

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



РОНКИН Михаил Владимирович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ В ЛОКАЦИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИ-  
ТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатизация и связь)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в учебно-научном центре «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,  
**Калмыков Алексей Андреевич**

Официальные оппоненты: **Смольский Сергей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов;

**Сызранцев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»;

**Костоусов Виктор Борисович**, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий отделом прикладных проблем управления;

Защита диссертации состоится «16» июня 2020 г. в 11:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.07.18 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1226>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Локационные информационно-измерительные системы (ЛИИС) находят широкое применение в промышленности, например, в датчиках измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах (расходомерии), в датчиках измерения уровня жидкости в баках (уровнемерии), при контроле дыхания человека и др. Для получения информации в ЛИИС, как правило, используют волны различной физической природы (акустические, электромагнитные, оптические) с различными параметрами, в том числе, с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

При использовании ЛЧМ сигналов в ЛИИС для извлечения информации об исследуемом объекте анализируют т.н. сигнал биений, представляющий собой квадратуры низкочастотной составляющей результата перемножения излучаемой и принимаемой волн:

$$s(t) = A(\omega_{AM}) \exp\{j(\omega(\tau)t + \theta(\tau))\} + s_{par}(t) + z(t), \quad (1)$$

где  $\tau$  – информационный параметр (время между моментом излучения и приема волны, прошедшей путь от точки излучения до контролируемого объекта и обратно, которая зависит от расстояния до объекта и среды распространения, далее время задержки);  $s(t)$  – сигнал подлежащий обработке;  $A(\omega_{AM})$  – амплитуда сигнала с учетом паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) – мультипликативные помехи;  $s_{par}(t)$  – влияние паразитных сигналов и помех – аддитивные помехи;  $z(t)$  – аддитивный белый Гауссов шум;  $\omega(\tau) = 2\pi\Delta f\tau/T_m$  – частота сигнала;  $\theta(\tau) \cong 2\pi f_0\tau$  – начальная фаза сигнала;  $f_0$  – начальная частота;  $\Delta f$  – девиация частоты;  $T_m$  – период модуляции.

Из (1) видно, что задача обработка первичной информации в ЛИИС с ЛЧМ сводится к определению времени задержки ( $\tau$ ) по измеренным значениям сигнала  $s(t)$ , представляющего собой амплитудно-модулированную суперпозицию полезного сигнала и сигналоподобных помеховых составляющих и шумов, энергия которых оказывается меньше энергии полезного сигнала. Также следует отметить, что на практике требуется обеспечить измерения  $\tau$  с точностью до сотых долей процента.

### Степень разработанности темы

Методы обработки сигнала (1) в ЛИИС и их применение исследовались в работах как зарубежных, так и отечественных ученых D. Brumbi, G.L. Charvat, S.A.Tretter, S. Kay, M. Fitz, P. Stoica, S.L. Marple, A.A. Харкевич, A.C. Веницкий, И.В. Комаров, С.М. Смольский, В.В. Езерский, В.С. Паршина, В.Я. Носкова, А.А. Калмыков и др.

В работах упомянутых выше и других ученых, для измерения времен задержки и соответствующих им параметров были разработаны методы и соответствующие им алгоритмы, основанные на оценке частоты сигналов  $s(t)$  в спектральной области, а также методы основанные на измерении начальной фазы  $s(t)$ . Также известны методы оценки начальной фазы и частоты сигналов, основанные на аппроксимации зависимостей аргументов комплексной функции сигнала (полной фазы сигнала) от времени, которые имеют низкую вычислительную сложность и соответственно низкие требования к оперативной памяти вычислителя и обеспечивают получение статистически состоятельных оценок параметров сигнала  $s(t)$ . Од-

нако, данные методы оказываются работоспособными только для смеси гармонического сигнала и аддитивного белого гауссового шума. При наличии в сигнале мультипликативных и аддитивных сигналподобных помех данные методы не могут обеспечить требуемой точности измерения времени задержки  $\tau$ . Таким образом, разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих требуемую точность измерения параметров информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ, является актуальной. Потенциально решить данную задачу можно если разработать методы оценки времен задержки, основанные на совместном использовании информации о начальной фазе и частоте, оцениваемой по зависимости мгновенной фазы сигнала  $s(t)$  от времени.

**Цель работы** состоит в обосновании и исследовании методов обработки сигналов ЛИИС с ЛЧМ, представляющих смесь информационного сигнала и мультипликативных, аддитивных сигналподобных помех и шумов.

**Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:**

1. Анализ современного состояния и методов обработки сигналов биений в ЛИИС с ЛЧМ.
2. Разработка и исследование метода измерения разностей времен задержки между информационными сигналами в ЛИИС с ЛЧМ, основанного на совместном использовании значений частоты и начальной фазы произведения сигналов биений.
3. Разработка и исследование метода измерения времени задержки между моментом излучения и приема информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ, основанного на анализе зависимости фазы автокорреляционной функции сигнала биений от времени.
4. Разработка вычислительных алгоритмов, реализующих предложенные методы.
5. Экспериментальная проверка разработанных алгоритмов и исследование особенностей их применения в задачах ультразвуковой расходомерии.

**Объект исследования** – локационные информационно-измерительные системы с линейно-частотно модулированными сигналами.

**Предмет исследования** – методы и алгоритмы обработки информации, используемые в локационных информационно-измерительных системах с линейно-частотно модулированными сигналами.

**Методология и методы исследования.** В процессе выполнения работы были использованы: компьютерное моделирование; цифровая обработка сигналов; теория статистических оценок; численные методы; линейная алгебра; методы экспериментального исследования сигналов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенный метод измерения разности времен задержки информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ, основанный на аппроксимации зависимости фазы сигналов биений  $s(t)$  от времени взвешенным методом наименьших квадратов, обеспечивает асимптотически эффективную оценку со случайным разбросом и смещением в несколько раз ниже, в сравнении с методами, основанными на отдельном использовании значений начальной фазы и частоте сигнала биений  $s(t)$ .

2. Вычислительная сложность алгоритма, реализующего предложенный метод измерения времени задержки информационного сигнала в ЛИИС с ЛЧМ более чем на два порядка ниже, чем вычислительной сложности традиционно используемых алгоритмов при одинаковых требованиях к точности.

3. Алгоритм вычисления разности времен задержки информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ, разработанный в соответствии с предложенным методом по п. 1, обеспечивает однозначное измерение значений разностей времен задержки за пределами диапазона однозначного определения значений начальной фазы сигналов биений.

**Научная новизна результатов заключается в следующем:**

1. Разработан научно обоснованный метод обработки информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ для измерения разности времен задержки, основанный на использовании аппроксимации зависимости фазы сигналов биений от времени с помощью взвешенного метода наименьших квадратов.

2. Разработан научно обоснованный метод обработки информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ для измерения времени задержки, основанный на использовании аппроксимации зависимости фазы автокорреляционной функции сигналов биений от времени с помощью взвешенного метода наименьших квадратов.

3. Разработаны вычислительные алгоритмы измерения времен задержки и разностей времен задержки информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ.

**Теоретическая значимость работы** заключается в обосновании новых методов и реализующих их алгоритмов обработки информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанные методы позволяют повысить точность обработки информации в ЛИИС с ЛЧМ, созданные программные реализации разработанных вычислительных алгоритмов ориентированы на использование в современных микроконтроллерах.

**Достоверность защищаемых положений** и результатов обеспечивается непротиворечивостью выводов теории обработки локационных сигналов и результатам, полученным упомянутыми выше авторами; качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, использованием аттестованной измерительной аппаратуры и подтверждается успешным практическим использованием в реализованных устройствах и системах. Полученные результаты теоретического анализа проверялись на сходимость с результатами предшествующих исследований. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях, а также публикациями в рецензируемых журналах.

**Апробация результатов.** Основные научные и практические результаты по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» 2014, 2015 и 2016; 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2 2017), 2017; IEEE 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2018); Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 4 2018), 2018; 4-th International Conference on Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2018); IEEE 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2019).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе: 12 работ опубликовано в журналах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, 10 из которых проиндексированы международной базой цитирования Scopus; получено три патента РФ на изобретение и один – полезную модель.

**Внедрение научных результатов.** Результаты научных исследований использованы в ООО «Институт информационных датчиков и технологий» (г. Екатеринбург, акт об использовании результатов от 27.01.2020); АО «Научно-производственный комплекс «ВИП» (г. Екатеринбург, акт об использовании результатов от 21.11.2019), АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова» (акт о внедрение № 10.107 от 05.02.20, г. Екатеринбург); а также в учебном процессе Департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий-РтФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (акт об использовании результатов от 03.02.2020).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня основных сокращений, списка условных обозначений, перечня основных терминов и определений, списка литературы из 112 наименований, 4 приложений, содержит 34 рисунка и 6 таблиц. Основной текст составляет работы составляет 119 страниц, общий объем – 127 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** проведен анализ современных методов обработки информационных сигналов, использованных в ЛИИС с ЛЧМ, результаты которого показали, что существующие методы измерения, основанные на измерении значений частоты и фазы, не обеспечивают требуемой точности измерения времен задержек и их разностей в ряде случаев (например, в ультразвуковой расходомерии, спирометрии, измерении малых изменений уровня жидкостей в баках). Сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** обоснован метод измерения разностей времен задержек между информационными сигналами ЛИИС с ЛЧМ, основанный на совместном использовании значений частоты и начальной фазы произведения их сигналов биений:

$$s(n) = s_2(n)s_1^*(n) = A(\omega_{AM}) \exp\{j(W_\tau(n)\Delta\tau)\} + z(n) + s_{21par}, \quad (2)$$

где  $s_2(n)$ ,  $s_1(n)$  – оцифрованные выборки сигналов биений вида (1);  $\Delta\tau$  – измеряемая разность времен задержек;  $s_{21par}$  – компонента, описывающая суммарное влияние помех;  $f_s$  – частота дискретизации;  $W_\tau(n)$  – вектор весовых коэффициентов:

$$W_\tau(n) = 2\pi[\Delta f/N n + f_0].$$

В соответствие с данным методом оценка разности времен задержек  $\Delta\hat{\tau}$  вычисляется как:

$$\Delta\hat{\tau}_\tau = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} W_\tau(n)|s(n)| \arg s(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} W_\tau^2(n)|s(n)|}. \quad (3)$$

Выражение (3) обеспечивает получение однозначной оценки  $\Delta\hat{\tau}$ , если  $\Delta\tau \in [0, 1/2f_0)$ .

Получено выражение для оценки дисперсии значений  $\Delta\hat{\tau}$ :

$$\text{var}\{\Delta\hat{\tau}\} \cong \text{SNR}^{-1}/4\pi^2 N(f_0 + \Delta f/2)^2, \quad (4)$$

где  $\text{var}\{\Delta\hat{\tau}\}$  – дисперсия оценок  $\Delta\hat{\tau}$  по (3);  $\text{SNR}$  – отношение сигнал-шум (ОСШ).

Показано, что дисперсия (4) соответствует границе Крамера–Рао (ГКР) оценок времен задержек для сигнала (2) как функции параметра  $\Delta\tau$ . А также получены выражения, связывающие ГКР оценок  $\Delta\tau$ , для сигнала (2), и по значениям начальной фазы и частоты отдельно:

$$\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau} \approx \frac{f_0^2}{12(f_0 + \Delta f/2)^2} \text{ГКР}_{\Delta\tau_\theta} \approx \frac{\Delta f^2}{12(f_0 + \Delta f/2)^2} \text{ГКР}_{\Delta\tau_\omega}, \quad (5)$$

где  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau}$ ,  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\theta}$  и  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\omega}$  – ГКР оценок  $\Delta\tau$  для сигнала (2) и по значениям начальной фазы и частоты соответственно.

Положив в (5)  $f_0 = 2\Delta f$  (что соответствует ЛИИС с ЛЧМ, используемых в ультразвуковой расходомерии), получаем  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\theta} \approx 19\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau}$  и  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\omega} = 75\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau}$ , положив в (5)  $f_0 = 10\Delta f$  (что соответствует ЛИИС с ЛЧМ, используемых в радиоволновой уровнемерии), получаем  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\theta} \approx 13\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau}$  и  $\text{ГКР}_{\Delta\tau_\omega} \approx 1300\text{ГКР}_{\Delta\tau_\tau}$ . Таким образом ГКР оценок времен задержек в предложенном методе оказывается ниже в десятки – сотни раз ГКР оценок известных методов, основанных на использовании отдельно измеряемых значений частоте и начальной фазе.

Получено аналитическое выражение для вычисления смещения оценки разности времен задержек в соответствие (3) при влиянии сигналоподобных помех типа паразитный сигнал:

$$\delta_{\Delta\tau_\tau} \cong 2 \frac{A_2}{A_1} \Delta\tau_{21} \frac{\sin 2\pi f_0 \tau_{21}}{2\pi(f_0 + \Delta f/2)\tau_{21}}, \quad (6)$$

где  $\delta_{\Delta\tau_\tau} = \Delta\tau - \Delta\hat{\tau}$  – смещение результатов оценки разности времен задержек, полученного методом (3);  $\tau_{21} = \tau_2 - \tau_1$ ;  $\Delta\tau_{21} = \Delta\tau_2 - \Delta\tau_1$ , где  $\tau_1, \Delta\tau_1$  – времена задержек первого полезного сигнала и разность времен задержек первого и второго полезных сигналов;  $\tau_2, \Delta\tau_2$  времена задержек первого паразитного сигнала и разность времен задержек первого и второго паразитных сигналов.

Также получены выражения связывающие величины смещений оценки  $\Delta\tau$ , вычисленных в соответствии с (3) и оценок  $\Delta\tau$ , вычисленных по начальной фазе и по частоте сигналов биений, которые получены при помощи аппроксимации зависимости фазы от времени методом наименьших квадратов:

$$\delta_{\Delta\tau_\tau} \cong \frac{f_0 \Delta f}{2[f_0 + \Delta f][f_0 + \Delta f/2]} \delta_{\Delta\tau_\theta} \cong \frac{\Delta f^2}{3[f_0 + \Delta f][f_0 + \Delta f/2]} \delta_{\Delta\tau_\omega}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\Delta\tau_\theta}$  и  $\delta_{\Delta\tau_\omega}$  – смещения оценок разности времен задержек, полученные при помощи оценок начальной фазы и частоты сигналов биений, соответственно.

Положив в (7), что  $\Delta f = 0,5f_0$  (что соответствует ЛИИС с ЛЧМ, используемых в ультразвуковой расходомерии), получаем  $\delta_{\Delta\tau_\tau} \approx \delta_{\Delta\tau_\theta}/3,5 \approx \delta_{\Delta\tau_\omega}/21$ ; положив в (7)  $\Delta f = 0,1f_0$  (что соответствует ЛИИС с ЛЧМ, используемых в радиоволновой уровнемерии), получаем  $\delta_{\Delta\tau_\tau} \approx \delta_{\Delta\tau_\theta}/20 \approx \delta_{\Delta\tau_\omega}/300$ . Таким образом величина смещения оценок  $\Delta\tau$  в предложенном методе оказывается на один – два порядка

ниже величин смещений оценок, полученных известными методами, основанными на использовании отдельно измеряемых значений частоты и начальной фазы.

Для оценки зависимости СКО оценки (3) от ОСШ и отношения сигнал-помеха (ОСП) проведено численное моделирование, результаты которого позволили проанализировать изучаемые зависимости, примеры которых представлены на рисунке 1: а) для аддитивной смеси гармонического сигнала и белого гауссова шума (БГШ), б) зависимости минимального ОСП от ОСШ для смеси гармонического сигнала, сигналоподобной помехи и белого гауссова шума.

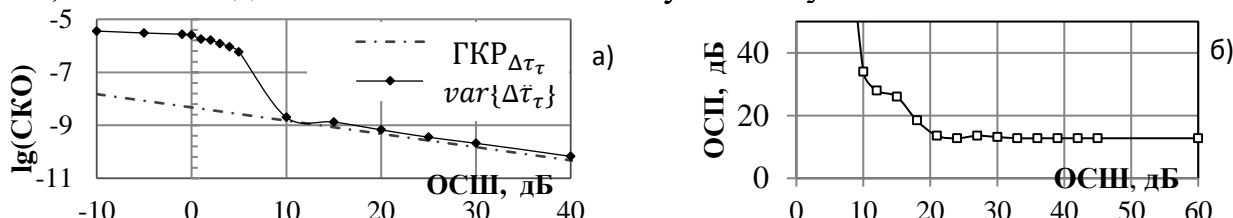


Рисунок 1. Типичные зависимости СКО оценки (3) в логарифмическом масштабе ( $\lg(\text{СКО})$ ) от ОСШ (дБ) для аддитивной смеси гармонического сигнала и БГШ (а) и зависимости минимально необходимого ОСП от ОСШ (б). Моделирование производилось при  $f_0 = 100$ ,  $\Delta f = 50$ ,  $T_m = 0,0512$ ,  $f_s = 10^4$ ,  $\tau_1 = 1$ ,  $\tau_{12} = 0,1$ ,

$$\Delta\tau_1 = 10^{-3}, \Delta\tau_{12} = 0,02\Delta\tau_1$$

Из рисунка 1а следует, что дисперсия метода (3) сходится к ГКР при превышении порогового значения ОСШ, равного 6 дБ. Из рисунка 1б видно, что при наличии сигналоподобных помех требуемое ОСП составляет 12 дБ, при этом ОСШ должно быть порядка 15 дБ.

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать обоснованные выводы о том, что оценка  $\Delta\hat{t}$  в соответствии с (3) является состоятельной, несмещенной и асимптотически эффективной с дисперсией, достигающей границу Крамера-Рао (4).

**В третьей главе** обоснован метод измерения времен задержек информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ, основанный на анализе зависимости фазы автокорреляционной функции дискретного сигнала (1) от времени:

$$R(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k)s^*(n-k) = |R(n)| \exp(j \arg R(n)), \quad (8)$$

где  $\arg R(n)$  – фаза автокорреляционной функции.

Соответствующая данному методу оценка значений частоты сигнала (1) в отсчетах вычисляется по формуле:

$$\hat{\omega}_{|R|} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} n |R(n)| \sum_{k=1}^n \arg\{R(k) \cdot R^*(k-1)\}}{\sum_{n=1}^{N-1} n^2 |R(n)|}.$$

Оценка времени задержки информационного сигнала ЛИИС с ЛЧМ, соответствующая  $\hat{\omega}_{|R|}$  вычисляется как:

$$\hat{t}_\omega = \frac{T_m f_s \sum_{n=1}^{N-1} n |R(n)| \sum_{k=1}^n \arg\{R(k) \cdot R^*(k-1)\}}{\Delta f 2\pi \sum_{n=1}^{N-1} n^2 |R(n)|}. \quad (9)$$

где индекс  $\omega$  указывает на то, что величина времени задержки вычислена с помощью оценки значения частоты сигнала (1). Следует отметить, что разработанный метод позволяет проводить оценки значений времен задержек информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ, соответствующих области значений частот сигналов биений от нуля до половины частоты дискретизации.



Для оценки зависимости СКО оценки  $\hat{\omega}_{|R|}$  от ОСШ и ОСП проведено численное моделирование, результаты которого позволили проанализировать изучаемые зависимости, примеры которых представлены на рисунке 2: а) для аддитивной смеси гармонического сигнала и белого гауссова шума, б) зависимости минимального ОСП от ОСШ для смеси гармонического сигнала, сигналоподобной помехи и белого гауссова шума.

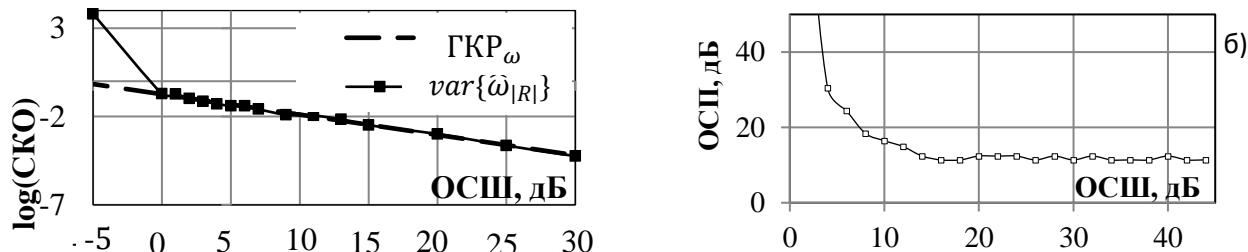


Рисунок 2. Типичные зависимости СКО оценки (9) в логарифмическом масштабе ( $\lg(\text{СКО})$ ) от ОСШ (дБ) для  $\hat{\omega}_{|R|}$  ( $\text{var}\{\hat{\omega}_{|R|}\}$ ) и ГКР оценок частоты ( $\text{ГКР}_\omega \cong 6\text{SNR}^{-1}/N^3$ ) для аддитивной смеси гармонического сигнала и БГШ (а) и зависимости минимально необходимого ОСП при ОСШ (б). Моделирование производилось при  $f_0 = 100$ ,  $\Delta f = 50$ ,  $T_m = 0,0512$ ,  $f_s = 10^4$ ,  $\omega_1 = 976$ ;  $\omega_{12} = 0,012\omega_1$ .

Из рисунка 2а следует, что дисперсия разработанного метода сходится к ГКР при превышении порогового значения ОСШ, равного 0 дБ. Из рисунка 1б видно, что при наличии сигналоподобных помех требуемое ОСП составляет 12 дБ, при этом ОСШ должно быть порядка 10 дБ. Таким образом, представленные результаты позволяют сделать обоснованные выводы о том, что оценка  $\hat{t}_\omega$  в соответствии с (9) является состоятельной, несмещенной и асимптотически эффективной с дисперсией, достигающей ГКР.

**В четвертой главе** исследованы вычислительные алгоритмы, реализующие разработанные методы вычисления времен задержек, в соответствии с (9) и разностей времен задержек в соответствии с (3).

Разработан алгоритм вычисления времен задержек в соответствии с (9) (далее алгоритм №1), псевдокод которого представлена на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что предложенный алгоритм реализуется следующей последовательностью действий:

- 1) получение выборки сигналов биений  $s(n)$ ;
- 2) дополнение выборки  $s(n)$  нулями до объема  $2N$ ;
- 3) вычисление отсчетов автокорреляционной функции объемом  $2N$ :

$$R'(n) = \text{ОБПФ}((\text{БПФ}[s(n)])^2),$$

где ОБПФ и БПФ – операторы прямого и обратного быстрых преобразований Фурье (БПФ) по выборке;

- 4) выделение выборки отсчетов объемом  $N$ :

$$R(n) = R'(n)[0:N),$$

где  $[0:N)$  – операция выделения отсчетов от 0 до  $N - 1$ ;

- 5) вычисление значений:

$$|R(n)| \text{ и } \arg R(n) \cdot R^*(n-1) = \text{arctan} \left( \frac{\text{Im}\{R(n) \cdot R^*(n-1)\}}{\text{Re}\{R(n) \cdot R^*(n-1)\}} \right);$$

- 6) вычисление накопленных сумм значений  $num$  и  $denum$ ;  
 7) вычисление частоты отсчетов сигнала биений:

$$\hat{\omega}_{|R|} = num/denum;$$

- 8) вычисление времени задержки:

$$\hat{\tau}_{\omega} = T_m f_s \omega / 2\pi \Delta f.$$

---

### Алгоритм №1

---

**Назначение:** оценка времени задержки  $\tau_{\omega}$  по (9)

**Вход:**  $s(n)$  – Сигнал биений ЛИИС с ЛЧМ

$f_0, f_s, N, T_m, \Delta f$  – Параметры ЛЧМ сигнала

**Выход:**  $\hat{\tau}_{\omega}$

**Шаги:**

Дополнение  $s(n)$  нулями до объема  $2N$

$R(n) = \text{ОБПФ}((\text{БПФ}[s(n)])^2)$

$sumArg = 0; num = 0; denum = 0$

**Цикл по  $n$  от 1 до  $N - 1$  с шагом 1:**

$sumArg = sumArg + \arg(R[n] \cdot R^*[n - 1])$

$num = num + |R[n]| \cdot n^2$

$denum = denum + |R[n]| \cdot n \cdot sumArg$

**Конец цикла**

$\hat{\omega}_{|R|} = num/denum$  – частота  $s(n)$  в отсчетах

$\hat{\tau}_{\omega} = f_s \cdot T_m \cdot \hat{\omega}_{|R|} / (2 \cdot \pi \cdot \Delta f)$

---

Рисунок 3. Псевдокод алгоритма измерения времени задержки

Получена формула для оценки вычислительной сложности обсуждаемого алгоритма, которая, при использовании алгоритма Ремиза для вычисления значений арктангенса, имеет следующие выражение:

$$O(\tau_{\omega}) \cong O(N[30 + 8\log_2 N]). \quad (10)$$

где  $O(\tau_{\omega})$  – порядок вычислительной сложности оценки  $\tau$  при помощи алгоритма на рисунке 7. Отметим, что для выполнения данного алгоритма в микроконтроллере требуется  $16N$  байт оперативной памяти при использовании 4 байтного формата значений с плавающей запятой (float32).

Проведено сравнение вычислительной сложности алгоритма №1 и традиционного используемого алгоритма оценки времени задержки по частоте сигнала биений, оцениваемой по максимуму амплитудного спектра, полученного при помощи БПФ (далее БПФ $_{\omega}$ ). Формально вычислительная сложность БПФ $_f$  составляет:

$$O(\text{БПФ}_{\omega}) \cong N_{\text{БПФ}} \log_2 N_{\text{БПФ}}, \quad (11)$$

однако, при этом БПФ $_f$  будет иметь систематическую ошибку, связанную с дискретностью спектра, которая может быть вычислена как:

$$\delta_{\tau_{\text{БПФ}}} = N / \Delta f N_{\text{БПФ}}, \quad (12)$$

где  $\delta_{\tau_{\text{БПФ}}}$  - систематическая ошибка оценки времени задержки информационного сигнала ЛИИС с ЛЧМ, определенная методом БПФ $_{\omega}$ .

В ЛИИС с ЛЧМ как правило используются объемы выборок сигналов  $N = 10^2 \dots 10^4$  точек, при этом в случае, когда  $N_{\text{БПФ}} = N$  величина  $\delta_{\tau_{\text{БПФ}}}$  не удовле-

творят требованиям, предъявляемым к точность данных систем. Для снижения величины  $\delta_{\tau_{\text{БПФ}}}$ , как правило, используется расширение обрабатываемой выборки добавлением нулей до объема  $N_{\text{БПФ}}$  в диапазоне от  $2^{14}$  до  $2^{20}$ . При этом вычислительная сложность алгоритма №1 становится на один – три порядка ниже, чем для БПФ $_{\omega}$  при аналогичных требования к точности. Так, например, для выборки из 512 точек выполнение оценки  $\hat{t}_{\omega}$  потребует порядка 52 000 операций сложения и умножения, а также 8 кБайт оперативной памяти.

Разработан алгоритм вычисления разностей времен задержек в соответствие с (3) (далее алгоритм №2), псевдокод которого представлена на рисунке 4.

---

### Алгоритм №2

---

**Назначение:** оценка разности времен задержек  $\Delta\tau_{\tau}$  по (3)

**Вход:**  $s_1(n), s_2(n)$  – Сигналы биений ЛИИС с ЛЧМ;

$f_0, f_s, N, T_m, \Delta f$  – Параметры ЛЧМ сигнала;

**Выход:**  $\Delta\hat{t}_{\tau}$

**Шаги:**

$\hat{t}_{\omega 2} = \text{Алогритм } \text{№1}(s_2(n), f_0, f_s, N, T_m, \Delta f)$

$\hat{t}_{\omega 1} = \text{Алогритм } \text{№1}(s_1(n), f_0, f_s, N, T_m, \Delta f)$

$\Delta\tau_{max} = f_0/3$

$\Delta\tau_{int} = \text{int}((\hat{t}_{\omega 2} - \hat{t}_{\omega 1})/\Delta\tau_{max})\Delta\tau_{max}$

$sumArg = 0; num = 0; denum = 0$

**Цикл по  $n$  от 1 до  $N$  с шагом 1:**

$W_{\tau}(n) = 2 \cdot \pi \cdot (\Delta f \cdot n/N + f_0)$

$s(n) = s_1(n) \cdot s_2^*(n) \cdot \exp(-j \cdot W_{\tau}(n) \cdot \Delta\tau_{int})$

$sumArg = sumArg + \arg(s[n])$

$num = num + |s[n]| \cdot W_{\tau}^2(n)$

$denum = denum + |s[n]| \cdot W_{\tau}(n) \cdot sumArg$

**Конец цикла**

$\Delta\hat{t}_{\tau} = num/denum + \tau_{int}$

---

Рисунок 4. Псевдокод алгоритма оценки разности времен задержек

Из рисунка 4 видно, что предложенный алгоритм реализуется следующей последовательностью действий:

- 1) получение выборок сигналов  $s_1(n)$  и  $s_2(n)$ , разность времен задержек между которыми подлежит оценке;
- 2) вычисление грубой оценки времени задержки ( $\hat{t}_{\omega}$ ) по оценке частоты сигналов биений ЛИИС с ЛЧМ, при помощи алгоритма №1 для каждого сигнала  $s_1(n)$  и  $s_2(n)$ ;
- 3) вычисление величины задержки  $\Delta\tau_{int}$ , кратной  $\Delta\tau_{max}$ :

$$\Delta\tau_{int} = \text{fix}[\Delta\hat{t}_{\omega}/\Delta\tau_{max}]\Delta\tau_{max},$$

где  $\Delta\tau_{int}$  – значение времени смещения значения времени задержки;  $\text{fix}$  – операция получения целой части числа;  $\Delta\tau_{max}$  – граница области однозначного определения разности времен задержек (3);  $\Delta\hat{t}_{\omega}$  – разность времен задержек, полученных для  $s_1(n)$  и  $s_2(n)$  в пункте 2;

- 4) вычисление значений произведения  $s_2(n)s_1^*(n)$  со смещением на  $\Delta\tau_{int}$ :

$$s(n) = s_2(n)s_1^*(n) \exp(-jW_{\tau}(n)\Delta\tau_{int}).$$

- 5) вычисление значений  $|s(n)|$  и  $\arg s(n)$ ;

- б) вычисление сумм с накоплением  $num$  и  $denum$ ;
- 7) вычисление разности времен задержек  $\Delta\hat{\tau}_\tau = \tau_2 - \tau_1$ .

Полученный алгоритм требует  $32N$  байт оперативной памяти для реализации вычислений в формате float32 и имеет порядок вычислительной сложности:

$$O(\Delta\hat{\tau}_\tau) \cong O(N[68 + 16\log_2 N]). \quad (12)$$

Таким образом, например, для оценки  $\Delta\hat{\tau}_\tau$  алгоритмом №2 выборки объемом 512 точек необходимо порядка 100 000 операций сложения и умножения, что потребует 16 кБ оперативной памяти.

Разработаны программные реализации алгоритмов №1 и №2, на языке программирования Python.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальной проверки разработанных алгоритмов оценки времен задержек и разностей времен задержек времен информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ в задачах ультразвуковой времяпролетной расходомерии. Схема проведения экспериментов показана на рисунках 5: а) – схема использованного гидравлического контура, б) – схема рабочего участка трубопровода.

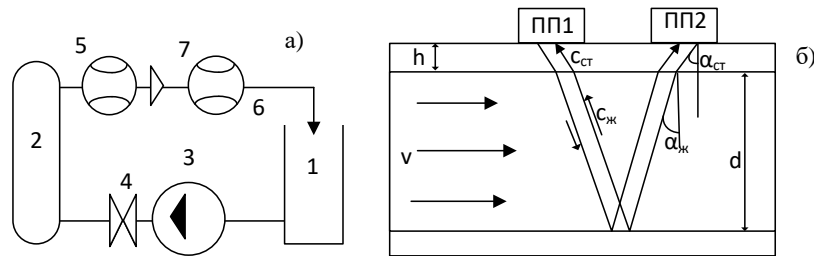


Рисунок 5 – Схема использованного в экспериментах гидравлического контура а) и схема рабочего участка трубопровода б). На рисунке а) обозначены: 1 – бак с водой; 2 – демпферный бак; 3 – насос; 4 – запорная арматура; 5 – эталонный расходомер; 6 – рабочий участок трубопровода; 7 – опытный расходомер. На рисунке б)  $v$  – вектор скорости потока исследуемой жидкости (воды) в 6; ПП – пьезоэлектрические преобразователи, расположенные на внешней стенке трубопровода б, выступающие попеременно излучателями и приемниками ультразвуковых излученных соответственно в направлении потока (от ПП1 к ПП2) и в обратном направлении (от ПП2 к ПП1);  $c_ж$  и  $c_ст$  – вектора скорости звука в направлении распространения волн, прошедшие через движущуюся среду с отражением от противоположении ПП стенки трубопровода и в стенке трубопровода соответственно;  $\alpha_ж$  и  $\alpha_ст$  – углы между нормалью к продольной оси трубопровода и направлением распространения волн в движущейся среде (жидкости) и стенке трубопровода соответственно;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $h$  – толщина стенки трубопровода.

В экспериментах использовались ультразвуковые волны со следующими параметрами ЛЧМ:  $T_m = 0,0256$ с,  $N = 512$ ,  $f_s = 20$  кГц,  $f_0 =$  от 850 до 1000 кГц и  $\Delta f$  от 400 до 600 кГц в зависимости от среды распространения волн. В качестве рабочего участка трубопровода (см. б на рисунке 5) использовались участки из стали ( $d = 20 \dots 100$  мм), и меди ( $d = 32$  мм). При использовании стального трубопровода обеспечивалось хорошее согласование ПП и стенки трубопровода, при этом в принимаемом сигнале вида (1) хорошо разрешались информационный сигнал и помехи (далее сигналы №1). При использовании медного трубопровода имело место плохое согласования ПП и стенкой трубопровода, при этом в принимаемом сигнале

вида (1) имелось большое количество помех, неразрешаемых с информационных (близкорасположенных паразитных сигналов, далее сигналы №2). Типичные примеры сигналов №1 и №2 и их спектров приведены на рисунках 6: а) – сигнал №1, б) - его спектр, в) – сигнал №2 г) - его спектр. В проведенных экспериментах ожидаемые значения времени задержки вычислялись как:

$$\tau_{зд} = 2d/c_{ж} \cos \alpha_{ж} + \tau_{ПП} + 2h/c_{ст} \cos \alpha_{ст}.$$

где  $\tau_{ПП}$  – известное значение задержек в призме ПП; использовались справочные значения  $c_{ж}$  и  $c_{ст}$ .

Значения разности времен задержек вычислялись по показаниям расхода эталонного расходомера (5 на рисунке 5) как:

$$\Delta\tau_{зд} \cong 4dv \sin \alpha_{ж} / (c_{ж}^2 \cos \alpha_{ж}), v = 4Q/\pi d^2 k_{г},$$

где  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  оцениваемая разность времен задержек;  $\tau_{1,2}$  – времена задержки волн в направлении потока (отПП1 до ПП2) и в противоположном направлении (от ПП2 до ПП1);  $v$ ,  $Q$  - скоростью движения контролируемой среды и ее расход;  $k_{г} = \Delta\tau_{зад} / \Delta\tau_{изм}$  – гидравлический поправочный коэффициент (в экспериментах  $k_{г} \in (0,92 \dots 0,99)$ ).

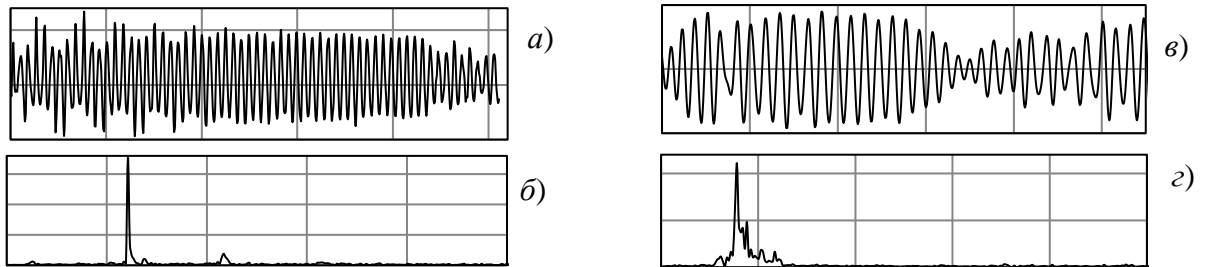


Рисунок 6. Типичные выборки обрабатываемых сигналов и их спектры в диапазоне частот от 0 до  $f_s/2$ : а) – сигнал №1, б) - его спектр, в) – сигнал №2 г) - его спектр

В проведенных экспериментах вычисленные значения  $\tau_{зд}$  сравнивались с аналогичными величинами, полученными алгоритмом №1 и БПФ $_{\omega}$ . Вычисленные значения  $\Delta\tau_{зд}$  сравнивались с аналогичными величинами, полученными алгоритмом №2 и разностью времен задержек, полученной по БПФ $_{\omega}$ . Результаты сравнений приведены в таблицах 1 и 2 соответственно. При этом, с целью достижения необходимой точности измерений времен задержек (равной 1 нс) при использовании БПФ $_{\omega}$ , задавалось  $N_{БПФ} = 2^{20}$ .

Таблица 1. Результаты измерений временной задержки в зависимости от  $\tau_{зд}$

Тип сигнала	$\tau_{зд}$ , мкс	$\delta_{\tau}$ , %		СКО, нс	
		алгоритм №1	БПФ $_{\omega}$	алгоритм №1	БПФ $_{\omega}$
№1	39,5	1,15	1,18	5,73	5,42
	60,2	0,99	0,97	1,56	1,50
	127,5	0,58	0,57	4,40	4,67
	155,8	0,34	0,37	6,68	6,68
№2	59,5	2,60	2,62	59,54	59,53

Из таблицы 2 видно, что СКО оценок алгоритмом №2 меньше в 10...20 раз по сравнению с оценками БПФ $_{\omega}$ , а смещение меньше в 5...10 раз. При этом полученные значения смещения оценок алгоритмом №2 находится в диапазоне 2...8% относительно  $\Delta\tau_{зд}$ , что соответствует теоретически ожидаемым величинами  $k_{г}$ .

Таблица 2. Результаты измерения разностей времен задержек в зависимости от  $\Delta\tau_{зд}$

Сигналы №1					Сигналы №2				
$\Delta\tau_{зд}$ , нс	$\delta_{\Delta\tau}$ , %		СКО, нс		$\Delta\tau_{зд}$ , нс	$\delta_{\Delta\tau}$ , %		СКО, нс	
	алг. №2	БПФ $_{\omega}$	алг. №2	БПФ $_{\omega}$		алг. №2	БПФ $_{\omega}$	алг. №2	БПФ $_{\omega}$
8,2	7,87	-123,21	0,88	24,0	4,6	8,17	-222,4	1,43	7,65
15,8	6,16	35,14	0,85	17,4	13,8	6,41	-62,13	1,31	24,68
32,7	4,38	11,86	1,20	22,6	28,8	5,73	95,76	1,16	16,66
81,7	5,15	33,33	1,92	22,1	48,3	3,95	78,6	1,42	12,63
125,3	4,28	23	4,01	21,7	74,9	3,06	28,37	1,40	31,29
165,9	3,63	26,1	4,00	28,5	91,3	2,81	51,02	1,41	5,96
247,4	2,99	20,47	4,91	28,4	96,6	2,47	36,13	1,56	10,54

Из таблицы 1 видно, что отклонение результатов измерений алгоритмом №1 и БПФ $_{\omega}$  составляют менее 0,03%. При этом значения СКО оценок алгоритмов №1 и БПФ $_{\omega}$  отличаются не более чем на 1,3%, но вычислительная сложность алгоритма №1, в соответствии с (10) и (11) в порядка  $10^3$  ниже чем для БПФ $_{\omega}$ .

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных работ, подтверждают результаты численного моделирования статистических свойств разработанных алгоритмов №1 и №2 соответствующих разработанным методам оценок времен задержек и разностей времен задержек информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ.

**В заключении** подведены итоги исследования и сформулированы основные научные и практические результаты.

**В приложениях** подведен листинги разработанных алгоритмов и приведены акты внедрения работ, проведенных в рамках диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведен анализ современного состояния и проблем, связанных с обработкой и оценкой параметров информационных сигналов в ЛИИС с ЛЧМ, результаты которого показали, что существующие методы оценок времен задержек и их разностей, основанные на измерении значений частоты и фазы, не обеспечивают требуемой точности в ряде случаев (например, в ультразвуковой расходомерии, спирометрии, измерении малых изменений уровня жидкостей в баках), что подтверждает необходимость разработки новых методов обработки информации в локационных информационно-измерительных системах.

2. Разработан и исследован метод измерения разностей времен задержек между информационными сигналами ЛИИС с ЛЧМ, основанный на совместном использовании значений частоты и начальной фазы произведения сигналов биений. Показано, что дисперсия оценки данным методом достигает границы Крамера-Рао при отношении сигнал-шум от 15 дБ, при этом минимально необходимое отношение сигнал-помеха равно 12 дБ. Также показано, что метод обеспечивает повышение точности оценок разностей времен задержек на порядок, по сравнению с традиционно используемыми методами, основанными на измерениях значений частоты и начальной.

3. Разработан и исследован метод измерения времен задержки информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ, основанный на анализе зависимости фазы автокорреляционной функции сигнала биений от времени. Оценка времени задержки, выполненная с помощью разработанного метода, является состоятельной, асимптотически несмещенной и эффективной, и имеет дисперсию, достигающую границы Крамера-

Рао при отношении сигнал-шум от 10 дБ, при этом минимально необходимое отношение сигнал-помеха равно 12 дБ.

4. Разработаны вычислительные алгоритмы, основанные на разработанных методах измерения времен задержек (алгоритмы №1) и разностей времен задержек (алгоритмы №2) информационных сигналов ЛИИС с ЛЧМ. Показано, что данные алгоритмы могут быть реализованы на основе микроконтроллеров, требования к которым также определены. Получены оценки вычислительной сложности данных алгоритмов, которые в практических применениях ЛИИС имеют величину два порядка раз ниже, чем у традиционно используемого метода оценки по максимуму спектра сигнала, полученному путем быстрого преобразования Фурье при одинаковых требованиях к точности. Алгоритм №2, обеспечивает возможность проведения измерений за пределами диапазона однозначного определения начальной фазы сигналов биений. Разработаны программные реализации алгоритмов, на языке программирования Python.

5. Проведена экспериментальная проверка разработанных алгоритмов и исследованы особенности их применения в задачах ультразвуковой времяпролетной расходомерии с накладными преобразователями. Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные по результатам аналитических исследований и численного моделирования.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.** Рекомендуется дальнейшее развитие темы в направлении изучения возможностей использования разработанных методов и алгоритмов в не рассмотренных подробно в данной диссертации приложениях ЛИИС, например, в приложениях уравнемерии, медицинской диагностики, измерений вибрации.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

##### **Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:**

1. Калмыков А.А., Ронкин М.В. Цифровые методы оценки времен прохождения ультразвуковых локационных сигналов // Датчики и системы. 2014. Т.183. № 8. С. 11-16 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

2. Ронкин М.В., Калмыков А.А., Хрестина Е.И. Оценка частоты сигнала по короткой реализации в локационных системах с непрерывным излучением, на основе обработки квадратурных составляющих // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. №1. С. 48-52 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

3. Калмыков А.А., Ронкин М.В. Исследование методов повышения точности локационных ЧМ измерительных систем // 24rd Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2014). 2014. p. 1171-1172 (0,15 п.л./0,08 п.л.) (Scopus).

4. Ronkin M., Khrestina E., Kalmikov A. Frequency Estimation for Short Realization of Radar Signals I. The New Algorithm Presentation // Contemporary Engineering Sciences. 2014. V. 7. № 33. p. 1777-1781 (0,3 п.л./0,15 п.л.) (Scopus).

5. Ronkin M., Khrestina E., Kalmikov A., Frequency Estimation for Short Realization of Radar Signals II. Results of Tests // Contemporary Engineering Sciences. 2014. V. 7. № 33. p. 1783-1787 (0,3 п.л./0,15 п.л.) (Scopus).

6. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Investigation of the time delay difference estimator for FMCW signals // Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2 2017). 2017. p. 90-99 (0,6 п.л./0,3 п.л.) (Scopus).

7. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. A FMCW - Interferometry approach for ultrasonic flow meters // 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2018). 2018. p. 237-240 (0,25 п.л./0,13 п.л.) (Scopus).

8. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Phase based frequency estimator for short range FMCW radar systems // 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2018), 2018. p. 367-370 (0,25 п.л./0,13 п.л.) (Scopus).

9. Ronkin M.V., Kalmykov A.A., Nagovicin V.S., Buinosov A. P. Signal processing algorithm for precise railway navigation by FMCW radio frequency identification // Proceedings of the 4th International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 4 2018), 2018. p. 52-61 (0,6 п.л./0,15 п.л.) (Scopus).

10. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. On precision measurements of small distance changes in FMCW radar level gauges // AIP Conf. Proc. vol. 2116, 2019. p. 390015-1–390015-4 (0,25 п.л./0,13 п.л.) (Scopus).

11. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. A Phase-Based Algorithm for Estimation of Time Delay Difference in Ultrasonic Flow Meters With Frequency Modulated Signals // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, , Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2019), 2019. p. 352 – 355 (0,25 п.л./0,13 п.л.) (Scopus).

12. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Numerical Investigation of the Ultrasonic Transit Time Flowmeter Accuracy in Heterogeneous Flows // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technology (USBREIT 2019), 2019. p. 356 – 359 (0,25 п.л./0,13 п.л.) (Scopus).

#### **Патенты:**

13. Устройство бесконтактного ультразвукового многоплоскостного расходомера. Патент на полезную модель № 154465, 2015. Ронкин М.В., Калмыков А.А. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

14. Способ ультразвукового измерения расхода жидкости и газа. Патент на изобретение № 2583127, 2016 г. Ронкин М.В., Калмыков А.А. (0,6 п.л./0,3 п.л.).

15. Система определения расхода жидкости и газа и ее конструктив. Патент на изобретение №2590338, 2016 г. Ронкин М.В., Калмыков А.А. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

16. Ультразвуковой расходомер. Патент на изобретение № 2612749, 2017. Ронкин М.В., Калмыков А.А. (0,8 п.л./0,4 п.л.).

#### **В других изданиях:**

17. Ронкин М.В., Калмыков А.А. Исследования алгоритмов измерения коротких реализаций ЛЧМ сигналов // 25rd Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). 2015. p. 878-879 (0,15 п.л./0,08 п.л.).

18. Kalmykov Al. A., Ronkin M.V. Comparison of delay measurement algorithms for the ultrasonic flow meters // 26rd Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2016). 2016. pp. 2330-2336 (0,4 п.л./0,2 п.л.).



19. Ronkin M.V. Investigation of the features of chirp signal application to the ultrasonic flow measurements // 26rd Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2016). 2016. pp. 2323-2329 (0,4 п.л./0,4 п.л.).

20. Ронкин М.В., Калмыков А.А. Анализ особенностей обработки сигналов ультразвуковых расходомеров с линейно-частотно модулированным излучением // Ural radio engineering journal vol. 2, №4, 2018. pp. 52-66 (1,2 п.л./0,6 п.л.).

Подписано в печать \_\_. \_\_. \_\_\_\_\_. Формат 60×84 1/16  
Бумага для множительных аппаратов. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. \_\_, \_\_. Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_)