

УДК 004.67:519.684

В.А. Фаерман, В.С. Аврамчук

Алгоритмическое обеспечение корреляционного течеискателя, функционирующего в режиме реального времени

Рассматривается адаптация алгоритма корреляционной обработки сигналов для решения задачи определения положения трубопроводных утечек акустическим способом в режиме реального времени. Новизна предложенного решения состоит в возможности уточнения значений результирующей корреляционной функции на основе обработки непрерывно поступающих порций данных. Для обеспечения более низких требований к вычислительным ресурсам по сравнению с классическим алгоритмом используются рекурсивные схемы вычисления корреляционных функций и нормирующих множителей. Это позволяет сохранить характерные для корреляционных течеискателей функциональные возможности и при этом не хранить в памяти промежуточные данные. Таким образом, предложенное алгоритмическое решение может быть использовано на компактных вычислительных платформах, таких как одноплатные компьютеры. Работоспособность коррелятора, программно реализованного в среде MATLAB, показана в ходе модельного эксперимента в режиме реального времени. С использованием синтезированных сигналов, моделирующих шум утечки, исследовано влияние параметров коррелятора на информативность корреляционного анализа при оценке времени запаздывания. Так, в частности, показано, что применение окон низкого разрешения в сочетании с высоким коэффициентом перекрытия позитивно сказывается на информативности анализа и ослабляет требования, предъявляемые к продолжительности сигналов.

Ключевые слова: корреляционный течеискатель, коррелятор, корреляционный анализ, оценка времени запаздывания, MATLAB.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-20-26

Практически важной задачей цифровой обработки сигналов является оценка времени запаздывания, которая находит применение в ряде приложенных радиотехники [1], гидролокации [2], речевого управления [3] и неразрушающего контроля [4].

Широко известным и эффективным методом решения этой задачи является корреляционная обработка сигналов, которая предполагает получение взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов и последующее определение положения корреляционного пика [5]. Примером практического применения корреляционной обработки является задача определения положения трубопроводных утечек.

Суть подхода подробно описана в [4]. Два датчика размещаются на противоположных сторонах линейного участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки. Порождаемый истекающей через отверстие жидкостью сигнал принимается обоими датчиками, однако с различным временным смещением. Оценка времени запаздывания между сигналами, принимаемыми датчиками, может быть использована для определения положения утечки. Совершенствование алгоритмов обработки сигналов применительно к решению этой практической задачи является актуальным и привлекает внимание как российских [6], так и зарубежных исследователей [7].

Специализированные устройства, предназначенные для определения положения утечек описанным методом, называются корреляционными течеискателями. Специфика эксплуатации определяет требования к массогабаритным характеристикам течеискателей и их энергопотреблению [8]. Обеспечение этих требований делает актуальной задачу реализации основных алгоритмов обработки сигналов на компактных вычислительных платформах, таких как одноплатные компьютеры.

Также в [8] отмечается важность для течеискателя обеспечивать возможность обработки сигналов в режиме реального времени под управлением оператора. Для реализации последнего на портативных вычислительных устройствах, существенно уступающих персональным компьютерам в объеме памяти и вычислительным возможностям процессора, необходима адаптация алгоритмов корреляционной обработки сигналов. Данная работа направлена на модификацию известных алгоритмов с целью исключить избыточные вычисления и хранение промежуточных данных, обеспечив при этом сохранение привычных функциональных возможностей корреляционных течеискателей.

Простой коррелятор

Функциональная схема устройства, осуществляющего базовую корреляционную обработку, представлена на рис. 1 [5].

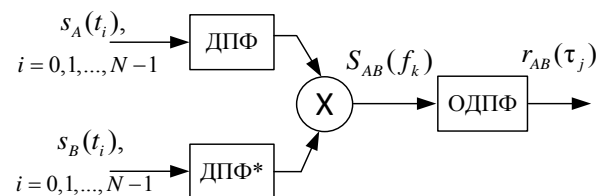


Рис. 1. Простой коррелятор

Обработка цифровых сигналов $s_A(t_i)$, $s_B(t_i)$ ($t_i = i \cdot \Delta t$, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$) в соответствии со схемой на рис. 1 производится согласно соотношениям

$$r_{AB}(\tau_j) = \frac{1}{N} \cdot F^{-1}[S_{AB}(f_k)], \quad (1)$$

$$S_{AB}(f_k) = S_A^*(f_k) \times S_B(f_k), \quad (2)$$

$$S_A^*(f_k) = F^*[s_A(t_i) \times W(i)], \quad S_B(f_k) = F[s_B(t_i) \times W(i)]. \quad (3)$$

Выше использованы следующие обозначения: N – число отсчётов сигналов в одном сегменте данных; Δt – шаг дискретизации; $W(i)$ – отсчёты оконной функции; \times – поэлементное умножение массивов; $F[\cdot]$ – прямое оконное дискретное преобразование Фурье (ДПФ); $F^*[\cdot]$ – комплексное сопряжение результата ДПФ (ДПФ*); $F^{-1}[\cdot]$ – обратное ДПФ (ОДПФ); $S_A(f_k)$, $S_B(f_k)$ – дискретные спектры сигналов; $S_{AB}(f_k)$ – взаимный спектр сигналов; $r_{AB}(\tau_j)$ – ВКФ.

Последующие действия сводятся к определению положения пика на графике ВКФ и оценке времени запаздывания (T_d) согласно

$$T_d = \arg \max(r_{AB}(\tau_j)).$$

В силу того, что в качестве АЦП в течеискателях нередко применяются звуковые карты компьютеров, типовое значение частоты дискретизации составляет $f_d = 1/\Delta t = 44100$ Гц. В то же время N выбирается с учётом диапазона потенциально возможных значений T_d и составляет обычно от 2048 до 16384 отсчётов.

Коррелятор с сегментацией данных

Получение корреляционной функции с применением (1), с одной стороны, накладывает ограничение на размерность входных данных (N) и, с другой стороны, требует выполнения нелинейно нарастающего количества вычислительных операций. Для того чтобы обеспечить возможность обработки сигналов, представленных большим числом отсчётов, применяется сегментация данных [9].

Сегментация предполагает разбиение исходных сигналов, содержащих $Q \cdot N$ отсчётов, на Q сегментов по N отсчётов каждый. После чего каждый q -й ($q = 0, 1, \dots, Q - 1$) сегмент данных обрабатывается в соответствии с (1) с целью получения ВКФ $r^{(q)}_{AB}(\tau_j)$, а окончательный результат формируется путём суммирования каждой из Q функций

$$r_{AB}(\tau_j) = F^{-1} \left[\sum_{q=0}^{Q-1} w_q \cdot S_{AB}^{(q)}(f_k) \right], \quad (4)$$

где w_q – весовой коэффициент, $S_{AB}^{(q)}(f_k)$ – взаимный спектр сигналов, вычисленный в соответствии с (2) для q -го сегмента.

Функциональная схема коррелятора с сегментацией представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что в силу линейности ДПФ [4] усреднение ВКФ и взаимных спектров сигналов эквивалентно.

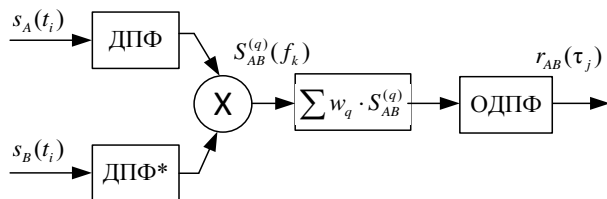


Рис. 2. Коррелятор с сегментацией данных

Как правило, при выборе весовых коэффициентов в (4) руководствуются принципом когерентного усреднения ВКФ [10]

$$w_q = \frac{1}{Q}, \quad q = 0, 1, \dots, Q - 1.$$

Однако применение (4) предполагает наличие априорных сведений о продолжительности входных сигналов. В качестве альтернативы предложено применение рекурсивного выражения

$$r_{AB}(\tau_j, q) = \frac{1}{q} \cdot F^{-1} \left[(q-1) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + S_{AB}^{(q)}(f_k) \right], \quad (5)$$

где $S_{AB}(f_k, q)$ – результирующий взаимный спектр после обработки q -го сегмента данных. Преимуществом (5) является возможность обработки непрерывно поступающих на вход коррелятора данных.

Поскольку обработка данных осуществляется по сегментам, отсчёты сигналов, поступающие с интервалом Δt , накапливаются в запоминающем устройстве на входе коррелятора, которое далее именуется буфером.

Наложение и чувствительность

В ряде задач спектрального анализа и корреляционной обработки сигналов применяется сегментация с наложением [9]. Взаимное наложение сегментов способствует увеличению числа сегментов и применяется в условиях недостаточности располагаемых данных. Это актуально и в задачах корреляционного течеискания, поскольку, в силу непостоянства давления жидкости, производимый утечкой шум не является стационарным сигналом. Наложение позволяет ослабить требования к продолжительности временных интервалов, в течение которых сигнал может рассматриваться как стационарный.

Суть метода наложения состоит в том, что любая пара соседних сегментов имеет некоторое количество общих отсчётов N_0 , фактическое число которых определяется коэффициентом перекрытия k_{ol}

$$N_0 = \lceil k_{ol} \cdot N \rceil, \quad 0 \leq k_{ol} \leq 1.$$

Введение перекрытия не оказывает влияния на процедуру обработки отдельного сегмента, однако влияет непосредственно на величину B_0 буфера на входе коррелятора

$$B_0 = \lfloor (1 - k_{ol}) \cdot N \rfloor.$$

Таким образом, объём буфера определяется коэффициентом перекрытия и величиной сегмента данных.

Наряду с коэффициентом перекрытия k_{ol} может быть введён коэффициент чувствительности k_s , определяющий, насколько результирующая ВКФ изменчива под влиянием обрабатываемых сегментов данных. Введение коэффициента необходимо для создания канала управления коррелятором непосредственно в ходе приёма и обработки сигналов. В простейшем случае управление может осуществляться в ручном режиме оператором течеискателя [11].

Для определённости, положим область допустимых значений коэффициента чувствительности $-1 \leq k_s \leq 1$. При $k_s = 1$ результирующее значение ВКФ полностью определяется последним обработанным сегментом данных. Напротив, при $k_s = -1$ результирующая ВКФ не изменяется под влиянием

поступающих данных. При $k_s = 0$ вычисления сводятся к (5). Руководствуясь принятыми положениями, преобразуем (5) для обоих случаев:

$$r_{AB}(\tau_j, q) = (1 - k_s) \times \left(\frac{1}{q} \cdot F^{-1} \left[(q-1) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right] + k_s \cdot S_{AB}^{(q)}(\tau_j), k_s \in [0, 1]; \right. \\ \left. r_{AB}(\tau_j, q) = \frac{1}{q} \times F^{-1} \left[(q-1-k_s) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + (1+k_s) \cdot S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right], k_s \in [-1, 0). \right. \quad (6)$$

Нормирование корреляционной функции

Значения ВКФ определяются не только степенью коррелированности сигналов, но и их уровнем. Для того чтобы исключить последнее, используется нормирование.

Нормирующий множитель $1/D_q$ для ВКФ, полученной по единственному q -му сегменту данных, вычисляется в соответствии с формулой Пирсона [4]

$$\frac{1}{D_q} = \frac{1}{\sigma \left[s_A^{(q)}(t_i) \right] \cdot \sigma \left[s_B^{(q)}(t_i) \right]}, \quad (8)$$

где $\sigma[\cdot]$ – среднеквадратическое отклонение. В силу свойств коэффициента, вычисляемого по (8), справедливо отношение

$$-1 \leq \frac{1}{D_q} \cdot r_{AB}^{(q)}(\tau_j) \leq 1. \quad (9)$$

Аналогично может быть получен коэффициент $1/D(q)$ для ВКФ, вычисляемой в соответствии с (5), такой что

$$-1 \leq \frac{1}{D(q)} \cdot r_{AB}(\tau_j, q) \leq 1.$$

Для этого представим ВКФ на произвольном Q -м шаге $r_{AB}(\tau_j, Q)$ следующим образом

$$r_{AB}(\tau_j, Q) = \frac{1}{Q} \cdot \sum_{q=1}^Q F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]. \quad (10)$$

Учитывая (9) и (1), имеем

$$-1 \leq \frac{F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]}{D_q} \leq 1. \quad (11)$$

Однако если справедливо (11), то справедливо и

$$-1 \leq \frac{\sum_{q=1}^Q F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]}{\sum_{q=1}^Q D_q} \leq 1. \quad (12)$$

При этом числитель (12) с точностью до постоянного множителя соответствует правой части (10), следовательно,

$$\frac{1}{D(Q)} = Q \cdot \frac{1}{\sum_{q=1}^Q D_q}. \quad (13)$$

В качестве альтернативы (13) для применения совместно с (5) предложено рекурсивное выражение

$$D(q) = \frac{1}{q} \cdot \left[(q-1) \cdot D(q-1) + D_q \right].$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для коэффициентов, применяемых совместно с (6) и (7) соответственно:

$$D(q) = \frac{1-k_s}{q} \cdot \left[(q-1) \cdot D(q-1) + D_q \right] + k_s \cdot D_q,$$

$$D(q) = \frac{1}{q} \cdot \left[(q-1-k_s) \cdot D(q-1) + (1+k_s) \cdot D_q \right].$$

Проверка алгоритмов

Предложенные алгоритмы были реализованы в среде MATLAB для проверки их работоспособности. Для синтеза тестовых сигналов использовалась программная модель, также реализованная в MATLAB и описанная далее.

Модель сигнала утечки основана на эмпирической модели акустической эмиссии, производимой истекающей через отверстие жидкостью под давлением [12]. Очевидно, что виброакустический сигнал, принимаемый удалёнными датчиками, отличается от сигнала, регистрируемого непосредственно в месте утечки. Для того чтобы оценить искажения, которые претерпевает сигнал, использована модель «труба как фильтр» [13]. Динамическая характеристика фильтра определяется нижеприведёнными соотношениями

$$H_{A,B}(f, d_{A,B}) = e^{-2\pi f \cdot \beta \cdot d_{A,B}} \cdot e^{-i \cdot 2\pi f \cdot \frac{d_{A,B}}{V}},$$

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{E \cdot h}}},$$

$$\beta = \left(\frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{10 \cdot E \cdot h} \right) / \left(V \cdot \sqrt{1 + \frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{E \cdot h}} \right),$$

где $d_{A,B}$ – расстояния от утечки до датчиков; B – модуль упругости жидкости; V_0 – свободная скорость звука в жидкости; D – внутренний диаметр трубы; h – толщина стенки трубы; E – модуль Юнга материала, из которого изготовлена труба; V – скорость распространения звука вдоль трубопровода; β – коэффициент ослабления. Более подробное описание модели, алгоритмов синтеза сигналов и их программной реализации дано в [14].

При синтезе сигналов моделировалась следующая ситуация. На линейном участке стального водопровода с внутренним диаметром 80 мм и толщиной стенки 4 мм присутствует отверстие диаметром 2,5 мм. Давление в водопроводе считается равным 3 атм. Датчики расположены в противоположных

концах линейного участка трубопровода на расстоянии 7 и 13 м от места утечки. Спектральные характеристики аддитивного некоррелированного шума генерировались в соответствии с рекомендациями в [12].

На рис. 3 представлены амплитудные спектры чистых и смешанных со случайными некоррелированными шумами сигналов.

Информативность корреляционного анализа в задачах оценки времени запаздывания определяется отношением сигнал/шум на выходе коррелятора. В качестве оценки отношения сигнал/шум в [15] предложена следующая безразмерная величина:

$$I = \frac{\max[r_{AB}(\tau_j)]}{\text{СКЗ}[r_{AB}(\tau_j)]}, \quad (14)$$

где СКЗ – среднеквадратическое значение функции. Таким образом, (14) количественно характеризует визуальную различимость пика на коррелограмме, как это представлено на рис. 4. Дополнив (14) зависимостью от объёма анализируемых данных (продолжительности записи сигналов на входе коррелятора), получим

$$I(t) = \frac{\max[r_{AB}(\tau_j, q(t))]}{\text{СКЗ}[r_{AB}(\tau_j, q(t))]}, \quad q(t) = \left\lfloor \frac{t}{N \cdot \Delta t} \right\rfloor.$$

На рис. 5 для чистого сигнала представлен вид зависимости $I(t)$ для различных значений чувствительности k_s (при $k_{ol} = 0$). При $k_s < 0$ функция $I(t)$ возрастает медленнее, чем при $k_s = 0$.

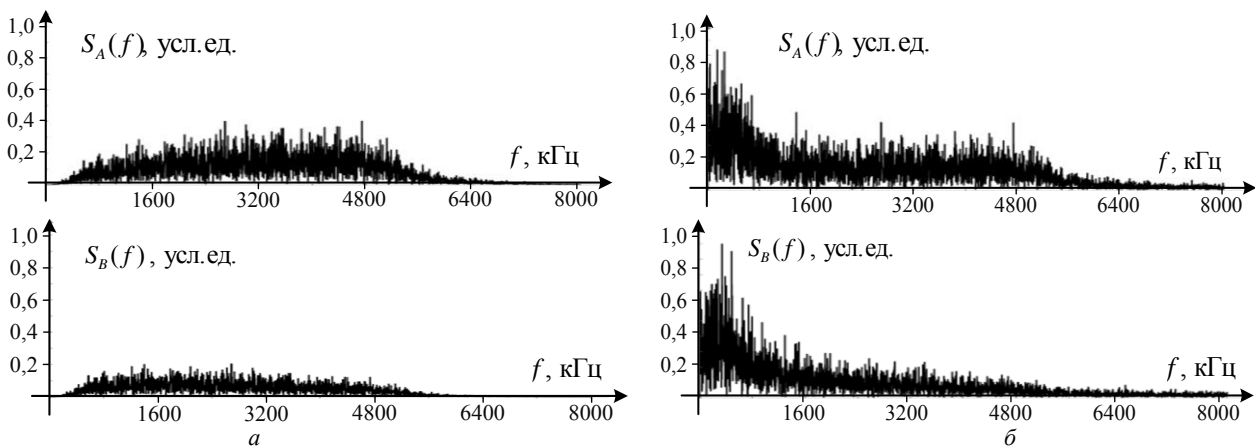


Рис. 3. Амплитудные спектры тестовых сигналов: а – исходный сигнал (два канала); б – исходный сигнал с добавлением шума (два канала). Амплитуды приведены в усл. ед.

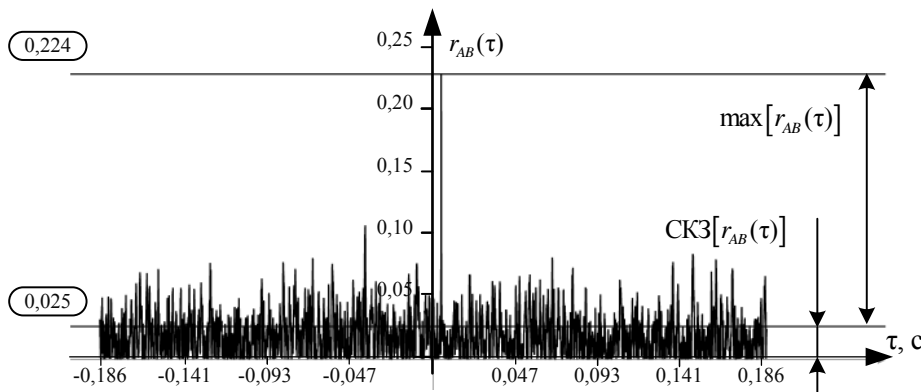


Рис. 4. Модуль ВКФ зашумлённого сигнала

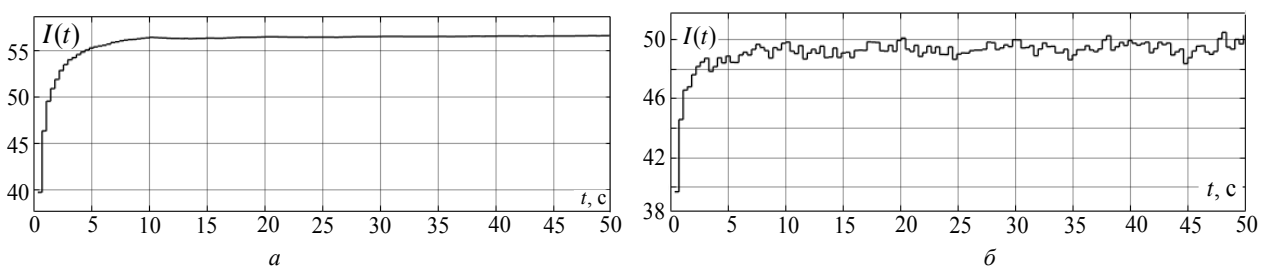


Рис. 5. Графики зависимости $I(t)$ для различных значений коэффициента чувствительности k_s : а – 0; б – 0,5

Исключая это обстоятельство, существенного влияния на вид зависимости варьирование коэффициента в диапазоне отрицательных значений не оказывает. При $k_s > 0$ функция $I(t)$ не имеет установившегося значения (см. рис. 5, б), поскольку сигнал на выходе коррелятора находится в непосредственной зависимости от его входов в соответствии с (7). В целом результаты свидетельствуют о корректности работы алгоритма.

Исследование влияния параметров

В соответствии с принципом, описанным в предыдущем разделе, было проведено исследование влияния коэффициента перекрытия k_{ol} и типа оконной функции $W(i)$ на вид зависимости $I(t)$ при анализе зашумленных сигналов. Использовались следующие оконные функции [16]: высокого разрешения (ВР) – прямоугольное окно, среднего разрешения (СР) – окно Блэкмана–Натэлла, низкого разрешения (НР) – окно с плоской вершиной. В качестве параметров, характеризующих вид зависимости, были использованы следующие: результирующее значение (I_{\max}); время установления значения ($T_{\text{изм}}$).

Результаты эксперимента сведены в таблицу.

Влияние параметров расчета на вид зависимости $I(t)$

Параметры		Характеристики кривой	
k_{ol}	$W(i)$	I_{\max}	$T_{\text{изм}}$
0	ВР	8,633	39,81
20		9,431	36,22
50		9,843	31,67
75		9,806	31,88
90		9,806	31,84
0	СР	8,413	49,45
20		10,179	49,53
50		13,096	46,82
75		13,583	36,79
90		13,515	33,17
0	НР	9,469	49,50
20		11,950	49,61
50		15,329	46,89
75		17,011	43,14
90		17,067	36,85

Результирующее значение I_{\max} определялось как

$$I_{\max} = I(T_{\max}),$$

где T_{\max} – полное время эксперимента. Время установления значения $T_{\text{изм}}$ определялось как минимальное значение, удовлетворяющее следующему неравенству:

$$0,95 \cdot I_{\max} \leq I(t) \leq 1,05 \cdot I_{\max} (\forall t > T_{\text{изм}}).$$

Полученные зависимости в целом соответствуют графику, представленному на рис. 5. Различия между кривыми исчерпываются результирующими значениями и временем их установления.

По результатам исследований, представленным в таблице, можно утверждать, что наибольшую информативность анализа обеспечивают высокое перекрытие в сочетании с оконной функцией низкого разрешения. При этом необходимо отметить следующие обстоятельства: 1) в ходе увеличения k_{ol} в определённый момент наступает насыщение, и

дальнейшее его изменение в большую сторону не улучшает результата (I_{\max}); 2) увеличение k_{ol} приводит к уменьшению $T_{\text{изм}}$, что свидетельствует о том, что для получения значения I , близкого к I_{\max} при использовании перекрытия, требуется меньший объём выборки.

Заключение

В статье предложены алгоритмы корреляционного анализа, ориентированные на выполнение в реальном масштабе времени, и приведено их математическое обоснование. Предложенные алгоритмы реализуют функции обработки сигналов, характерные для корреляционных теческателей, и при этом не используют дополнительную памяти для хранения промежуточных результатов. Работоспособность алгоритмов показана на программном прототипе коррелятора, реализованного в MATLAB.

Введение в алгоритм обработки сигналов параметров перекрытия при сегментации данных, а также чувствительности коррелятора обеспечивает дополнительные возможности влияния на производимые вычисления. Так, в ходе модельного эксперимента показано, что увеличение коэффициента перекрытия способствует уменьшению времени, в течение которого отношение сигнал/шум на выходе коррелятора приходит к максимальному значению. Это ослабляет требования к продолжительности временных интервалов, в течение которых исследуемый сигнал может правомерно рассматриваться как стационарный, что актуально в задачах поиска утечек.

Отдельно необходимо отметить, что изменение коэффициента чувствительности непосредственно во время расчётов позволяет организовать канал управления коррелятором. Этот канал управления может быть использован для организации обратной связи, но такое решение потребует введения формальной метрики для оценки сигнала на выходе коррелятора. В качестве такой метрики может быть использован параметр (14).

Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Carter C. Time delay estimation for passive sonar signal processing // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1981. – Vol. ASSP-29, No. 3. – P. 463–470.
3. Jian M. Performance study of time-delay estimation in a room environment / M. Jian, A.C. Kot, M.H. Er // Proceeding of IEEE International conference on Circuits and Systems. – Monterey: IEEE, 1998. – P. 554–558.
4. Fuchs H.V. Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis / H.V. Fuchs, R. Riehle // Applied Acoustics. – 1991. – Vol. 33, Iss. 1. – P. 1–19.
5. Айфичер Э.С. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – 2-е изд., пер. с англ. / Э.С. Айфичер, Б.У. Джервис. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
6. Фирсов А.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном теческании, основанный на анализе функции взаимного спектра / А.А. Фирсов, Д.А. Терентьев // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 23–27.
7. Adaptive phase transform method for pipeline leakage detection [Электронный ресурс] / Y. Ma, Y. Gao, X. Cui,

M. Brennan, F. Almeida, J. Yang // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, Iss. 2. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/310>.

8. Кошкин С.Ю. Выбор корреляционного теческателья // *Megatech*. – 2011. – № 2. – С. 52–56.

9. Carter G. Coherence and time-delay estimation // *Proceedings of IEEE*. – 1987. – Vol. 75, Iss. 2. – P. 236–255.

10. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 265 с.

11. Аврамчук В.С. Реализация корреляционных алгоритмов определения положения трубопроводных утечек на микроконтроллерах Cortex / В.С. Аврамчук, В.А. Фаерман // *Высокопроизводительные вычисления системы и технологии*. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 17–20.

12. Papastefanou A.S. Experimental investigation into the characteristics of in-pipe leak noise in plastic water filled pipes / A.S. Papastefanou, Ph.F. Joseph, M.J. Brennan // *Acta Acustica united with Acustica*. – 2012. – Vol. 98. – P. 847–856.

13. A virtual pipe rig for testing acoustic detection correlators: proof of concept / M.J. Brennan, F. Kroll de Lima, F.C.L. de Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini // *Applied Acoustics*. – 2016. – Vol. 102. – P. 137–145.

14. Faerman V. Concept and implementation of the laboratory bench for simulating the case of leak detection with the use of leak-noise correlator / V. Faerman, A. Tsavnin // *AIP Proceedings*. – 2019. – Vol. 2195. – id. 020006.

15. Water leakage monitoring education: Cross correlation study via spectral whitening / R. Ionel, S. Ionel, P. Bauer, F. Quint // *Proceedings of IECON 2014*. – Dallas: IEEE, 2014. – P. 2465–2471.

16. Бахурин С. Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции [Электронный ресурс] // *Теория и практика цифровой обработки сигналов*. – URL: <http://www.dsplib.ru/content/win/win.html> (дата обращения: 21.01.2019).

Фаерман Владимир Андреевич

Преподаватель каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), член IEEE
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Тел.: +7-923-44-350-44
Эл. почта: fva@fb.tusur.ru

Аврамчук Валерий Степанович

Д-р техн. наук, доцент, отделения автоматизации и робототехники (ОАР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-5012-1826
Тел.: +7 (382-2) 70-63-50
Эл. почта: avrs@tpu.ru

Faerman V.A., Avramchuk V.S.

Algorithms for real-time leak noise correlator

In the paper are discussed the modifications of a cross-correlation digital signals processing algorithm to ensure its operability application to real-time pipeline leak detection.

The distinguishing features of the proposed solution is an ability to recursively recalculate correlation function and normalization value after the acquisition of a new data segment. It makes computational costs comparatively low because no temporary data is stored and no extra computations are made. It makes the implementation of normal leak noise correlator's function set on portable single-board computers possible. Real-time operability of the algorithms is demonstrated via experimental study in MATLAB. The computer-generated leak noise signals were used to study the impact of the coefficient on the information capacity of the signal on the output of the correlator. Thus, low-resolution window function and high overlap coefficient are proved to be a good option for time-delay estimation in application to leak detection.

Keywords: leak noise correlator, correlation analysis, time delay estimation, MATLAB.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-20-26

References

1. Tikhonov V.I. *Optimallyy priem signalov* [Optimum signal receiving]. Moscow: Radio I Svyaz, 1983, 320 p. (in Russ.).

2. Carter C. Time delay estimation for passive sonar signal processing // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 463–470.

3. Jian M., Kot A.C., Er M.H. Performance study of time-delay estimation in a room environment. *Proceeding of IEEE International Conference on Circuits and Systems*. Monterey, IEEE, 1998, pp. 554–558.

4. Fuchs H.V., R. Riehle. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Applied Acoustics*, 1991, vol. 33, iss. 1, pp. 1–19.

5. Ifeachor E., Jervis B. *Digital signal processing: practical approach*. Upper Saddle River (NJ), Prentice hall, 2004, 992 p.

6. Firsov A.A., Terentiev D.A. Algoritm povysheniya tochnosti lokacii pri korreljacion-nom techeiskanii, osnovannyj na analize funkcii vzaimno-go spektra [Algorithm for improving accuracy of leak detection based on analysis of cross-spectrum] // *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 8, pp. 23–27 (in Russ.).

7. Ma Y., Gao Y., Cui X., Brennan M., Almeida F., Yang J. Adaptive phase transform method for pipeline leakage detection // *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 2, URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/310>.

8. Koshkin S.Yu. Vybhor korreljacionnogo techeiskatelja [Selection of a leak noise correlator] // *Megatech*, 2011, no. 2, pp. 52–56 (in Russ.).

9. G. Carter. Coherence and time-delay estimation. *Proceedings of IEEE*, 1987, vol. 75, iss. 2, pp. 236–255.

10. Marple S.L. *Digital spectral analysis with applications*. Upper Saddle River (NJ), Prentice hall, 1987, 252 p.

11. Avramchuk V.S., Faerman V.A. Realizacija korreljacionnyh algoritmov opredelenija po-lozhenija truboprovodnyh utechek na mikrokontrollerah Cortex [Implementation of the correlation algorithms for locating pipeline leaks on microcontrollers Cortex-M3 and Cortex-M4] // *Vysokoproduktivnye vychislitelnye sistemy I tekhnologii*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 17–20 (in Russ.).

12. Papastefanou A.S., Joseph Ph.F., Brennan M.J. Experimental investigation into the characteristics of in-pipe leak noise in plastic water filled pipes // *Acta Acustica*, 2012, vol. 98, pp. 847–856.

13. Brennan M.J., Kroll de Lima F., de Almeida F.C.L., Joseph P.F., Paschoalini A.T. A virtual pipe rig for testing

acoustic detection correlators: proof of concept // *Applied Acoustics*, 2016, vol. 102, pp. 137–145.

14. Faerman V., Tsavnin A. Concept and implementation of the laboratory bench for simulating the case of leak detection with the use of leak-noise correlator // *AIP Proceedings*, 2019, vol. 2195, id. 020006.

15. Ionel R., Ionel S., Bauer P., Quint F. Water leakage monitoring education: Cross correlation study via spectral whitening // *Proceedings of IECON 2014*, Dallas, TX, USA, IEEE, 2014, pp. 2465–2471.

16. Bakhurin S. *Spektral'nyj analiz na ogranichennom intervale vremeni Okonnye funkcii* [Spectral analysis of finite duration signals] // *Teoriya i praktika tsivrfovoy obrabotki signalov*, 2019, URL: <http://wwiIn Russ.>

Vladimir A. Faermam

Lecturer, Department of Complex Information Security of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Phone: +7-923-44-350-44
Email: fva@fb.tusur.ru

Valeriy S. Avramchuk

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Automation and Robotics National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5012-1826
Phone: +7 (382-2) 70-63-50
Email: avs@tpu.ru