. Романов, Б. Н. Теория электрической связи. Сообщения, сигналы, помехи и их математические модели: уч. пособие [Текст] / Б. Н. Романов, С. В. Краснов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 127 с.

12. Волгин, В. В. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления (Библиотека по автоматике, вып. 600.) [Текст] / В. В. Волгин, Р. Н. Каримов. – М.: Энергия, 1979. – 80 с.

13. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы [Текст] / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982. – 428 с.

14. Матвеев, Ю.Н. Цифровая обработка сигналов: уч. пособие по дисциплине "Цифровая обработка сигналов" [Текст] / Ю. Н. Матвеев, К. К. Симончик, А. Ю. Тропченко, М. В. Хитров. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.

15. MSP430FR6047 [Электронный ресурс] // Веб-узел компании «Texas Instruments», содержит техническое описание микросхемы-контроллера для измерения расхода жидкости. – 2021. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/gpn/msp430fr6047>.

16. Анишин, Н. С. Ускоренный алгоритм вычисления корреляционных функций и исследование его погрешности [Текст] / Н. С. Анишин, А. М. Тивков // «Автометрия». – 1978. – № 3. – С. 37–40.

Герасимов Сергей Игоревич – старший преподаватель кафедры Диагностических Информационных Технологий (ДИТ), ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», тел. (495)3627022, e-mail: gerasimovsi@mpei.ru.

Глушнев Владимир Дмитриевич – к.т.н., доцент кафедры Диагностических Информационных Технологий, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», тел. (495)3627022, e-mail: glushnirov.vladimir@gmail.com.

TABULAR ALGORITHM FOR EVALUATING THE DISCRETE CROSS-CORRELATION FUNCTION OF THE FLOWMETER ACOUSTIC SIGNALS

S.I. Gerasimov, V.D. Glushnev

National Research University "MPEI", Moscow

Abstract – Correlation signal processing as a particular case of using a digital data processing obtained from acoustic sensors is widely used in modern ultrasonic liquid and gas flowmeters. These include both direct correlation flowmeters and predominantly a time-pulse or time-of-flight type's flowmeters, where the correlation processing of acoustic signals is an addition to the general method for measuring the volumetric flow rate of liquid and gas. The use of correlation processing makes it possible to increase the resolution of the flowmeter as a whole and to ensure the useful signal extraction against the background of the noise presence with a high degree of reliability. The article describes a method for calculating discrete correlation functions based on the generalized definition of a discrete correlation function through the convolution of sampled signals from the flow sensors outputs. The essence of this method comes down to calculating a values set of the cumulative products of the probing signal's samples taken with different steps depending on the total number of signal samples and the assumed number of the correlation function samples. The resulting values sequence is formatted as a two-dimensional array or matrix, but for better understanding it can be represented as a table. The results of the sum of the individual elements of this table or matrix, selected according to the established rule, will be the final values of the cross-correlation function of acoustic signals. Within the framework, an algorithm for calculating the discrete correlation function is directly compiled in accordance with the considered method for calculating the correlation function, examples of software calculation of the cross- and autocorrelation functions of acoustic signals, which are close in their properties to the real signals of ultrasonic flowmeters, are given. The proposed option for calculating discrete correlation functions can be applied in energy-efficient computational modules of flowmeters designed for long-term operation from an autonomous power source with low performance.

Index terms: ultrasonic, time-of-flight, ToF, TDE, UFM, propagation, digital signal processing, DSP, flow rate, table, sequence.

REFERENCES

1. Krautkremer, J. Ultrasonic testing of materials: Ref. ed. [Text] / J. Krautkremer, G. Krautkremer. – M.: Metallurgy, 1991. – 752 p.
2. Dietrich, C.F., Ultrasound Elastography, Applied Sciences, MDPI, July 2019, 144 p.
3. Domarcas, V.Y. Ultrasonic echoscopy [Text] / Domarkas V.Y., Pileckas E.L. – L.: Mechanical engineering. Lenigr. department, 1988. – 276 p.
4. Kremlevskiy, P.P. Flowmeters and counters of the amount of substances: ref. [Text] / P.P. Kremlevskiy. – 4th ed., Rev. and add. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 701 p.
5. Lynnworth L.C., Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications. Academic Press, 1989.
6. Gerasimov, S., V. Glushnev, and M. Panov, "Applications of Digital Signal Processing Methods in Ultrasonic Flowmeters," IV Int. Conf. on Information Technologies in Engineering Education, Moscow, pp. 399–404, April 2018.
7. Beck, M.S. and A. Plaskowski, Cross Correlation Flowmeters – Their Design and Application, UK: Adam Hilger, 1987.
8. Jacobson, S.A., Lynnworth, L.C., and Korba, J.M., "Differential correlation analyzer," USA Patent 4 787 252, 1988.
9. Zhovinsky, V.N. Correlation devices [Text] / V.N. Zhovinsky, V.F. Arkhovsky. – M., "Energy", 1974. – 248 p.
10. Vinokurov, V.I. Problems of processing complex signals in correlation systems [Text] / V.I. Vinokurov, R.A. Vakker. – M. "Soviet radio", 1972, – 216 p.
11. Romanov, B.N. Theory of electrical communication. Messages, signals, interference and their mathematical models: uch. allowance [Text] / B.N. Romanov, S.V. Krasnov. – Ulyanovsk: UISTU, 2008. – 127 p.
12. Volgin, V.V. Estimation of correlation functions in industrial control systems (Library for automation, issue 600) [Text] / V.V. Volgin, R.N. Karimov. – M.: Energiya, 1979. – 80 p.
13. Otnes, R.K. and L. Enochson, Applied time series analysis: Basic techniques. New York: Wiley, 1978.
14. Matveev, Yu.N. Digital signal processing: uch. manual on the discipline "Digital signal processing" [Text] / Yu.N. Matveev, K.K. Simonchik, A.Yu. Tropchenko, M.V. Khitrov. – SPb: SPbNIU ITMO, 2013. – 166 p.
15. MSP430FR6047 Ultrasonic Sensing MCU for ultrasonic flowmeter – Datasheet, Texas Instruments Inc., Dallas, Texas, accessed July 2021, <https://www.ti.com/lit/gpn/msp430fr6047>.
16. Anishin, N.S. Accelerated algorithm for calculating correlation functions and the study of its error [Text] / N.S. Anishin, A.M. Tivkov // Autometriya. – 1978. – № 3. – p. 37-40.

Gerasimov Sergey Igorevich – senior lecturer of the Diagnostic Information Technologies chair (DIT), Moscow Power Engineering Institute (NRU "MPEI"), (495)3627022, e-mail: gerasimovsi@mpei.ru.

Glushnev Vladimir Dmitrievich – candidate of technical sciences, associate professor of the Diagnostic Information Technologies chair (DIT), Moscow Power Engineering Institute (NRU "MPEI"), (495)3627022, glushniiov.vladimir@gmail.com.