

Анализ особенностей обработки сигналов ультразвуковых расходомеров с линейно-частотно модулированным излучением

М.В. Ронкин ✉, *А.А. Калмыков*

Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия;
e-mail: mvRonkin@gmail.com

Аннотация. Проведен анализ и показана возможность использования ЛЧМ сигналов и гетеродинной схемы приема в УЗ ЛЧМ накладных время-пролетных расходомерах. Показано, что при измерениях расхода по разностям задержек в рамках рассмотренной модели в качестве информационного параметра может быть использована полная фаза сигналов биений (зависимость фазы сигнала от времени). Для данного случая построена модель сигнала биений. Проведен анализ предложенных в литературе, в том числе нами, алгоритмов в классе гладких центральных конечно-разностных оценок и их экспериментальное исследование в рамках поставленной задачи. Полученные результаты подтверждают эффективность рассмотренных методов измерения разностей задержек на практике. Рассмотренные методы позволяют быть реализованными на базе современных микроконтроллеров и при этом являются статистически эффективными в рамках рассмотренной задачи. Результаты проведенной работы доказывают эффективность использования рассмотренной модели сигналов и методов оценки их параметров в задачах измерений расхода при помощи ультразвуковых накладных ЛЧМ расходомеров.

Ключевые слова. Обработка сигналов, ЛЧМ сигналы, ультразвуковые расходомеры, накладные ультразвуковые расходомеры, измерения задержек, измерения разностей задержек

Analysis of processing features of ultrasonic flowmeters with FMCW signals

Mikhail V. Ronkin ✉, *Alexey A. Kalmykov*

Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin;
Ekaterinburg, Russia; e-mail: mvRonkin@gmail.com

Abstract. The paper deals with the analysis of features of frequency-modulated continuous-wave (FMCW) signals and heterodyne scheme of receiving in ultrasonic clamp-on time-of-flight flowmeters. It is demonstrated that the full phase of time relation may be applied as the information parameter in the case of measuring the time delay difference in the considered task. The model of beat signal for this task is proposed. The carried on analysis of existed (including those proposed by authors) algorithms in the class of smooth centroid finite-

difference estimators for the task. The attained results prove the effectiveness of the studied methods of measuring the time delay difference in practice. The studied algorithms may be implemented on the base of modern microcontrollers with relatively low computation complexity, being statistically effective within the considered task. The results of the work prove the advantages of the proposed approach for the ultrasonic clamp-on flow measurements.

Keywords. Signal processing, FMCW signals, clamp-on ultrasonic flow meters, ultrasonic flow meters, time delay measurement, time-delayed difference measurement

Введение

Расходомеры жидкостей, газов и паров в трубопроводах позволяют обеспечить контроль, управление, автоматизацию процессов и оптимизацию технологических режимов, и коммерческий учет продукта на выходе в: энергетике, нефтяной, газовой, химической и нефтехимической и во многих других отраслях промышленности. Значение использования расходомеров возрастает в современном мире в связи с острой необходимостью максимальной экономии энергетических и водных ресурсов, которые все более и более дорожают [1].

В настоящее время, как правило, к расходомерам предъявляются требования высокой точности, высокой стабильности показаний, широкого диапазона измеряемых расходов и малой чувствительности к таким условиям измерений как температура, давление, физико-химические свойства контролируемой среды [1]. Одним из наиболее перспективных видов расходомеров являются ультразвуковые (УЗ) времяпролетные расходомеры. Они позволяют в большинстве случаев удовлетворить наиболее широкому кругу предъявляемым к измерителям расхода требованиям [1–4].

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на эффекте замедления или ускорения акустических колебаний при распространении в движущейся среде между первичными пьезопреобразователями (ПП) [5]. При этом разность задержек «по потоку» и «против потока» будет пропорциональна его скорости. Схема такого расходомера показана на рис. 1.

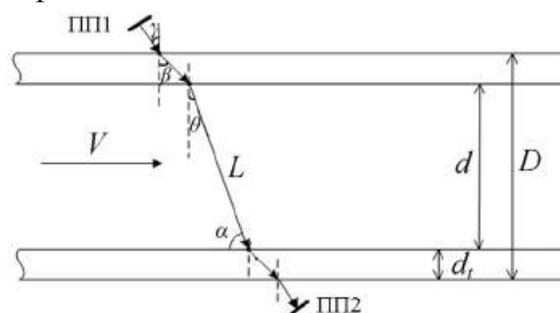


Рис. 1. Схема времяпролетного метода измерения расхода

Fig. 1. Block-scheme of time-of-flight flow meter

Выражения для τ_u – времени прохождения УЗ по потоку и τ_d – времени прохождения волны против потока имеют следующий вид [1]:

$$\tau_u = \frac{L}{c + v \sin \theta}; \quad \tau_d = \frac{L}{c - v \sin \theta}, \quad (1)$$

где L – длина акустического пути; θ – угол между нормалью и направлением УЗ луча в контролируемой среде; c – скорость звука в контролируемой среде; v – скорость потока. Для случая, изображенного на рис. 1, $L = d / \cos \theta$, где d – внутренний диаметр трубопровода.

В наиболее простом случае информационным параметром является разность задержек «по потоку» и «против потока» [6]:

$$\Delta\tau \approx 2L(v / c^2) \sin \theta, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ – разность задержек.

При использовании ультразвукового принципа измерений расход потока вычисляется на основании показаний расходомера по формуле [1]:

$$Q = kAv = k \cdot \frac{\pi d^2}{4} v, \quad (3)$$

где k – поправочный коэффициент, зависящий от скорости потока, среды, геометрических размеров и конфигурации трубопровода; A – площадь сечения трубопровода; v – скорость потока [1].

Одной из основных проблем ультразвуковой время-пролетной расходомерии жидкостей и газов на сегодняшний день является повышение точности измерения разностей задержек УЗ волн. При этом типичный порядок значений $\Delta\tau \sim 10\text{--}100$ нс, а $\tau_{up}, \tau_{dw} \sim 10\text{--}100$ мкс. Особенно данная проблема актуальна при использовании бесконтактных ультразвуковых расходомеров, имеющих первичные преобразователи, расположенные на внешней стенке трубопровода [3; 4].

Анализ возможностей решения указанных выше задач позволяет предположить перспективность использования современных достижений в области радиолокации и цифровой обработки сигналов. В частности при использовании ультразвуковых бесконтактных расходомеров может быть предложено применение сложно модулированных сигналов и цифровых алгоритмов их обработки, что позволяет повысить отношение сигнал/шум принимаемых сигналов и увеличить точность их обработки.

Постановка и анализ задачи

Одним из наиболее перспективных методов сложной модуляции сигналов является линейная-частотная модуляция (ЛЧМ). В приложениях ближней радиолокации, как правило, оптимальный прием таких сигналов реализуется при помощи схемы так называемого гетеродин-

ного приемника [7]. Схема канала приемо-передатчика с квадратурной гетеродинной обработкой приведена на рис. 2.

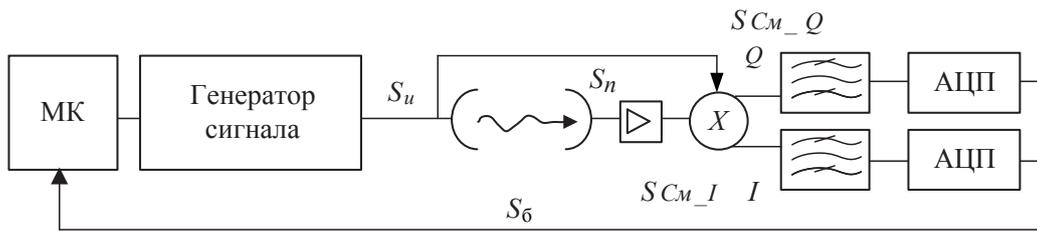


Рис. 2. Схема канала приемо-передатчика с квадратурной гетеродинной обработкой

Fig. 2. Block-scheme of QI heterodyne based transmitter

Принцип работы схемы, показанной на рис. 2, заключается в синхронном излучении и гетеродинировании принимаемого сигнала. Из полученной смеси сигналов выделяют низкочастотную составляющую. Полученный сигнал называется сигналом биения:

$$s_b(t) = a_b \exp\{i(\omega(\tau)t + \theta(\tau))\}, \quad (4)$$

где a_b – амплитуда сигнала биений; $\omega(\tau)$ – частота сигнала биений; $\theta(\tau)$ – начальная фаза сигнала биений, для которых соответственно:

$$\omega(\tau) = 2\pi \frac{\Delta f}{T_m} \tau; \quad \theta(\tau) = 2\pi f_0 \tau, \quad (5)$$

где f_0 – несущая частота сигнала; Δf – девиация частоты; T_m – период модуляции.

Сигнал биений (5) содержит информацию о задержке принятой волны в своей частоте и начальной фазе. Как правило, измерению подлежит частота сигнала [8]. Однако, в случае измерения разностей задержек начальная фаза также может являться информативным параметром.

Как было показано в работах [9; 10] сигналы биений УЗ времяпролетных накладных расходомеров могут быть описаны как амплитудно-модулированная сумма полезной составляющей и помеховых сигналов на фоне белого шума. Данные помеховые сигналы, как правило, вызваны прохождением УЗ волн по стенке трубопровода или по паразитным путям. При этом амплитуда полезной составляющей значительно превышает мощность шума и амплитуды паразитных сигналов.

Таким образом, сигналы биений УЗ накладного ЛЧМ расходомера могут быть описаны как:

$$\begin{aligned} s_1 &= A_1 \exp\{i[\omega(\tau_1)t + \theta(\tau_1)]\} + s_{par_{11}}(\tau_{21}) + s_{par_{12}}(\tau_{22}) + z_1(t); \\ s_2 &= A_2 \exp\{i[\omega(\tau_1 + \Delta\tau)t + \theta(\tau_1 + \Delta\tau)]\} + \\ &+ s_{par_{21}}(\tau_{21} + \Delta\tau_{21}) + s_{par_{22}}(\tau_{22}) + z_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tau_1, \Delta\tau$ – задержка и разность задержек полезных сигналов биений; $\tau_{21}, \Delta\tau_{21}$ – задержка и разность задержек паразитных сигналов биений в потоке; τ_{22} – задержка паразитных сигналов биений, прошедших по стенке; $s_{par_{11}}, s_{par_{21}}$ – суммарное влияние сигналоподобных помех типа паразитный сигнал, с изменяющейся задержкой; $s_{par_{21}}, s_{par_{21}}$ – суммарное влияние сигналоподобных помех типа паразитный сигнал с неизменяющейся задержкой; A_1, A_2 – амплитудные составляющие полезных сигналов, включающие амплитудную модуляцию; $z_1(t), z_2(t)$ – белый Гауссов шум.

При вычислении разности задержек $\Delta\tau$ сигналов вида (6) может быть проанализирована их функция, построенная так, чтобы влияние паразитных сигналов было максимально скомпенсировано. Такой эффект может быть достигнут при сопряженном произведении сигналов:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_2(t)s_1^*(t) = \\ &= A \exp\{i[\omega(\Delta\tau)t + \theta(\Delta\tau)]\} + s_{par}(t, \tau_2, \Delta\tau_2) + z(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $s(t)$ – анализируемая выборка для оценки $\Delta\tau$; $s_{par}(t, \tau_2, \Delta\tau_2)$ суммарное влияние паразитных сигналов; $z(t)$ – белый Гауссов шум.

При этом, в силу особенностей задачи:

$$|s(t)| \gg |z(t)|; \quad |s(t)| > |s_{par}(t, \tau_2, \Delta\tau_2)|. \quad (8)$$

Используя подход, предложенный в работе [11], дискретный сигнал типа (7) ($t = n/f_s$, где f_s – частота дискретизации) может быть представлен в следующем виде:

$$s(n) = A[1 + v(n)] \exp\{j(\omega(\Delta\tau)n + \theta(\Delta\tau))\}, \quad (9)$$

где ω – частота дискретного сигнала биений; $v(n)$ – комплексная функция вида:

$$v(n) = v_W(n) + v_{par}(n) = \frac{z(n) + s_{par}(n)}{A \exp\{j(\omega n + \theta)\}}, \quad (10)$$

где $v_W(n)$ составляющая $v(n)$ соответствующая белому Гауссовому шуму; $v_{par}(n)$ – составляющая $v(n)$ соответствующая вкладу паразитных сигналов.

Функция $1 + v(n)$ в выражении (9) является комплексной и может быть описана своим модулем и аргументом. Тогда сигнал (9) можно представить как:

$$s(n) = A|1 + v(n)| \exp\{j[\omega(\Delta\tau)n + \theta(\Delta\tau) + \arg[v(n) + 1]]\}. \quad (11)$$

В выражении (11) множитель $|1 + v(n)|$ включает влияние шума $z(n)$ и помех s_{par} на амплитуду сигнала, а слагаемое $\arg[v(n) + 1]$ влияние шума $z(n)$ и помех s_{par} на фазу сигнала. При высоких отношениях сигнал/шум и сигнал/помехи:

$$|1 + v(n)| \approx 1; \quad (12)$$

$$\arg[v(n) + 1] = \arctan \operatorname{Im}\{v(n)\} / [1 + \operatorname{Re}\{v(n)\}] \approx \operatorname{Im}\{v(n)\}.$$

где $\operatorname{Im}\{\square\}$, $\operatorname{Re}\{\square\}$ – операции получения мнимой и действительной частей комплексного значения.

С учетом (12) выражение (11) может быть представлено как

$$\begin{aligned} s(n) &= |s(n)| \exp \left\{ j \left[\omega(\Delta\tau)n + \theta(\Delta\tau) + \operatorname{Im}\{v(n)\} \right] \right\} = \\ &= |s(n)| \exp(j \arg s(n)). \end{aligned} \quad (13)$$

где $|s(n)|$ – амплитуда выборки, имеющая искажения, вызванные паразитной амплитудной модуляцией, и функцией $|1 + v(n)|$; $\arg s(n)$ – фаза сигнала, с учетом искажений, вызванных функцией $v(n)$.

В случае, если $v(n)$ поимущественно представляет собой шум, полная фаза сигнала может быть аппроксимирована при помощи прямой вида $\arg s(n) = an + b + \varepsilon$, где ε – белый шум. Класс оценок параметров сигналов, основанный на данном предположении является классом гладких центральных конечно-разностных оценок (ГЦКРО) [12]. Оценки данного класса являются статистически эффективными и несмещенными для модели моногармонического сигнала, однако их исследованию для случая модели (7) представляет научный и практический интерес.

Результаты экспериментального исследования

Основными алгоритмами, представляющими интерес для решения данной задачи в классе ГЦКРО, предложенными в литературе, в том числе нами, являются оценки задержек по начальной и по полной фазе вида:

$$\Delta\tau_{FMCW} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} W_{\tau}(n) |s(n)| \arg s(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} W_{\tau}^2(n) |s(n)|}; \quad [13]$$

$$\Delta\tau_{Tret} = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{1}{N} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \arg s(n); \quad [11] \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{FK} = \frac{1}{2\pi f_0} \Psi^{-1} \left(-\beta \left[\sum_{n=0}^{N-1} n |s(n)| \arg s(n) \right] + \eta \left[\sum_{n=0}^{N-1} |s(n)| \arg s(n) \right] \right); \quad [14]$$

$$\Delta\tau_{MAXCOR} = \arg \left\{ s_1(t) s_2^*(t) / \sqrt{s_1^2(t) s_2^2(t)} \right\}, \quad [15]$$

где $\Delta\tau_{FMCW}$ – соответствует оценке разности задержек сигналов биеений взвешенным методом наименьших квадратов, предложенным в

[13]; $\Delta\tau_{Tret}$ — соответствует оценке начальной фазы методом наименьших квадратов, предложенным в [11]; $\Delta\tau_{FK}$ — соответствует оценке начальной фазы взвешенным методом наименьших квадратов, с весом $|s(n)|$ предложенным в [14], где ; $\Delta\tau_{MAXCOR}$ — соответствует оценке полной фазы, рассмотренной в данном применении, например в [15].

Для исследования применимости алгоритмов (14) в ультразвуковых накладных ЛЧМ расходомерах было проведено экспериментальное исследование. На рис. 3 приведена схема расположения первичных преобразователей (ПП), использованная в проведенных экспериментах. Каждый из ПП попеременно выступает источником и приемником сигнала. Локационный путь сигнала включает прохождение через стенку трубопровода (1), контролируемую среду (2), отражение от противоположной стенки и обратный путь до принимающего ПП. Схема прохождения полезного сигнала обозначена на рис. 3 цифрой 3. Также принимаемый сигнал, имеет паразитную компоненту, соответствующую прямому прохождению от ПП1 до ПП2 в металлической стенке (направление обозначено цифрой 4). Помимо описанных выше путей прохождения волны от источника до приемника, имеются и другие источники паразитных сигналов, пример одного из которых, соответствует двойному отражению в среде и приведен на рисунке под цифрой 5.

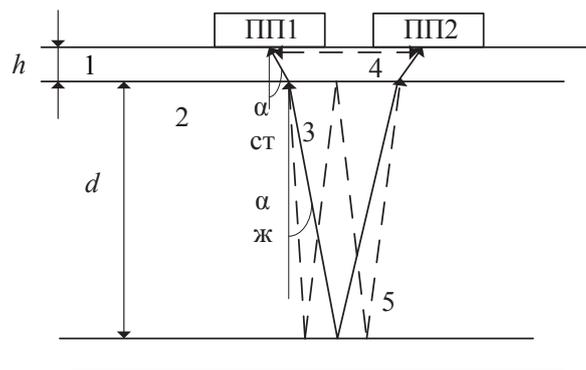


Рис. 3. Схема прохождения сигнала в эксперименте

Fig. 3. Scheme of signal propagation in the experiments

При анализе конфигураций расположения источников и приемников ультразвукового излучения использовано предположение о линейной модели распространения УЗ сигналов в трубопроводе. Правильность данного допущения подтверждена в работах [16].

Время прохождения УЗ волны через акустический тракт соответствующий используемой конфигурации первичных преобразователей (рис. 3) рассчитывалось следующим образом:

$$t_{u,d} = \frac{(1 + N_r)d}{(c_{ж} \pm v \sin \alpha_{ж}) \cos \alpha_{ж}} + \frac{2h}{c_{ст} \cos \alpha_{ст}} + 2\tau_{ПП}, \quad (15)$$

где N_r – количество переотражений от противоположной стенки трубопровода, для V конфигурации (рис. 3) $N_r = 1$; d – внутренний диаметр трубопровода; $c_{ж}$ – скорость звука в жидкости; $\alpha_{ж}$ – угол ввода УЗ колебаний в жидкость; h – толщина стенки трубопровода; $c_{ст}$ – скорость звуковой волны в стенке трубопровода; $\alpha_{ст}$ – угол ввода УЗ волны в стенку трубопровода; $\tau_{ПП}$ – собственное время задержки в приэме пьезопреобразователя.

Для проведения экспериментальных работ использована экспериментальная плата приемо-передающего канала СБРЛ с ЛЧМ, включающая аналоговые и цифровые блоки излучения и обработки сигнала. Блок-схема разработанной платы приведена на рис. 4.

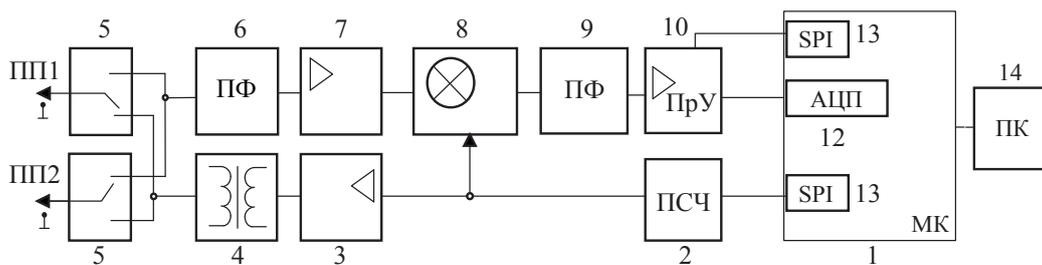


Рис. 4. Блок-схема приемо-передающего канала макетного образца использованного в экспериментах

Fig. 4. Block scheme of transmitter channel used in the experiments

Схема (см. рис. 4) работает следующим образом. Управление производится при помощи микроконтроллера (МК) обозначенного цифрой 1. Излучаемый сигнал формируется при помощи схемы прямого цифрового синтеза частоты (ПСЧ) 2. Выходной сигнал усиливается до напряжения питания при помощи усилителя 3 и через трансформатор 4 поступает на схему переключения пьезопреобразователей 5. Сигнал с трансформатора, через ключи, поступает на пьезопреобразователь сконфигурированный на излучение (ПП1 или ПП2). Также излучаемый сигнал поступает на вход смесителя 8 в качестве опорного. Принимаемый, задержанный сигнал проходит через полосовой фильтр (ПФ) промышленных частот 6, и поступает 7. Усиленный сигнал поступает на вход смесителя 8. Выходной сигнал смесителя имеет сигналы разностной, так и суммарной частот. Высокочастотная составляющая фильтруется полосовым фильтром 9. Усилитель с программируемым коэффициентом усиления (ПрУ) усиливает напряжение до опорного напряжения АЦП 12. Управление программируемым усилителем и ПСЧ осуществляется при помощи шины SPI 13. Оцифрованные данные обрабатываются на МК 1 и передаются на ПК 16 по протоколу стандарта RS-232.

Исследования разработанных алгоритмов проводились при помощи гидравлического контура, на котором помещались первичные ультразвуковые преобразователи (ПП). Блок схема используемого контура показана рис. 5.

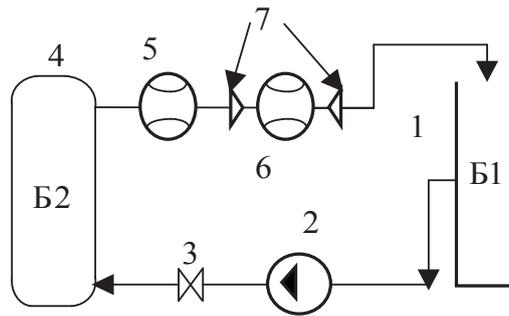


Рис. 5. Блок-схема используемого в экспериментах гидравлического контура

Fig. 5. Block scheme of hydraulic circuit used in the experiments

Блок-схема используемого гидравлического контура, приведенная на рис. 5, содержит резервуар с водой (1), насос (2), задвижку (3), демпферный бак (4), эталонный расходомер (5), рабочий участок (6), соединений при помощи соединяющих устройств (7), на котором помещен исследуемый макет (8). Задержка Δt задавалась путем регулирования расхода в гидравлическом контуре при помощи задвижки (3). Демпферный бак использовался для гашения пульсаций насоса (2). Величина заданной задержки контролировалась при помощи эталонного расходомера (5).

Исследования алгоритмов проводились путем использования сменных участков трубопровода из меди и из стали (7, см. рис. 5) различного диаметра. Использовался стальной трубопровод диаметром 100 мм (толщина стенки 2 мм) и медный трубопровод диаметром 32 мм (толщина стенки 3 мм). Стальной трубопровод являлся моделью сигнала с хорошо разрешаемыми полезной и паразитной составляющими, на фоне паразитной амплитудной модуляции. Медный участок трубопровода моделировал смесь полезного сигнала на фоне большого числа близкорасположенных паразитных сигналов (неразрешаемых) на фоне паразитной амплитудной модуляции.

На рис. 6 приведены виды сигналов биений и их спектры для образцов с разделяемыми (стальной трубопровод $d = 100$ мм) (а, б) и неразделяемыми (медный трубопровод $d = 32$ мм) (в, г) полезными и паразитными сигналами, полученные в экспериментах. Спектры показаны в области значений от 0 до половины частоты дискретизации.

Полученные в экспериментах сигналы, типичный вид которых показан на рис. 6, обрабатывались следующим образом:

- 1) проводится усечение выборки в начале и в конце, в результате которого убираются так называемые «зоны обращения» ЛЧМ сигналов;
- 2) выполнялась грубая оценка частоты сигнала методом поиска максимума пика в спектре, полученном методом БПФ;
- 3) осуществляется фильтрация выборки принятого сигнала и/или преобразование Гильбрета;

4) производится обрезка начальных и конечных значений выборки фильтрованного сигнала, операция связана с исключением зон, искаженных при фильтрации сигнала;

5) совершается операции вычисления искомой оценки.

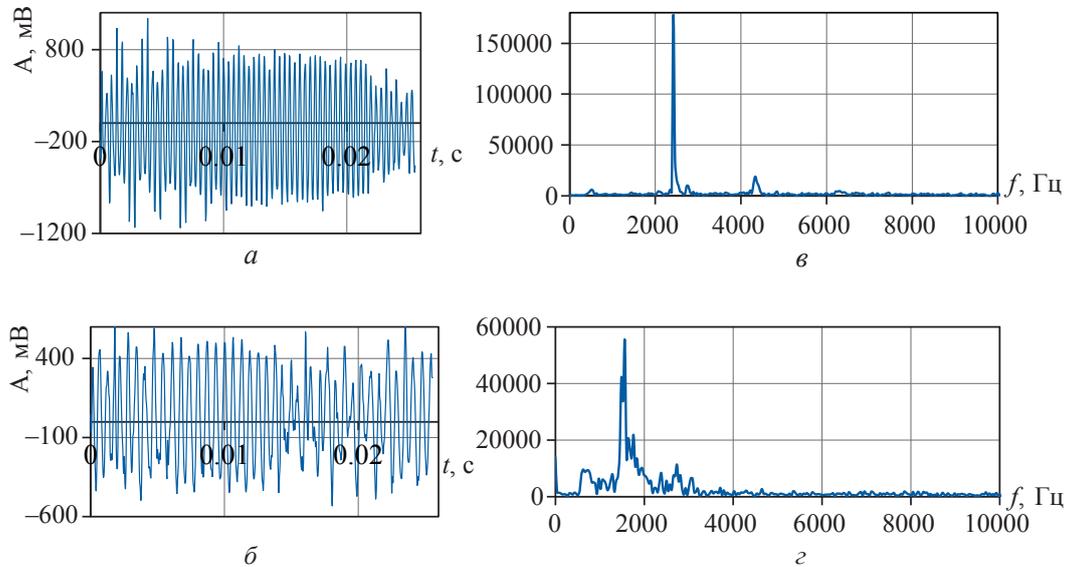


Рис. 6. Типичные сигналы биений и их спектры для образцов стальной трубопровод $d = 100$ мм (а, б) и медный трубопровод $d = 32$ мм (в, г).

Fig. 6. Typical beat signals and it spectrums for samples of steel conduit $d = 100$ mm (а, б) and for copper conduit $d = 32$ mm (в, г)

В предложенной реализации алгоритма фильтрация и преобразование гильберта реализуются в следующем виде:

$$s_c = \text{ifft} \{ \text{fft}(s_R) \cdot H \}, \quad (16)$$

где fft , ifft – операции прямого и обратного преобразований Фурье; s_c – выборка комплексных значений сигнала; s_R – выборка действительных значений сигнала; H – выборка фильтра вида:

$$H(f) = \begin{cases} 2, & f \in [f_L, f_H] \\ 0, & f < f_L, f > f_H \end{cases}, \quad (17)$$

где f_L и f_H – нижняя и верхняя частоты среза синтезируемого фильтра.

В проведенных экспериментах полученные сигналы анализировались как с двумя вариантами $[f_L, f_H]$ в функции (17): вариант без фильтрации, когда $f_L = 0$; $f_H = f_s/2$ и с фильтрацией, когда $f_L = f_{coarse} - 3/T_m$; $f_H = f_{coarse} + 3/T_m$, где f_{coarse} – предварительно полученная оценка частоты.

На рис. 7 а–в приведены графики зависимостей смещения результатов оценки изменений при помощи анализируемых алгоритмов измерений разности задержек ($\delta_{\Delta t}$, %) относительно заданного значения (Δt , нс) для стального трубопровода без проведения предварительной фильтрации (а), стального трубопровода с предварительной фильтрацией (б) и медного трубопровода с фильтрацией (в).

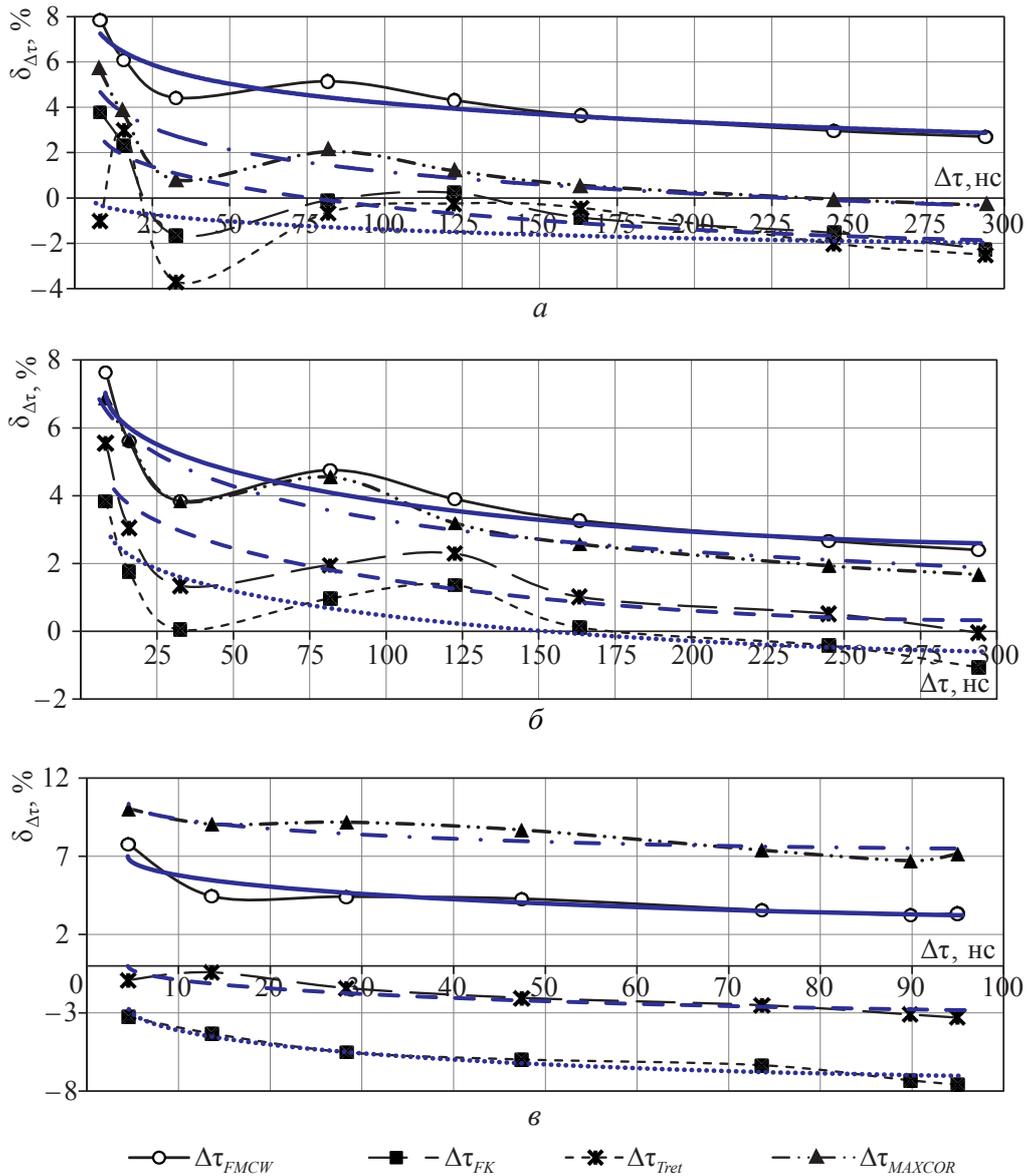


Рис. 7. Зависимости смещения результатов оценки изменений задержки, полученные при помощи анализируемых алгоритмов измерений разности задержек ($\delta_{\Delta\tau}$, %) относительно заданного значения ($\Delta\tau$, нс) для стального трубопровода без проведения предварительной фильтрации (а), стального трубопровода с предварительной фильтрацией (б) и медного трубопровода с предварительной фильтрацией (в)

Fig. 7. The relations of estimation biases of time delay difference, which obtained by the analyzed algorithms of time delay difference ($\delta_{\Delta\tau}$, %) to set value ($\Delta\tau$, ns) for steel conduit without preliminary filtration (a), for steel conduit with preliminary filtration (b) and for copper conduit with preliminary filtration (c)

Анализ результатов, приведенных на рис. 7, позволяет сделать вывод о преимуществах использования оценки $\Delta\tau_{FMCW}$ в задачах измерений расхода УЗ ЛЧМ накладными расходомерами. Смещение результатов $\Delta\tau_{FMCW}$ находится в диапазоне 8–2 %, что соответствует теоретически ожидаемому диапазону, связанному с влиянием поправочного гидрав-

лического коэффициента [17]. При этом для случая стального трубопровода смещение оценки $\Delta\tau_{FCW}$ для случаев с фильтрацией и без нее различается в среднем на 0.1 % в большей части исследованного диапазона расходов (и соответствующих им $\Delta\tau$). Алгоритм оценки *MAXCORR* может быть использованы при проведении предварительной фильтрации для случая хорошо согласованных ПП и стенки трубопровода (стальной трубопровод + фильтрация). Достоинством данного алгоритма по сравнению с $\Delta\tau_{FCW}$ является более низкая вычислительная сложность, однако в общем случае данный алгоритм обеспечивает большее смещение и требует более тщательного подбора параметров. Оценки $\Delta\tau_{Ret}$, $\Delta\tau_{FK}$ обеспечивают наибольшее смещение среди проанализированных алгоритмов во всех случаях.

Заключение

Проведен анализ особенностей обработки сигналов ультразвуковых расходомеров с линейно-частотно модулированным излучением. Показана возможность использования ЛЧМ сигналов и гетеродинной схемы приема в УЗ ЛЧМ накладных время-пролетных расходомерах. Для данного случая показана применимость модели сигнала биений, представляющего собой амплитудно-модулированную смесь полезной и паразитных составляющих на фоне белого Гауссова шума. Причем амплитуда полезной составляющей превышает мощность шума и помех.

Показано, что при измерениях расхода по разностям задержек в рамках рассмотренной модели в качестве информационного параметра может быть использована полная фаза сигналов биений (зависимость фазы сигнала от времени). Такой подход позволяет повысить точность за счет повышения информации соответствующей измерению по сравнению с традиционно-используемыми оценками по частоте сигналов биений. При этом предложено использование алгоритмов в классе гладких центральных конечно-разностных оценок для измерений. Данные алгоритмы имеют низкую вычислительную сложность и обеспечивают статистически эффективную оценку для модели моногармонического сигнала на фоне белого Гауссова шума.

Проведен анализ предложенных в литературе, в том числе нами, оценок в рассмотренном классе и их экспериментальное исследование в рамках поставленной задачи. Полученные результаты подтверждают эффективность рассмотренных методов измерения разностей задержек на практике. При этом показаны преимущества оценки $\Delta\tau_{FCW}$. Смещение измеренных результатов, полученные в ходе экспериментов, для данной оценки находятся в диапазоне от 2 до 8 %. Это соответствует теоретически ожидаемому диапазону, который связан с необходимостью введения поправочного гидравлического коэффи-

циента, калибровка которого не была проведена в силу отсутствия технической возможности.

Результаты проведенной работы доказывают эффективность использования рассмотренной модели сигналов и методов оценки их параметров в задачах измерений расхода при помощи ультразвуковых накладных ЛЧМ расходомеров. Также следует отметить, что рассмотренные методы позволяют быть реализованными на базе современных микроконтроллеров.

Список литературы

1. Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количества веществ*. Кн. 2. СПб.: Политехника; 2004.
2. Bernard C.J. *Handbook of flow measurements*. London: Trade and Technical Press; 1988.
3. Хансуваров К.И. Цейтлин В.Г. *Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара*. М.: Изд. Стандартов; 1990.
4. Lynnworth L.C., Liu Yi. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonic*. 2006;44:e1371–e1378. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.046.
5. Катус Г.П. *Системы автоматического контроля полей скоростей и расходов*. М.: Наука; 1965.
6. Conrad K., Lynworth L.C. *Fundamentals of ultrasonic flow meters*. *Parameters*; 2002, pp. 52–61.
7. Сколник М.И. (ред.) *Справочник по радиолокации*. Кн. 1. М.: Техносфера; 2014.
8. Винницкий А.С. *Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн*. М.: Советское радио; 1961.
9. Kalmykov A.A., Ronkin M.V. Comparison of delay measurement algorithms for the ultrasonic flow meters. In: *26th Int. Crimean Conference “Micro-wave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2016)*. 2016, pp. 2330–2336.
10. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. A FMCW – Interferometry approach for ultrasonic flow meters. In: *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Ekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018, pp. 237–240. DOI: 10.1109/USBREIT.2018.8384593
11. Tretter S.A. Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression (Corresp.). *IEEE Transactions on Information Theory*. 1985;31(6):832–835. DOI: 10.1109/TIT.1985.1057115.
12. Lovell B.C., Williamson R.C. Statistical performance of some instantaneous frequency estimators. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1992;40(7):1708–1723.
13. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Investigation of the time delay difference estimator for FMCW signals. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2 2017)*. 2017, pp. 90–99. Available at: <http://reit-rtf.ru/2017b.html>

14. Fu P., Kam P.Y. ML Estimation of the Frequency and Phase in Noise. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06, San Francisco, CA, USA, 27 November – 1 December 2006*. DOI: 10.1109/GLOCOM.2006.581

15. Lio Y.Z., Zhao B. Phase-shift correlation method for accurate phase difference estimation in range finder. *Application Optic*. 2015;54(11):3470–3477. DOI: 10.1364/AO.54.003470

16. Бражников Н.И., Белевитин В.А., Бражников А.И. *Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов*. М.: Теплотехника; 2008.

17. Биргер Г.И., Бражников Н.И. *Ультразвуковые расходомеры*. М.: Металлургия; 1964.

References

1. Kremlevskii P.P. *Handbook of flow meters and flow measurements*. Book 2. St.Petersburg: Politekhnik; 2004. (In Russ.)

2. Bernard C.J. *Handbook of flow measurements*. London: Trade and Technical Press; 1988.

3. Khansuvarov K.I. Tseitlin V.G. *Techniques for measuring pressure, flow rate and level of liquid, gas and steam*. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1990. (In Russ.)

4. Lynnworth L.C., Liu Yi. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonic*. 2006;44:e1371–e1378. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.046.

5. Katys G.P. *Systems of automatic control of speed fields and flow rates*. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)

6. Conrad K., Lynworth L.C. *Fundamentals of ultrasonic flow meters*. Panametrics; 2002, pp. 52–61.

7. Skolnik M.I. (ed.) *Radars handbook*. Book 1. Moscow: Tekhnosfera; 2014. (In Russ.)

8. Vinnitskii A.S. *Basics of radars with continuous waves*. Moscow: Sovetskoe radio; 1961. (In Russ.)

9. Kalmykov A.A., Ronkin M.V. Comparison of delay measurement algorithms for the ultrasonic flow meters. In: *26rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2016)*. 2016, pp. 2330–2336.

10. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. A FMCW – Interferometry approach for ultrasonic flow meters. In: *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Ekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018, pp. 237–240. DOI: 10.1109/USBREIT.2018.8384593

11. Tretter S.A. Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression (Corresp.). *IEEE Transactions on Information Theory*. 1985;31(6):832–835. DOI: 10.1109/TIT.1985.1057115.

12. Lovell B.C., Williamson R.C. Statistical performance of some instantaneous frequency estimators. *IEEE Transactions on Signal Processing*.

1992;40(7):1708–1723.

13. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Investigation of the time delay difference estimator for FMCW signals. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2 2017)*. 2017, pp. 90–99. Available at: <http://reit-rtf.ru/2017b.html>

14. Fu P., Kam P.Y. ML Estimation of the Frequency and Phase in Noise. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06, San Francisco, CA, USA, 27 November – 1 December 2006*. DOI: 10.1109/GLOCOM.2006.581

15. Lio Y.Z., Zhao B. Phase-shift correlation method for accurate phase difference estimation in range finder. *Application Optic*. 2015;54(11):3470–3477. DOI: 10.1364/AO.54.003470

16. Brazhnikov N.I., Belevitin V.A., Brazhnikov A.I. *Ultrasonic control and regularization in industry*. Moscow: Teplotekhnika; 2008. (In Russ.)

17. Birger G.I., Brazhnikov N.I. *Ultrasonic flow meters*. Moscow: Metallurgiya; 1964. (In Russ.)

Информация об авторах

Ронкин Михаил Владимирович – окончил физико-технический факультет Уральского федерального университета в 2011 г. С 2013 г. работает в Уральском федеральном университете в институте радиоэлектроники и информационных технологий, в том числе в должности старшего преподавателя с 2018 г. Автор более 20 статей и ряда патентов. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Калмыков Алексей Андреевич – профессор, доцент, кандидат технических наук, автор более чем 60 патентов, и большого количества статей в области локации, навигации и приборостроения. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Information about the authors

Mikhail V. Ronkin – Graduated the physical-technical faculty of URFU in 2011. From 2013 works in Ural Federal University in the institute of radio-electronics and IT (including a senior lecturer from 2018). Author of more than 20 publications and a number of patents. Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Alexey A. Kalmykov – Professor, Associate Professor, Ph.D., author of more than 60 patents, and a large number of articles in the field of location, navigation and instrument making. Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила / Received: 10.11.2018

Принята в печать / Accepted: 28.12.2018