

На правах рукописи

**Фирсов Алексей Андреевич**

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ И  
СКОРОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ В ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМАХ НА  
ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ АППРОКСИМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в информационных системах)

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

Автор: 

Москва – 2018

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: **Гетманов Виктор Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Шахтарин Борис Ильич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Автономные информационные и  
управляющие системы» Московского  
государственного технического  
университета имени Н.Э. Баумана;

**Родионов Александр Алексеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией обработки  
многомерных сигналов Института  
прикладной физики Российской академии  
наук.

Ведущая организация: Институт проблем управления им.  
В.А. Трапезникова Российской академии  
наук.

Защита состоится «22» июня 2018 г. в 15 часов 00 минут на  
заседании диссертационного совета Д 212.130.03 в Национальном  
исследовательском ядерном университете «МИФИ». Адрес: 115409,  
Москва, Каширское шоссе, 31. Тел. для справок: +7 (499) 324-84-98.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ  
МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,  
просьба направить по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31,  
диссертационные советы НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Леонова Н.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе решалась научно-техническая задача создания, исследования эффективности и применения метода и алгоритмов оценивания декартовых координат и скоростей движущихся объектов на основе локальных аппроксимационных моделей для доплеровских систем, работающих в акустическом, радио и оптическом диапазонах.

**Актуальность темы.** Диссертационная работа соответствует высоким требованиям к решению современных задач оценивания координат и скоростей движущихся объектов на базе доплеровских систем в экспериментальной механике, физике, медицине, биологии и т.д.

Традиционные доплеровские системы ориентированы на измерение скоростей движущихся объектов. Существующие методы и алгоритмы, разработанные для указанных систем, в основном, производят вычисления усредненных оценок доплеровских скоростей. Однако, системы данного класса могут применяться для более широкого диапазона решаемых задач. Предлагаемая диссертационная работа посвящена разработке метода и алгоритмов оценивания декартовых координат, скоростей и частот излучения движущихся объектов в виде функций времени.

Перед современными доплеровскими системами ставятся задачи по фильтрации помеховых отражений в сигналах, обеспечению пространственного разрешения движущихся на малом расстоянии друг от друга объектов и извлечения дополнительной информации из доплеровских сигналов. Диссертационная работа позволяет решать эти задачи.

Диссертационная работа ориентирована на повышение показателей точности измерений доплеровских систем.

В настоящее время компьютерные средства с существующими параметрами быстрой реакции и объемами памяти позволяют реализовывать достаточно сложные алгоритмы оценивания кинематических параметров объектов для доплеровских систем. Метод и алгоритмы, предложенные в диссертационной работе, базируются на использовании современных компьютерных средств. Применение ЭВМ следующего поколения позволяет расширить предложенные методы и алгоритмы.

Диссертационная работа содержит ряд инновационных составляющих, которые позволяют произвести качественное улучшение доплеровских систем: 1. Расширение функциональных возможностей систем; 2. Упрощение конструкций; 3. Повышение показателей точности и надежности; 4. Обеспечение унификации на основе использования

единой системы методов и алгоритмов для доплеровских устройств разного типа.

Перечисленные выше аргументы позволяют сделать вывод об актуальности темы предлагаемой диссертационной работы.

**Цель исследования** – разработка метода и алгоритмов оценивания координат и скоростей движущихся объектов на основе локальных аппроксимационных моделей для доплеровских систем.

**Объектом исследования** являются непрерывные и квазинепрерывные доплеровские сигналы от акустических, радио и оптических систем, характеризующиеся нестационарностями и сложными структурами, которые определяются конструкциями указанных систем, физическими принципами их работы и внешними возмущениями.

**Предметом исследования** являются метод и алгоритмы оценивания координат и скоростей движущихся объектов на основе локальных аппроксимационных моделей для доплеровских систем, работающих в акустическом, радио и оптическом диапазонах частот.

**Основные задачи исследования:**

1. Создание метода оценивания координат и скоростей объектов на основе локальных аппроксимационных моделей для доплеровских систем.
2. Разработка алгоритмов и их программных реализаций для решения задачи оценивания координат и скоростей движущихся объектов.
3. Оценивание погрешностей предложенных метода и алгоритмов на основе математического и статистического моделирования.
4. Проведение экспериментальной проверки разработанных метода и алгоритмов на реальных данных.

**Методы исследования.** В диссертации применяются методы системного анализа, теории принятия решений и последовательного анализа, цифровой обработки сигналов, математического программирования и оптимизации, статистического анализа и математического моделирования.

**Теоретическая и методологическая основа** базируется на работах отечественных и зарубежных специалистов в области теории и применения акустических, радио и лазерных систем, цифровой обработки сигналов, математического программирования и статистического анализа экспериментальных данных: Urick R.J., Burdic W.S., Маслов В.К., Торопов В.Н., Теворовский В.И., Skolnik M.I., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Васильев В.Н., Гуров И.П., а также Himmelblau D., Oppenheim A.V., Bendat J.S., Piersol A.G.

**Научная новизна** результатов работы:

1. Метод оценивания координат и скоростей движущихся объектов на основе цифровой обработки нестационарных и структурно сложных доплеровских сигналов от акустических, радио и оптических систем,

который является новым благодаря использованию локальных аппроксимационных моделей, являющихся линейными по части параметров, что снижает размерность поисковых процедур.

2. Единые по своей структуре алгоритмы оценивания кинематических параметров объектов на основе предложенного метода.

3. Новое решение задачи оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем, позволяющее производить измерения на дальних дистанциях и не требующее длительных наблюдений.

4. Новое решение задачи пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем, находящихся на малом расстоянии друг от друга и генерирующих излучения на близких или равных частотах.

5. Решение актуальной задачи устранения помеховых отражений для доплеровских акустических систем, учитывающее флюктуирующие и рассеянные отражения.

6. Решение актуальной задачи оценивания быстроизменяющихся доплеровских скоростей объектов для радиосистем, которое учитывает внешние помеховые возмущения.

7. Новое решение задачи оценивания доплеровских скоростей вибрирующих объектов для лазерных систем, не требующее применения оптических гетеродинных устройств.

Новые результаты защищены 4 охранными документами Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент).

#### **Практическая и научная значимость исследования:**

1. Предложенные метод и алгоритмы расширяют функциональные возможности существующих доплеровских систем. Производится оценивание декартовых координат, скоростей и частот излучения движущихся объектов в виде функций времени.

2. Созданные метод и алгоритмы обеспечивают упрощение конструкций доплеровских систем. Для оптической доплеровской системы предлагается схема без оптического гетеродина в отличие от существующих лазерных доплеровских виброметров (ЛДВ). Для радио и акустических доплеровских систем предлагаются для использования простые схемы.

3. Разработанные метод и алгоритмы позволяют уменьшить показатели погрешностей. В зависимости от используемой доплеровской системы и решаемой задачи увеличение точности составляет от 1.1 до 4 раз.

4. Предложенная технология цифровой обработки доплеровских сигналов позволяет создавать современные методы и алгоритмы оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских систем.

5. Разработанные метод и алгоритмы универсальны применимо к доплеровским системам, работающим в акустическом, радио и

оптическом диапазонах, и могут быть использованы для многих приложений, где необходимо произвести оценивание координат и скоростей движущихся объектов. Например, для измерения кинематических параметров беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в городских условиях, вакуумных поездов в тоннелях при помощи внешних контролирующих устройств и бесконтактной виброметрии опасных для жизни человека и хрупких объектов.

**Основные научные результаты**, выносимые на защиту:

1. Метод оценивания координат и скоростей движущихся объектов в доплеровских системах на основе локальных аппроксимационных моделей.
2. Решение задачи оценивания координат и скоростей объектов как функций времени для доплеровских акустических систем.
3. Решение задачи пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем.
4. Решение задачи устранения помеховых отражений для доплеровских акустических систем.
5. Решение задачи оценивания доплеровских скоростей объектов как функций времени для радиосистем.
6. Решение задачи оценивания доплеровских скоростей вибрирующих объектов как функций времени для лазерных систем.
7. Алгоритмы, разработанные на основе предложенного метода, для решения указанных задач.
8. Погрешности реализованных метода и алгоритмов.

**Достоверность результатов** обеспечивается строгим использованием математического аппарата и тем, что экспериментально полученные результаты соответствуют теоретическим положениям диссертации.

**Реализация результатов.** Созданные метод и алгоритмы реализованы в виде программ для ЭВМ и зарегистрированы в Роспатенте. Научные и практические результаты, представленные в диссертации, внедрены и использованы в организациях:

1. ФГУП ВНИИФТРИ при выполнении эскизного проекта ОКР Батарея-ТОФ, реализуемого в соответствии с Государственным заказом.
2. ООО ИНТЕРЮНИС-ИТ в рамках проекта по разработке систем вибрационного мониторинга Лель-М/А-Line 32D (DDM-M).

Копии актов внедрения результатов работы и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ приведены в приложениях 1-6 диссертации.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 11 конференциях:

1. Научная сессия НИЯУ МИФИ. Москва. 2011, 2012, 2013, 2014, 2015.

2. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. НИУ МЭИ. Москва. 2011, 2012, 2013.
3. Международная конференция Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA. РНТОРЭС им. А.С. Попова. Москва. 2012.
4. Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. РОНКТД. Москва. 2014.
5. Форум Территория NDT. РОНКТД. Москва. 2016.

**Публикации.** Материалы диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, из них 3 в журналах, входящих в перечень ВАК и представленных в базе данных научной периодики Scopus, и 1 в журнале, входящем только в перечень ВАК. Также получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все научные и практические результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или с участием коллег-соавторов.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит 121 печатную страницу текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и 6 приложений. Основная часть диссертации содержит 115 страниц текста и 32 рисунка. Список литературы включает 119 источников. Приложение включает копии актов внедрения и копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, изложена научная новизна и практическая значимость выполненной работы, обозначены объект и предмет исследования, определены цели и задачи работы. Кратко показаны основные научные результаты, полученные в ходе исследования. Приведены данные об апробации работы, ее структуре и объеме.

**В первом разделе** рассмотрены варианты конструкций доплеровских систем, работающих в акустическом, радио и оптическом диапазонах, и соответствующие метод и алгоритмы оценивания движений объектов. Показано, что данные системы, несмотря на разницу в конструкциях и физических принципах работы, генерируют практически единые по своей структуре доплеровские сигналы. Общие модели наблюдаемых доплеровских сигналов сформированы в виде узкополосных модулированных по частоте и амплитуде функций времени, аддитивно смешанных с шумовыми составляющими. Определено, что существующие методы и алгоритмы обработки доплеровских сигналов позволяют производить усредненные оценки доплеровских скоростей и в

значительной степени зависят от конструкций систем и физических особенностей формирования сигналов, что ограничивает их применение для доплеровских систем разных типов.

В результате анализа указанных сведений произведена общая постановка задачи оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских систем на основе локальных аппроксимационных моделей.

Модель наблюдения  $y(t)$  доплеровского сигнала на исходном отрезке времени  $0 \leq t \leq t_f$  представлена в следующем виде:

$$y(t) = E(t) \cos \left( 2\pi f_0 \int_0^t \left( 1 - \frac{k_s}{c_0} v_d(\tau) \right) d\tau \right) + w(t), \quad (1)$$

где  $E(t)$  – амплитудная функция,  $v_d(t)$  – доплеровская скорость,  $\pi \approx 3.14$ ,  $f_0$  – несущая частота,  $c_0$  – скорость распространения колебаний в среде,  $w(t)$  – аддитивная шумовая составляющая, для пассивных систем  $k_s = 1$ , а для активных  $k_s = 2$ . Функция доплеровской скорости:

$$v_d(t) = v_d(\mathbf{r}(t), \dot{\mathbf{r}}(t)), \quad (2)$$

задана в виде производной функции относительной дальности  $d_0(t)$  по времени, зависящей от векторов относительных координат  $\mathbf{r}(t)$  и скоростей  $\dot{\mathbf{r}}(t)$ ,  $d_0(t) = d_0(\mathbf{r}(t))$ ,  $v_d(t) = \dot{d}_0(t) = v_d(\mathbf{r}(t), \dot{\mathbf{r}}(t))$ , и определена на основе гипотезы взаимного движения в доплеровской системе,  $\mathbf{r}(t), \dot{\mathbf{r}}(t) \in R$ , где  $R$  – ограничивающее множество, связанное с гипотезой движения. Поставлена общая вариационная задача – по наблюдению функции  $y(t)$  с учетом (1) и (2) найти оценки функций  $\mathbf{r}^\circ(t)$ ,  $\dot{\mathbf{r}}^\circ(t)$  на интервале времени  $(0, t_f)$ :

$$y(t) \rightarrow \mathbf{r}^\circ(t), \dot{\mathbf{r}}^\circ(t).$$

Предложено выполнить решение данной задачи в два этапа. На первом этапе с использованием (1) произведено оценивание доплеровской скорости  $v_d^\circ(t)$  по наблюдению  $y(t)$ :

$$y(t) \rightarrow v_d^\circ(t).$$

На втором этапе получены оценки вектора параметров движения  $\mathbf{r}^\circ(t)$ ,  $\dot{\mathbf{r}}^\circ(t)$  на основе (2) с использованием оценки доплеровской скорости  $v_d^\circ(t)$ :

$$v_d^\circ(t) \rightarrow \mathbf{r}^\circ(t), \dot{\mathbf{r}}^\circ(t).$$

В работе предложено сведение общей вариационной задачи оценивания к задаче двухэтапного нелинейного программирования.

Для этого на первом этапе на  $(0, t_f)$  введены локальные интервалы  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $m$  – число локальных интервалов,  $t_0 = 0$ ,  $t_m = t_f$ , и локальные аппроксимационные модели для доплеровской скорости в виде функций  $v_d(\mathbf{c}_j, t)$ , где  $\mathbf{c}_j$  – вектор локальных параметров. Сформированы локальные функционалы:



$$S_1(y, \mathbf{c}_j, E_{0j}) = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \left( y(t) - E_{0j} \cos \left( 2\pi f_0 \int_{t_{j-1}}^t \left( 1 - \frac{k_s}{c_0} v_d(\mathbf{c}_j, \tau) \right) d\tau \right) \right)^2 dt.$$

При помощи решения последовательностей задач нелинейного программирования найдены оптимальные локальные параметры, на основе которых вычислены локальные оценки доплеровских скоростей. Оценки функций доплеровских скоростей  $v_d^\circ(t)$  представлены в виде сумм функций локальных оценок доплеровских скоростей:

$$\mathbf{c}_j^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_j} S_1(y, \mathbf{c}_j, E_{0j}) \right\}, v_{d_j}^\circ(t) = v_d(\mathbf{c}_j^\circ, t), v_d^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d_j}^\circ(t).$$

На втором этапе вектор координат и его производная аппроксимированы параметрическими модельными функциями  $r(\mathbf{d}, t)$ ,  $\dot{r}(\mathbf{d}, t)$ , где  $\mathbf{d}$  – соответствующий вектор параметров, позволивший сформировать аппроксимационную модель для доплеровской скорости на отрезке  $0 \leq t \leq t_f$ :

$$v_d(\mathbf{d}, t) = v_d(r(\mathbf{d}, t), \dot{r}(\mathbf{d}, t)).$$

Сформирован функционал  $S_2(v_d^\circ, \mathbf{d})$ , решена задача минимизации, и найдены искомые оценки  $\mathbf{r}^\circ(t)$ ,  $\dot{\mathbf{r}}^\circ(t)$ :

$$S_2(v_d^\circ, \mathbf{d}) = \int_0^{t_f} (v_d^\circ(t) - v_d(\mathbf{d}, t))^2 dt, \\ \mathbf{d}^\circ = \arg \{ \min_{\mathbf{d}} S_2(v_d^\circ, \mathbf{d}) \}, \mathbf{r}^\circ(t) = r(\mathbf{d}^\circ, t), \dot{\mathbf{r}}^\circ(t) = \dot{r}(\mathbf{d}^\circ, t).$$

**Во втором разделе** разработан метод на основе локальных аппроксимационных моделей для задач оценивания координат и скоростей движущихся объектов, пространственного разрешения объектов и фильтрации помеховых отражений в доплеровских системах различных диапазонов.

**1. Оценивание координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем.** Схема движения представлена на рис. 1. Акустический излучатель  $e$  двигался относительно приемников  $p_1, p_2, \dots, p_L$  в водной среде согласно уравнениям:  $x_e(t) = x_e(0) + vt$ ,  $y_e(t) = y_e(0)$ , где  $x_e(0), y_e(0)$  – его начальные координаты,  $v$  – скорость движения. Неподвижные приемники расположены на линии в точках  $(x_{p_l}, y_{p_l})$ ,  $y_{p_l} = 0$ ,  $x_{p_l} = \Delta x_p(l - 1)$ ,  $l = 1, \dots, L$ , где  $\Delta x_p$  – расстояние между приемниками,  $L$  – общее количество приемников.

Излучатель принят точечным и генерировал непрерывный гармонический сигнал с постоянной частотой  $f_0$ . Поступающие в приемники сигналы, вследствие эффекта Доплера, выглядели следующим образом:

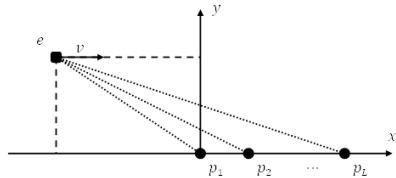


Рис. 1. Схема движения излучателя в доплеровской акустической системе

$$y_l(t) = E_l(t) \cos \varphi_{d_l}(t) + w_l(t), \quad (3)$$

где  $E_l(t)$  – амплитудные функции,  $E_l(t) = d_l(0)/d_l(t)$ ,  $\varphi_{d_l}(t)$  – фазовые функции,  $\varphi_{d_l}(t) = 2\pi f_0(t - d_l(t)/c_0) + \varphi_{d_0}$ ,  $d_l(t)$  – функция дальности,  $w_l(t)$  – погрешности наблюдений.

Поставлена задача – по наблюдениям  $y_l(t)$  найти оценки скорости  $v$  и функций координат  $x_e^\circ(t)$ ,  $y_e^\circ(t)$  излучателя.

Для данной задачи предложен двухэтапный метод на базе технологии, описанной в разделе 1. На первом этапе интервал наблюдения  $(0, t_f)$  разбит на  $m$  локальных интервалов  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Введены локальные аппроксимационные модели для доплеровской скорости в виде функций  $v_{d_l}(\mathbf{c}_{lj}, t)$ , где  $\mathbf{c}_{lj}$  – векторы локальных параметров. Сформированы локальные функционалы, являвшиеся мерой близости наблюдений и аппроксимационных моделей:

$$S_1(y_l, \mathbf{c}_{lj}, E_{0lj}) = \sum_{l=1}^L \int_{t_{j-1}}^{t_j} (y_l(t) - E_{0lj} \cos(2\pi f_0 \int_{t_{j-1}}^t (1 - \frac{1}{c_0} v_{d_l}(\mathbf{c}_{lj}, \tau) d\tau)) dt.$$

Осуществлен поиск локальных параметров, локальных оценок доплеровских скоростей и оценок функций доплеровских скоростей  $v_{d_l}^\circ(t)$  на основе решения задачи минимизации  $S_1(y_l, \mathbf{c}_{lj}, E_{0lj})$ :

$$\mathbf{c}_{lj}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_{lj}} S_1(y_l, \mathbf{c}_{lj}, E_{0lj}) \right\},$$

$$v_{d_{lj}}^\circ(t) = v_{d_l}(\mathbf{c}_{lj}^\circ, t), v_{d_l}^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d_{lj}}^\circ(t).$$

На втором этапе осуществлена аппроксимация полученных оценок  $v_{d_l}^\circ(t)$  с помощью модельных функций  $v_{d_{Ml}}(\mathbf{d}, t)$ ,  $\mathbf{d}^T = (x_e(0), y_e(0), v)$  на отрезке  $0 \leq t \leq t_f$ . Сформирован функционал  $S_2(v_{d_l}^\circ, \mathbf{d})$ , произведен поиск оценок  $\mathbf{d}^\circ$  и вычисление функций координат объекта:

$$S_2(v_{d_l}^\circ, \mathbf{d}) = \sum_{l=1}^L \int_0^{t_f} (v_{d_l}^\circ(t) - v_{d_{Ml}}(\mathbf{d}, t))^2 dt,$$

$$\mathbf{d}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{d}} S_2(v_{d_l}^\circ, \mathbf{d}) \right\}, v^\circ = d_3^\circ, x_e^\circ(t) = x_e(\mathbf{d}^\circ, t), y_e^\circ(t) = y_e(\mathbf{d}^\circ, 0).$$

**2. Пространственное разрешение излучателей для доплеровских акустических систем.** Рассмотрена схема движения, изображенная на рис. 2.

В водной среде выполнено плоское движение системы акустических излучателей, расположенных на линии  $(a, b)$ , с постоянной скоростью  $v$  вдоль указанной линии. Начальные и текущие координаты излучателей с номерами  $n = 1, \dots, L_0$ ,  $L_0 -$

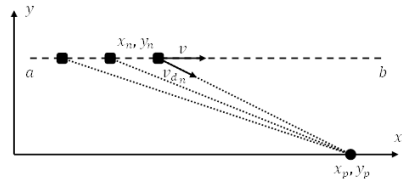


Рис. 2. Схема движения излучателей в доплеровской акустической системе

количество излучателей, определены как  $x_n(0)$ ,  $y_n(0)$  и  $x_n(t) = x_n(0) + vt$ ,  $y_n(t) = y_n(0)$ . Координаты неподвижного приемника заданы значениями  $x_p$ ,  $y_p$ . Излучатели приняты точечными, и их сигналы представлены гармоническими функциями с неизменяющимися близкими частотами  $f_{0n}$ . Наблюдаемый многочастотный доплеровский сигнал на выходе приемника сформирован путем сложения принимаемых сигналов от разных излучателей:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{L_0} E_n(t) \cos \varphi_{d_n}(t) + w(t), \quad (4)$$

где  $E_n(t)$  – функции амплитуды,  $\varphi_{d_n}(t)$  – функции фазы,  $w(t)$  – аддитивная шумовая составляющая.

Поставлена задача – по наблюдению  $y(t)$  найти оценки скорости  $v^\circ$ , функций координат  $x_n^\circ(t)$ ,  $y_n^\circ(t)$  и функций доплеровских частот  $f_{d_n}^\circ(t)$  излучателей.

Для указанной задачи на основе технологии, предложенной в разделе 1, создан двухэтапный метод пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем. На первом этапе интервал наблюдения  $(0, t_f)$  разделен на  $m$  локальных интервалов  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Сформированы локальные аппроксимационные модели функций доплеровских скоростей  $v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}, t)$ , где  $\mathbf{c}_{nj}$  – векторы локальных параметров. Введены локальные функционалы:

$$S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj}) = \int_{t_{j-1}}^{t_j} (y(t) - \sum_{n=1}^{L_0} E_{0nj} \cos(2\pi f_{0n} \int_{t_{j-1}}^t (1 + \frac{1}{c_0} v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}, \tau) d\tau)))^2 dt.$$

Осуществлен поиск локальных параметров, локальных оценок доплеровских скоростей и оценок функций доплеровских скоростей  $v_{d_n}^\circ(t)$  на основе решения задачи минимизации  $S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj})$ :

$$\mathbf{c}_{nj}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_{nj}} S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj}) \right\},$$

$$v_{d_{nj}^\circ}(t) = v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}^\circ, t), v_{d_n}^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d_{nj}^\circ}(t).$$

На втором этапе полученные оценки  $v_{d_n}^\circ(t)$  аппроксимированы модельными функциями доплеровских скоростей  $v_{dM_n}(\mathbf{d}, t)$ ,  $\mathbf{d}^T = (x_1(0), \dots, x_{L_0}(0), y_1(0), \dots, y_{L_0}(0), v)$ . Произведен поиск оценок  $\mathbf{d}^\circ$  при помощи решения задачи минимизации функционала  $S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d})$  и реализовано пространственное разрешение излучателей на основе оценок начальных координат:

$$S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d}) = \sum_{n=1}^{L_0} \int_0^{t_f} (v_{d_n}^\circ(t) - v_{dM_n}(\mathbf{d}, t))^2 dt,$$

$$\mathbf{d}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{d}} S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d}) \right\},$$

$$v^\circ = d_{2L_0+1}^\circ, x_n^\circ(t) = x_n(\mathbf{d}^\circ, t), y_n^\circ(t) = y_n(\mathbf{d}^\circ, 0).$$

### 3. Фильтрация помеховых отражений для доплеровских акустических систем. Схема движения реального и мнимого отраженных объектов представлена на рис. 3.

Акустический излучатель  $e_1$  двигался в водной среде с постоянной скоростью  $v$  относительно неподвижного приемника  $p$ . Излучатель принят точечным, и его сигнал представлен гармонической функцией частоты  $f_0$ . Генерируемый сигнал приходил на приемник прямым путем и путем отражения от водной поверхности, что равносильно случаю наличия двух излучателей (реального и мнимого). Начальные и текущие координаты излучателей определены как  $x(0)$ ,  $y_1(0) = -y(0)$ ,  $y_2(0) = y(0)$  и  $x(t) = (x(0) + vt)$ ,  $y_n(t) = y_n(0)$ ,  $n = 1, 2$ . Наблюдаемый на выходе приемника двухчастотный доплеровский сигнал:

$$y(t) = E_1(t) \cos \varphi_{d_1}(t) + E_2(t) \cos \varphi_{d_2}(t) + w(t), \quad (5)$$

где  $E_n(t)$  – амплитудные функции,  $\varphi_{d_n}(t)$  – фазовые функции,  $w(t)$  – помехи наблюдения, содержал данные о движении излучателей.

Поставлена задача – по наблюдениям  $y(t)$  найти оценки скорости  $v^\circ$  и функций координат  $x^\circ(t)$ ,  $y_1^\circ(t)$  реального излучателя.

Для данной задачи предложен двухэтапный метод фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем, разработанный на базе технологии, описанной в разделе 1. На первом этапе произведено разбиение интервала наблюдения  $(0, t_f)$  на  $m$  локальных интервалов  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Введены локальные аппроксимационные модели доплеровских скоростей в виде функций  $v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}, t)$ , где  $\mathbf{c}_{nj}$  – векторы локальных параметров. Сформированы локальные функционалы:

$$S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj}) = \int_{t_{j-1}}^{t_j} (y(t) - \sum_{n=1}^2 E_{0nj} \cos(2\pi f_{0n} \int_{t_{j-1}}^t (1 - \frac{1}{c_0} v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}, \tau) d\tau)) )^2 dt.$$

Выполнен поиск локальных параметров, локальных оценок доплеровских скоростей и оценок функций доплеровских скоростей  $v_{d_n}^\circ(t)$  на основе минимизационного подпоиска  $S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj})$ :

$$\mathbf{c}_{nj}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_{nj}} S_1(y, \mathbf{c}_{nj}, E_{0nj}) \right\},$$

$$v_{d_{nj}^\circ}(t) = v_{d_n}(\mathbf{c}_{nj}^\circ, t), v_{d_n}^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d_{nj}^\circ}(t).$$

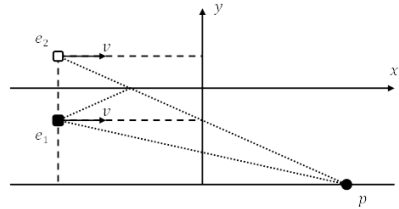


Рис. 3. Схема движения реального и мнимого излучателей в доплеровской акустической системе

В результате аппроксимационной фильтрации получены оценки доплеровских скоростей (частот) в виде функций времени.

На втором этапе произведена аппроксимация полученных оценок  $v_{d_n}^\circ(t)$  модельными функциями  $v_{dM_n}(\mathbf{d}, t)$ ,  $\mathbf{d}^T = (x(0), y(0), v)$  на интервале наблюдения  $(0, t_f)$ . Введен функционал  $S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d})$ . При помощи решения задачи минимизации  $S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d})$  получены оценки  $\mathbf{d}^\circ$ . На основе полученных оценок вычислены функции координат реального объекта:

$$S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d}) = \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_f} (v_{d_n}^\circ(t) - v_{dM_n}(\mathbf{d}, t))^2 dt,$$

$$\mathbf{d}^\circ = \arg\{\min_{\mathbf{d}} S_2(v_{d_n}^\circ, \mathbf{d})\}, v^\circ = d_3^\circ, x^\circ(t) = x(\mathbf{d}^\circ, t), y_1^\circ(t) = y_1(\mathbf{d}^\circ, 0).$$

#### 4. Оценивание доплеровских скоростей объекта для радиосистем.

Рассмотрена схема движения, представленная на рис. 4. Объект двигался прямолинейно к приемопередающей антенне в ограниченном пространстве с возрастающей скоростью  $v_d(t)$ . Выполнено облучение объекта непрерывным радиосигналом с несущей частотой  $f_0$ . В отраженном сигнале частота модулирована доплеровской скоростью объекта  $v_d(t)$  и равна  $f_0 + f_d(t)$ ,  $f_d(t)$  – доплеровский сдвиг частоты. Отраженный сигнал содержал информацию о доплеровской скорости  $v_d(t)$  объекта. Стенки колебались и оказывали помеховое влияние на принимаемый сигнал. Помеховая доплеровская скорость и соответствующая частота принимали значения,  $v_{dp}(t)$  и  $f_{dp}(t)$ . Наблюдаемый сигнал  $y(t)$  состоял из двух доплеровских компонент от объекта и направляющих стенок. Записан в виде:

$$y(t) = E(t) \cos\left(\Delta f_h t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t v_d(\tau) d\tau + \varphi_0\right) + E_p(t) \cos\left(\Delta f_h t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t v_{dp}(\tau) d\tau + \varphi_{p0}\right) + w(t), \quad (6)$$

где  $E(t)$ ,  $E_p(t)$  – медленно меняющиеся амплитуды,  $\lambda$  – длина волны ( $\lambda \neq 0$ ),  $f_h$  – гетеродинный сдвиг частоты,  $w(t)$  – аддитивная шумовая составляющая.

Поставлена задача – по наблюдениям  $y(t)$  найти оценки скорости  $v_d^\circ(t)$  в виде функций времени на  $(0, t_f)$ .

Решение задачи основано на технологии, предложенной в разделе 1. Интервал наблюдения  $(0, t_f)$  разбит на  $m$  локальных интервалов  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Введены локальные аппроксимационные модели для

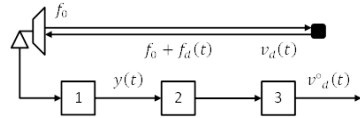


Рис. 4. Доплеровская радиосистема:  
1. приемопередающее устройство,  
2. АЦП, 3. ЭВМ

доплеровских скоростей в виде функций  $v_{dM}(\mathbf{c}_j, t)$ ,  $v_{dMp}(\mathbf{c}_j, t)$ , где  $\mathbf{c}_j$  – вектор локальных параметров. Сформированы локальные функционалы:

$$S\left(y, \mathbf{c}_j, E_{0j}, E_{p0j}\right) = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \left( y(t) - E_{0j} \cos\left(\Delta f_h t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_{t_{j-1}}^t v_{dM}(\mathbf{c}_j, \tau) d\tau + \varphi_0\right) - E_{p0j} \cos\left(\Delta f_h t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_{t_{j-1}}^t v_{dMp}(\mathbf{c}_j, \tau) d\tau + \varphi_{p0}\right) \right)^2 dt,$$

осуществлен поиск локальных параметров, локальных оценок доплеровских скоростей и оценки функции доплеровской скорости  $v_d^\circ(t)$  на основе решения задачи минимизации  $S(y, \mathbf{c}_j, E_{0j}, E_{p0j})$ :

$$\mathbf{c}_j^\circ = \arg\left\{\min_{\mathbf{c}_j} S\left(y, \mathbf{c}_j, E_{0j}, E_{p0j}\right)\right\},$$

$$v_{d,j}^\circ(t) = v_d(\mathbf{c}_j^\circ, t), v_d^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d,j}^\circ(t).$$

**5. Оценивание доплеровских скоростей вибрирующих объектов для лазерных систем**, соответствующих схеме, представленной на рис. 5. Лазер облучал вибрирующий объект непрерывным лучом. Прямой и отраженный оптический сигнал попадали на апертуру фотоприемника, где происходило их сложение. Наблюдаемый доплеровский оптоэлектронный сигнал на выходе фотоприемника представлен следующим образом:

$$y(t) = E_1 + E_2 \cos(\delta\varphi_d(t)) + w(t), \quad (7)$$

где уровень постоянной засветки апертуры определен параметром  $E_1$ , глубина модуляции засветки определена параметром  $E_2$ ,  $\delta\varphi_d(t)$  – фазовая функция,  $\delta\varphi_d(t) = 2\pi \int_0^t f_d(\tau) d\tau$ ,  $w(t)$  – помеховая функция. Наблюдаемый сигнал содержал информацию о виброперемещениях объекта.

Поставлена задача оценить функции доплеровской скорости  $v_d^\circ(t)$  по наблюдению функции оптоэлектронного сигнала  $y(t)$ .

Решение задачи осуществлено на базе технологии, описанной в разделе 1. Интервал наблюдения  $(0, t_f)$  разделен на  $m$  локальных интервалов  $(t_{j-1}, t_j)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . На них доплеровской скорости поставлены в соответствие локальные модельные функции  $v_{dM}(\mathbf{c}_j, t)$ , зависящие от векторов локальных параметров  $\mathbf{c}_j^T = (c_{1j}, \dots, c_{kj})$ . Для локальных интервалов сформированы аппроксимационные функционалы:

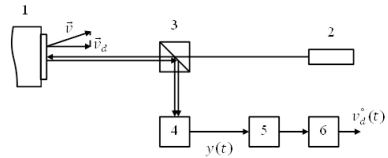


Рис. 5. Доплеровская лазерная система:  
1. Вибрирующая поверхность, 2. Лазер,  
3. Система зеркал, 4. Фотоприемник,  
5. АЦП, 6. ЭВМ

$$S(y, \mathbf{c}_j, E_{10j}, E_{20j}) = \int_{t_{j-1}}^{t_j} (y(t) - E_{10j} - E_{20j} \cos(\frac{4\pi}{\lambda_0} \int_{t_{j-1}}^t v_{dM}(\mathbf{c}_j, \tau) d\tau))^2 dt.$$

Выполнен поиск локальных параметров, локальных оценок доплеровской скорости и оценки доплеровской скорости  $v_d^\circ(t)$  в виде функции времени на основе решения задачи минимизации функционала  $S(y, \mathbf{c}_j, E_{10j}, E_{20j})$ :

$$\mathbf{c}_j^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_j} S(y, \mathbf{c}_j, E_{10j}, E_{20j}) \right\},$$

$$v_{d_j}^\circ(t) = v_d(\mathbf{c}_j^\circ, t), \quad v_d^\circ(t) = \sum_{j=1}^m v_{d_j}^\circ(t).$$

Рассмотрены движения объектов при простых гипотезах. Оценивание параметров нескольких движущихся объектов возможно, но параметрически сложнее. При криволинейном движении объекта можно разбить его траекторию на малые участки, на которых движение происходит прямолинейно с постоянной скоростью. Если объект движется в трехмерном пространстве, оценить его кинематические параметры возможно при использовании распределенной системы приемников. Показано, что оценивание координат и скоростей объектов выполнимо с помощью одного приемника.

**В третьем разделе** на основе предложенного метода разработаны алгоритмы оценивания координат и скоростей объектов.

**1. Алгоритм оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем.** Данный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ и зарегистрирован в Роспатенте (свидетельство № 2015615860). На вход алгоритма (программы) поданы данные в виде дискретных по времени сигналов.

Дискретные наблюдения  $\mathbf{y}_l(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , разделены на  $m$  локальных отрезков  $(N(j-1) \leq i \leq Nj-1)$  по  $N$  точек,  $j = 1, \dots, m$ ,  $Nm = N_f$ ,  $N_f T = t_f$ . Введены локальные модели в виде кусочно-синусоидальных функций с постоянными амплитудами и частотами:

$$\mathbf{y}_{M_l}(\mathbf{c}_{lj}, Ti) = a_{lj} \cos \omega_{lj} Ti + b_{lj} \sin \omega_{lj} Ti, \quad (8)$$

где  $\mathbf{c}_{lj}^T = (a_{lj}, b_{lj}, \omega_{lj})$  – амплитудные и частотные параметры локальных моделей. На основе локальных наблюдений и локальных моделей сформированы локальные функционалы:

$$S(\mathbf{c}_{lj}, \mathbf{y}_{lj}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \mathbf{y}_l(T(i + N(j-1))) - \mathbf{y}_{M_l}(\mathbf{c}_{lj}, Ti) \right)^2. \quad (9)$$

Произведено оценивание локальных параметров  $\mathbf{c}_{lj}$  при помощи решения задач минимизации функционалов  $S(\mathbf{c}_{lj}, \mathbf{y}_{lj})$ , на основе найденных оценок  $\mathbf{c}_{lj}^\circ$  вычислены оценки функций доплеровских частот  $f_{d_l}^\circ(Ti)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{lj}^\circ &= \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_{lj}} S(\mathbf{c}_{lj}, \mathbf{y}_{lj}) \right\}, \\ \omega_{lj}^\circ(Ti) &= \omega_{lj}^\circ, \mathbf{f}_{d_l}^\circ(Ti) = \sum_{j=1}^m \omega_{lj}^\circ(Ti) / 2\pi. \end{aligned} \quad (10)$$

Сформированы модельные функции:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{dM_l}(f_0, \mathbf{d}, Ti) &= f_0 \Psi_{d_l}(\mathbf{d}, Ti), \\ \Psi_{d_l}(\mathbf{d}, Ti) &= \left( 1 - \frac{v(x_e(0) + vTi) - x_{pl}}{c_0 \sqrt{(x_e(0) + vTi) - x_{pl}}^2 + (y_e(0) - y_{pl})^2}} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mathbf{d}^T = (x_e(0), y_e(0), v)$ . Функционал  $S(f_0, \mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_l}^\circ)$  записан следующим образом:

$$S(f_0, \mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_l}^\circ) = \sum_{l=1}^{L_f} \sum_{i=0}^{N_f-1} \left( \mathbf{f}_{d_l}^\circ(Ti) - f_0 \Psi_{d_l}(\mathbf{d}, Ti) \right)^2. \quad (12)$$

При фиксированных значениях  $\mathbf{d}$  вычислено оптимальное значение  $f_0^\circ(\mathbf{d})$  на основе решения системы линейных уравнений. Функционал  $S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_l}^\circ)$  записан с учетом найденной оценки  $f_0^\circ(\mathbf{d})$ . Оценивание параметров  $x_e(0)$ ,  $y_e(0)$ ,  $v$  реализовано при помощи решения задачи минимизации функционала  $S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_l}^\circ)$ :

$$\mathbf{d}^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{d} \in D} S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_l}^\circ) \right\}, \mathbf{d}^\circ = (x_e^\circ(0), y_e^\circ(0), v^\circ), f_0^\circ = f_0^\circ(\mathbf{d}^\circ). \quad (13)$$

Вычисление координат  $x_e^\circ(Ti)$ ,  $y_e^\circ(Ti)$  произведено на основе полученных оценок  $x_e^\circ(0)$ ,  $y_e^\circ(0)$ ,  $v^\circ$ :

$$x_e^\circ(Ti) = x_e^\circ(0) + v^\circ Ti, y_e^\circ(Ti) = y_e^\circ(0). \quad (14)$$

**2. Алгоритм пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем.** Реализация указанного алгоритма выполнена в виде программы для ЭВМ с регистрацией в Роспатенте (свидетельство № 2015615858). На вход алгоритма (программы) поданы сигналы дискретного времени.

Наблюдаемый дискретный сигнал  $\mathbf{y}(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , разделен на  $m$  локальных отрезков  $(N(j-1) \leq i \leq Nj-1)$  по  $N$  точек,  $j = 1, \dots, m$ ,  $Nm = N_f$ ,  $N_f T = t_f$ . Введены локальные полигармонические модели:

$$\mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) = \sum_{n=1}^L (a_{nj} \cos \omega_{nj} Ti + b_{nj} \sin \omega_{nj} Ti), \quad (15)$$

где  $\mathbf{c}_j^T = (a_{1j}, \dots, a_{Lj}, b_{1j}, \dots, b_{Lj}, \omega_{1j}, \dots, \omega_{Lj})$  – вектор параметров локальных моделей. Сформирована последовательность локальных функционалов  $S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j)$ :

$$S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \mathbf{y}(T(i + N(j-1))) - \mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) \right)^2. \quad (16)$$

Для фиксированных нелинейных параметров  $\omega_{nj}$  поиск частично оптимальных линейных параметров  $a_{nj}^\circ(\omega_{nj})$ ,  $b_{nj}^\circ(\omega_{nj})$  осуществлен на основе решения систем линейных уравнений. Сформированы частично



оптимальные функционалы  $S(a_{nj}^\circ(\omega_{nj}), b_{nj}^\circ(\omega_{nj}), \omega_{nj}, \mathbf{y}_j)$ . Поиск оптимальных параметров моделей реализован на основе минимизационного подпоиска по частотам  $\omega_{nj} \in \Omega_{nj}$  с учетом  $\Omega_{nj} \subset \mathcal{C}_j$ :

$$\omega_{nj}^\circ = \arg \left\{ \min_{\omega_{nj} \in \Omega_{nj}} S(a_{nj}^\circ(\omega_{nj}), b_{nj}^\circ(\omega_{nj}), \omega_{nj}, \mathbf{y}_j) \right\}, \quad (17)$$

$$a_{nj}^\circ = a_{nj}^\circ(\omega_{nj}), b_{nj}^\circ = b_{nj}^\circ(\omega_{nj}).$$

Вычисление оценок доплеровских частотных функций  $\mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti)$  произведено на основе полученных оценок  $\omega_{nj}^\circ(Ti) = \omega_{nj}^\circ$ ,  $\mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti) = \sum_{j=1}^m \omega_{nj}^\circ(Ti)/2\pi$ . Сформированы модельные функции  $\mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti)$ :

$$\mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti) = f_{0n} \left( 1 + \frac{v(x_p - (x_n(0) + vTi))}{c_0 \sqrt{(x_p - (x_n(0) + vTi))^2 + (y_p - y(0))^2}} \right), \quad (18)$$

где  $\mathbf{d}^T = (x_n(0), y_n(0), v_n)$ . Функционал  $S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_n}^\circ)$  записан в следующем виде:

$$S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_n}^\circ) = \sum_{n=1}^L \sum_{i=0}^{Nm-1} (\mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti) - \mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti))^2. \quad (19)$$

Решение задачи минимизации функционала позволило реализовать оценивание параметров  $x_n(0), y_n(0), v_n$ :

$$\mathbf{d}^\circ = \arg \{ \min_{\mathbf{d} \in D} S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d_n}^\circ) \}, \mathbf{d}^\circ = (x_n^\circ(0), y_n^\circ(0), v^\circ), \quad (20)$$

$$f_{0n}^\circ = f_{0n}^\circ(\mathbf{d}^\circ).$$

Полученные оценки позволили, при определенных условиях, реализовать пространственное разрешение для системы акустических излучателей:

$$x_n^\circ(Ti) = x_n^\circ(0) + v^\circ Ti, y_n^\circ(Ti) = y_n^\circ(0). \quad (21)$$

**3. Алгоритм фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем.** Разработанный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ и зарегистрирован в Роспатенте (свидетельство № 2015615863). На вход поданы последовательности чисел, представляющие собой дискретные по времени сигналы.

Дискретный наблюдаемый сигнал  $\mathbf{y}(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , разбит на  $m$  малых локальных отрезков  $(N(j-1) \leq i \leq Nj-1)$  по  $N$  точек,  $j = 1, \dots, m$ ,  $Nm = N_f$ ,  $N_f T = t_f$ . Аппроксимация локальных наблюдений осуществлена с помощью дискретных двухчастотных локальных моделей  $\mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti)$ :

$$\mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) = \sum_{n=1}^2 (a_{nj} \cos \omega_{nj} Ti + b_{nj} \sin \omega_{nj} Ti), \quad (22)$$

где  $\mathbf{c}_j^T = (a_{1j}, b_{1j}, \omega_{1j}, a_{2j}, b_{2j}, \omega_{2j})$  – вектор параметров локальных моделей. Сформирована последовательность локальных функционалов  $S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j)$ :

$$S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j) = \sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{y}(T(i + N(j-1)))) - \mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti))^2. \quad (20)$$

Оценки параметров локальных моделей реализованы на основе последовательности оптимизационных задач локальной аппроксимации:

$$\mathbf{c}_j^\circ = \arg \left\{ \min_{\mathbf{c}_j \in \mathcal{C}_j} S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j) \right\}. \quad (21)$$

На их основе вычислены оценки отфильтрованных функций доплеровских частот  $\mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti)$ ,  $\mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti) = \sum_{j=1}^m \boldsymbol{\omega}_{nj}^\circ(Ti)/2\pi$ . Сформированы параметрические модели для доплеровских частотных функций  $\mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti)$ :

$$\mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti) = f_{0_n} \left( 1 - \frac{v(x(0)+vTi-x_p)}{c_0 \sqrt{(x(0)+vTi-x_p)^2 + (y_n(0)-y_p)^2}} \right). \quad (22)$$

где  $\mathbf{d}^T = (x(0), y(0), v)$ . Образован функционал:

$$S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d^\circ}) = \sum_{n=1}^2 \sum_{i=0}^{N_f-1} \left( \mathbf{f}_{d_n}^\circ(Ti) - \mathbf{f}_{dM_n}(\mathbf{d}, Ti) \right)^2. \quad (23)$$

Оценка вектора  $\mathbf{d}^\circ$  осуществлена на основе минимизацию функционала:

$$\mathbf{d}^\circ = \arg \{ \min_{\mathbf{d} \in D} S(\mathbf{d}, \mathbf{f}_{d^\circ}) \}, \mathbf{d}^\circ = (x^\circ(0), y^\circ(0), v^\circ), f_{0_n}^\circ = f_{0_n}^\circ(\mathbf{d}). \quad (24)$$

Вычисление координат  $x^\circ(Ti)$ ,  $y_1^\circ(Ti)$  произведено при помощи полученных оценок  $x^\circ(0)$ ,  $y^\circ(0)$ ,  $v^\circ$ :

$$x^\circ(Ti) = x^\circ(0) + v^\circ Ti, y_1^\circ(Ti) = -y^\circ(0). \quad (25)$$

**4. Алгоритм оценивания доплеровских скоростей для радиосистем.** Реализация данного алгоритма произведена в виде программы для ЭВМ. На вход алгоритма (программы) поданы сигналы дискретного времени.

Дискретный наблюдаемый доплеровский сигнал  $\mathbf{y}(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , разделен на  $m$  локальных отрезков  $(N(j-1) \leq i \leq Nj-1)$  по  $N$  точек,  $j = 1, \dots, m$ ,  $Nm = N_f$ ,  $N_f T = t_f$ . Произведена аппроксимация наблюдений полигармоническими локальными моделями:

$$\mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) = \sum_{l=1}^L (a_{lj} \cos \omega_{lj} Ti + b_{lj} \sin \omega_{lj} Ti), \quad (26)$$

где  $\mathbf{c}_j^T = (a_{1j}, \dots, a_{Lj}, b_{1j}, \dots, b_{Lj}, \omega_{1j}, \dots, \omega_{Lj})$  – вектор параметров локальных моделей. Сформирована последовательность локальных функционалов  $S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j)$ , зависящих от модельных параметров:

$$S(\mathbf{c}_j, \mathbf{y}_j) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \mathbf{y}(T(i + N(j-1))) - \mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) \right)^2. \quad (27)$$

Поиск оценок  $a_{lj}^\circ(\omega_{lj})$ ,  $b_{lj}^\circ(\omega_{lj})$  при фиксированных значениях частот сведен к решению систем линейных уравнений. Сформированы функционалы  $S(a_{lj}^\circ(\omega_{lj}), b_{lj}^\circ(\omega_{lj}), \omega_{lj}, \mathbf{y}_j)$ . Произведен поиск оптимальных параметров локальных моделей при помощи минимизационного подпоиска функционалов по  $\omega_{lj} \in \Omega_{lj}$ :

$$\mathbf{c}_j^\circ = \arg \left\{ \min_{\omega_{lj} \in \Omega_{lj}} S(a_{lj}^\circ(\omega_{lj}), b_{lj}^\circ(\omega_{lj}), \omega_{lj}, \mathbf{y}_j) \right\}. \quad (28)$$

Оценки функций доплеровских скоростей  $\mathbf{v}_d^\circ(Ti)$  реализованы на основе полученных оценок локальных параметров:

$$\mathbf{v}_{d_j}^\circ(Ti) = \mathbf{v}_{d_j}^\circ(\mathbf{c}_j^\circ, Ti), \mathbf{v}_d^\circ(Ti) = \sum_{j=1}^m \mathbf{v}_{d_j}^\circ(Ti). \quad (29)$$

**5. Алгоритм оценивания доплеровских скоростей вибрирующих объектов для лазерных систем.** Указанный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ с регистрацией в Роспатенте (свидетельство № 2015615859). На вход поданы дискретные по времени сигналы.

Дискретный наблюдаемый сигнал  $\mathbf{y}(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , разделен на  $m$  локальных отрезков  $(N(j-1) \leq i \leq Nj-1)$  по  $N$  точек,  $j = 1, \dots, m$ ,  $Nm = N_f$ ,  $N_f T = t_f$ . Модель сигнала для локального отрезка представлена в виде взвешенной суммы:

$$\mathbf{y}_M(\mathbf{c}_j, Ti) = c_{1j} \boldsymbol{\psi}_1(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) + c_{2j} \boldsymbol{\psi}_2(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti), \quad (30)$$

$$\boldsymbol{\psi}_1(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) = 1, \boldsymbol{\psi}_2(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) = \cos\left(2\pi \int_0^{Ti} \frac{2}{\lambda_0} \mathbf{v}_{dM}(\bar{\mathbf{c}}_j, T\tau) d\tau\right),$$

где  $\mathbf{c}_j^T = (c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}, \bar{\mathbf{c}}_j)$  – вектор локальных параметров,  $\boldsymbol{\psi}_1(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti)$ ,  $\boldsymbol{\psi}_2(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti)$  – базисные функции. Сформирован локальный функционал:

$$S(c_{1j}, c_{2j}, \bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{y}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \mathbf{y}(Ti) - c_{1j} \boldsymbol{\psi}_1(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) - c_{2j} \boldsymbol{\psi}_2(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) \right)^2. \quad (31)$$

Оценки  $c_{1j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j)$ ,  $c_{2j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j)$  вычислены при фиксированных значениях  $\bar{\mathbf{c}}_j$  на основе решения системы линейных уравнений второго порядка. Частично оптимальная остаточная сумма сформирована в виде:

$$S(\bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{y}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \mathbf{y}^2(Ti) - c_{1j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j) \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{y}(Ti) \boldsymbol{\psi}_1(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) - c_{2j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j) \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{y}(Ti) \boldsymbol{\psi}_2(\bar{\mathbf{c}}_j, Ti) \right). \quad (32)$$

На основе минимизационного подпоиска  $S(\bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{y})$  по нелинейным параметрам  $\bar{\mathbf{c}}_j \in \bar{\mathcal{C}}_j$  произведена оценка:

$$\bar{\mathbf{c}}_j^\circ = \arg \left\{ \min_{\bar{\mathbf{c}}_j \in \bar{\mathcal{C}}_j} S(\bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{y}) \right\}. \quad (33)$$

На основе полученных значений  $\bar{\mathbf{c}}_j^\circ$  вычислены оценки доплеровской скорости на локальных отрезках,  $\mathbf{v}_{d_j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j^\circ, Ti) = \mathbf{v}_{d_j}^\circ(\bar{c}_{1j}^\circ, \dots, \bar{c}_{kj}^\circ, Ti)$ . Оценка функции доплеровской скорости реализована в виде суммы локальных оценок:

$$\mathbf{v}_d(\bar{\mathbf{c}}^\circ, Ti) = \sum_{j=1}^m \mathbf{v}_{d_j}^\circ(\bar{\mathbf{c}}_j^\circ, Ti). \quad (34)$$

В рамках диссертационного исследования проводилась постобработка данных от доплеровских систем. Структура разработанных алгоритмов допускает распараллеливание проводимых вычислений. Следовательно, возможна реализация данных алгоритмов в виде параллельных программ, что сокращает время работы и позволяет применять их в системах, работающих в режиме реального времени.

**В четвертом разделе** определены погрешности разработанных метода и алгоритмов оценивания координат и скоростей объектов на

основе статистического моделирования. Выбор параметров моделирования и моделей шума сделан в соответствии с характерными кинематическими ситуациями.

**1. Погрешности оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем.** Дискретные модели наблюдаемых сигналов  $y_l(Ti)$  сформированы на основе схемы движения объекта (рис. 1) и соотношения (3):

$$y_l(Ti) = E_l(Ti) \cos \varphi_{d_l}(Ti) + w_l(i), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1, \quad l = 1, \dots, L,$$

где  $w_l(i)$  – аддитивный нормальный шум с дисперсиями  $\sigma_{w_1}^2 = \dots = \sigma_{w_L}^2 = \sigma_w^2$ . Содержание шумов в наблюдениях определено отношением сигнал/шум  $n$ ,  $n = 10 \log_{10}(P_s/P_w)$  дБ, где  $P_s$  – средняя мощность полезного сигнала,  $P_w$  – средняя мощность шума.

Для процедуры статистического моделирования сформированы  $\bar{s}$  реализаций последовательностей шумов  $w_{ls}(i)$  и зашумленных наблюдений  $y_{ls}(Ti)$ ,  $s = 1, \dots, \bar{s}$ . При помощи предложенного алгоритма № 1 вычислены оценки начальных координат  $x_{e_s}^\circ(0, \sigma_w, L)$ ,  $y_{e_s}^\circ(0, \sigma_w, L)$  и скорости объекта  $v_s^\circ(\sigma_w, L)$  в зависимости от величин дисперсий  $\sigma_w^2$  и количества приемников  $L$ . Значения погрешностей полученных оценок определены с помощью формул:

$$\sigma_x(\sigma_w, L) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (x_{e_s}^\circ(0, \sigma_w, L) - x_e(0))^2},$$

$$\sigma_y(\sigma_w, L) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (y_{e_s}^\circ(0, \sigma_w, L) - y_e(0))^2},$$

$$\sigma_v(\sigma_w, L) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (v_s^\circ(\sigma_w, L) - v)^2}.$$

Погрешности оценивания координат движущегося объекта описаны в следующем виде:

$$\sigma_x^2(Ti) = \sigma_x^2(\sigma_w, L) + \sigma_v^2(\sigma_w, L)(Ti)^2, \quad \sigma_y^2(Ti) = \sigma_y^2(\sigma_w, L).$$

Погрешности оценивания начальных координат (рис. 6) и скорости объекта получены для набора значений  $\sigma_w = \{0.001, 0.003, 0.005, 0.007\}$ ,  $L = 1 - 5$ ,  $\bar{s} = 40$ .

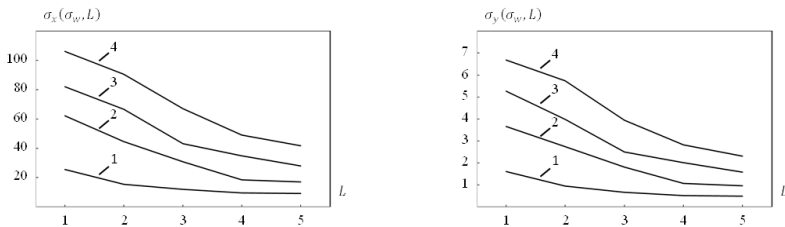


Рис. 6. Погрешности оценивания начальных координат объекта  $\sigma_x(\sigma_w, L)$ ,  $\sigma_y(\sigma_w, L)$

Оценки погрешностей координаты объекта  $\sigma_x(x_e(0), L)$  (рис. 7) вычислены в зависимости от его начальной координаты  $x_e(0)$  (примерно соответствует дальности) и количества приемников  $L = 1, 3, 5$  для значений  $\sigma_w = 0.001$  и  $t_f = 50$  с.

Для начальных координат  $x_e(0) = -1500$  м,  $y_e(0) = 50$  м и скорости объекта  $v = 10$  м/с в наихудшем случае одного приемника  $L = 1$  и отношения сигнал/шум  $n_1 = 44$  дБ ( $\sigma_w = 0.007$ ) погрешность оценивания координат составила величину  $\sigma \approx 110$  м ( $\sigma_x \approx 110$  м,  $\sigma_y \approx 6.5$  м). В наилучшем случае  $L = 5$  и  $n_{1-5} = 59$  дБ ( $\sigma_w = 0.001$ ) погрешность составила величину  $\sigma \approx 11$  м ( $\sigma_x \approx 10$  м,  $\sigma_y \approx 0.7$  м). Оценивание скорости объекта по предложенному алгоритму выполнено с малой погрешностью  $\sigma_v = 0.0001$  м/с, что обусловлено высокой несущей частотой акустического излучателя.

На локальных интервалах укладывалось большое число периодов наблюдаемого сигнала, что приводило к достаточно точной аппроксимационной подгонке по доплеровской частоте локальных моделей. Границы применимости по дальности разработанного алгоритма

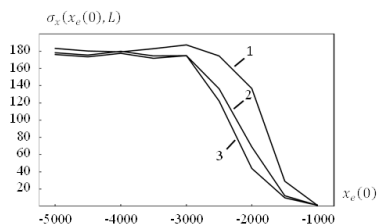


Рис. 7. Оценки погрешностей  $\sigma_x(x_e(0), L)$

увеличивались в зависимости от числа используемых приемников. Так, для  $L = 1, 3, 5$  предельные дальности составили значения  $\bar{x}_e(0) \approx \{-1500, -1750, -2000\}$  м. Энергетический метод оценивания дистанции и бутстреп-метод решают близкие задачи с большими в  $\approx 3$  раза погрешностями. Исходя из вышеперечисленного, сделан вывод, что предложенный алгоритм оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем оказался работоспособным и точным.

**2. Эффективность пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем** (рис. 2). Для апробации работы алгоритма предложена задача, основанная на обработке экспериментального акустического полигармонического сигнала. Из априорных сведений известны координаты приемника и примерный диапазон значений средних частот излучателей. На предварительном этапе обработки путем узкополосной фильтрации в частотном диапазоне  $\approx (49 - 52)$  Гц и спектрального анализа сигнала было выявлено, что в сигнале присутствуют две выделяющиеся частотные составляющие со средними частотами  $f_{10} = 50.20$  Гц,  $f_{20} = 50.50$  Гц.

Реализована цифровая обработка дискретного доплеровского сигнала аналогичного (4) с помощью предложенного алгоритма № 2. На первом этапе получены оценки доплеровских частот в виде кусочно-постоянных функций времени (рис. 8, индекс 1). На втором этапе с помощью аппроксимационной задачи

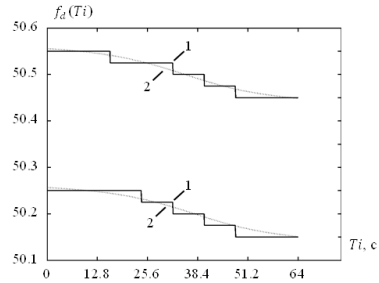


Рис. 8. Оценки доплеровских частот  $f_d^\circ(Ti)$

найлены оценки начальных координат и скоростей излучателей равные следующим значениям:  $x_1^\circ(0) = 75$  м,  $x_2^\circ(0) = 81$  м,  $y^\circ(0) = 52$  м,  $v^\circ = 2$  м/с. На основе полученных оценок вычислены оценки доплеровских частот в виде гладких функций (рис. 8, индекс 2). Исходя из того, что шаг дискретности перебора составил значение 1 м, а разность оценок координат  $x_1^\circ(0) = 75$  м,  $x_2^\circ(0) = 81$  м больше погрешности из-за шага перебора, сделан вывод, что рассмотренные акустические излучатели пространственно разрешены. Предложенные метод и алгоритм пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем оказались работоспособными.

**3. Погрешности фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем.** Дискретный наблюдаемый сигнал  $y(Ti)$  сформирован с учетом схемы движения объекта (рис. 3) и соотношения (5) и представлен модельной формулой:

$$y(Ti) = E_1(Ti) \cos \varphi_{d_1}(Ti) + E_2(Ti) \cos \varphi_{d_2}(Ti) + w(i),$$

$$i = 0, 1, \dots, N_f - 1, l = 1, \dots, L,$$

где  $w_l(i)$  – аддитивный нормальный шум с дисперсией  $\sigma_w^2$ .

Для процедуры статистического моделирования сформированы последовательности дискретных шумов  $w_{l_s}(i)$  и зашумленных наблюдений  $y_s(Ti)$ ,  $s = 1, \dots, \bar{s}$ . В результате работы предложенного алгоритма № 3 найдены оценки начальных координат  $x_s^\circ(d_1(0), \rho)$ ,  $y_s^\circ(d_1(0), \rho)$  и скоростей объекта  $v_s^\circ(d_1(0), \rho)$  в зависимости от величины коэффициента сигнал/шум  $\rho$  и начальной дальности  $d_1(0)$ . Значения погрешностей найденных оценок вычислены с помощью формул:

$$\sigma_x(d_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (x_s^\circ(d_1(0), \rho) - x(0))^2},$$

$$\sigma_y(d_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (y_s^\circ(d_1(0), \rho) - y(0))^2},$$

$$\sigma_v(d_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (v_s^\circ(d_1(0), \rho) - v)^2}.$$

Погрешности оценивания координат движущегося объекта описаны следующим образом:

$$\sigma_x^2(Ti) = \sigma_x^2(d_1(0), \rho) + \sigma_v^2(d_1(0), \rho)(Ti)^2, \quad \sigma_y^2(Ti) = \sigma_y^2(d_1(0), \rho).$$

Погрешности оценивания декартовых координат объекта  $\sigma_x(d_1(0), \rho)$  (рис. 9) получены для набора значений  $d_1(0) = \{2159.3, 1662.1, 1167.3\}$  м,  $t_f = 50$  с и  $\bar{s} = 40$ .

Как показало статистическое моделирование предложенного алгоритма для начальной дальности  $d_1(0) = 1662$  м и скорости объекта  $v = 10$  м/с, погрешность оценивания

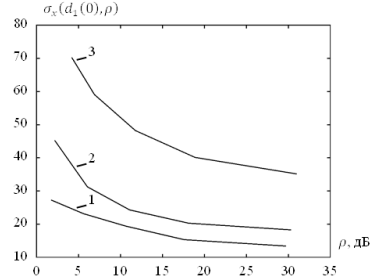


Рис. 9. Погрешности оценивания декартовых координат объекта  $\sigma_x(d_1(0), \rho)$

координат составила величину  $\sigma \approx 15.1$  м ( $\sigma_x \approx 15$  м,  $\sigma_y \approx 0.7$  м) при отношении сигнал/шум  $\rho = 30.15$  дБ и величину  $\sigma \approx 65.2$  м ( $\sigma_x \approx 65$  м,  $\sigma_y \approx 6.5$  м) при отношении сигнал/шум  $\rho = 6.07$  дБ. Оценивание доплеровских скоростей (частот) с применением разработанного алгоритма произведено с погрешностью  $\approx 0.01\%$ .

Алгоритм фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем также апробирован на модельных тональных сигналах. Дискретный наблюдаемый сигнал  $y(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ , задан модельным соотношением:

$$\begin{aligned} y(Ti) &= E_1(Ti) \cos \varphi_{d,1}(Ti) + E_2(Ti) \cos \varphi_{d,2}(Ti) + w_y(i, \sigma_w), \\ E_1(Ti) &= d_1(0)/d_1(Ti), \quad \varphi_{d,1}(Ti) = 2\pi f_0(Ti - d_1(Ti)/c_0) + \varphi_{d0,1}, \\ E_2(Ti) &= d_2(0)/d_2(Ti) + w_E(i, \sigma_E), \\ \varphi_{d,2}(Ti) &= 2\pi f_0(Ti - d_2(Ti)/c_0) + w_\varphi(i, \sigma_\varphi), \end{aligned}$$

где  $w_E(i, \sigma_E) = \sigma_E \sqrt{-2 \ln(U_i)} \cdot \frac{d_2(0)}{d_2(Ti)}$  – шум с Рэлеевским распределением,  $\sigma_E$  – среднеквадратическое отклонение,  $U_i$  – случайное число, равномерно распределенное на отрезке  $[0; 1]$ ;  $w_\varphi(i, \sigma_\varphi) = \sigma_\varphi U_i \cdot \frac{d_2(0)}{d_2(Ti)}$  – шум с равномерным распределением,  $\sigma_\varphi$  – коэффициент, характеризующий мощность шумовой составляющей;  $w_y(i, \sigma_w)$  – шум с нормальным распределением,  $\sigma_w$  – среднеквадратическое отклонение, характеризующее мощность шумовой составляющей.

Для процедуры статистического моделирования сформировано  $\bar{s} = 50$  реализаций последовательностей шумов  $w_y(i, \sigma_w)$ ,  $w_E(i, \sigma_E)$ ,

$w_\varphi(i, \sigma_\varphi)$ ,  $\sigma_W = 1, 2, \dots, 5$ ,  $\sigma_E = 1, 2, \dots, 5$ ,  $\sigma_\varphi = 1, 2, \dots, 5$  и зашумленных наблюдений  $\mathbf{y}(Ti)$ . При помощи разработанного алгоритма получены зависимость оценок начальных координат  $\mathbf{x}_s^\circ(\rho)$ ,  $\mathbf{y}_s^\circ(\rho)$  объекта в зависимости от отношения сигнал/шум  $\rho$  в третьоктавной полосе. Значения погрешностей вычислены при помощи формул:

$$\sigma_x(\rho) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (\mathbf{x}_s^\circ(\rho) - \mathbf{x}(0))^2}, \quad \sigma_y(\rho) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (\mathbf{y}_s^\circ(\rho) - \mathbf{y}_1(0))^2}.$$

Графики оценок погрешностей при максимальном искажении сигнала в рамках выбранных параметров моделирования представлены на рис. 10.

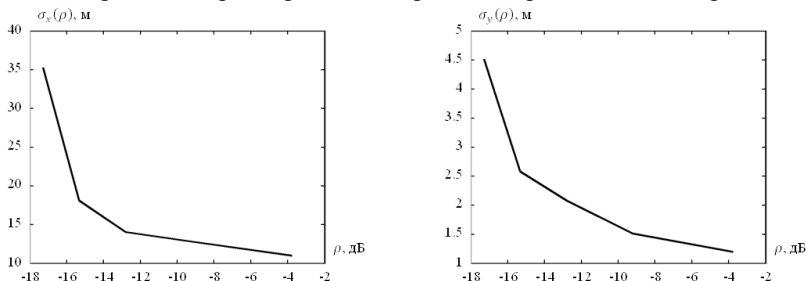


Рис. 10. Погрешности оценивания начальных координат объекта  $\sigma_x(\rho)$  и  $\sigma_y(\rho)$

Погрешность оценивания скорости объекта составила пренебрежительно малое значение  $\approx 0.0001$  м/с, поэтому погрешности вычисления координат определены значениями  $\sigma_x(\rho)$  и  $\sigma_y(\rho)$ . Приемлемая относительная погрешность от оцениваемого значения начальной координаты  $x(0) = 1500$  м задана равной 1%, исходя из чего, помехоустойчивость предложенного алгоритма при допустимом значении  $\sigma_x = 15$  м определена отношением сигнал/шум  $\rho = -13.5$  дБ.

Метод на основе ослабляющей интерференции прямого и отраженного сигналов при схожих параметрах эксперимента показывают в  $\approx 4$  раза худшие значения погрешностей.

Оценки координат, полученные на основе цифровой обработки реальных гидроакустических сигналов по предложенному алгоритму с учетом априорной информации, оказались удовлетворительно точными. Разработанный алгоритм фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем подтвердил свою работоспособность.

Работоспособность созданного алгоритма подтверждена его использованием ФГУП ВНИИФТРИ при разработке подсистемы измерения параметров движения тональных источников звука в рамках выполнения эскизного проекта ОКР Батарея-ТОФ.

**4. Погрешности оценивания доплеровских скоростей для радиосистем** (рис. 5) получены с помощью двухэтапного математического моделирования. Принято, что объект двигался со



скоростью, возрастающей за  $\approx 0.1 - 5$  мс от нулевого до установившегося значения  $\approx 1000$  м/с. На первом этапе аналогично (6) сформирована последовательность дискретных зашумленных наблюдений  $\mathbf{y}(Ti)$ ,  $i = 0, \dots, N_f - 1$ :

$$\mathbf{y}(Ti) = \mathbf{E}(Ti) \cos(\Delta f_h Ti + \boldsymbol{\varphi}_d(Ti) + \varphi_{d0}) + \mathbf{E}_p(Ti) \cos(\Delta f_p Ti + \boldsymbol{\varphi}_{dp}(Ti) + \varphi_{dp}) + \mathbf{w}(i),$$

где  $\boldsymbol{\varphi}_d(Ti)$ ,  $\mathbf{w}(i)$  – аддитивный нормальный шум с дисперсией  $\sigma = 0.25$ . На втором этапе при помощи разработанного алгоритма № 4 получены оценки доплеровской скорости объекта  $\mathbf{v}_d^\circ(Ti)$  в виде последовательности локальных кусочно-постоянных функций (рис. 11).

Предложенный алгоритм обеспечил достаточно точное оценивание доплеровской скорости с погрешностью равной  $\sigma_v = (20 - 40)$  м/с, что на  $\approx 10\%$  меньше характеристик точности известных устройств. Проведенное математическое моделирование подтвердило работоспособность алгоритма оценивания доплеровских скоростей для радиосистем.

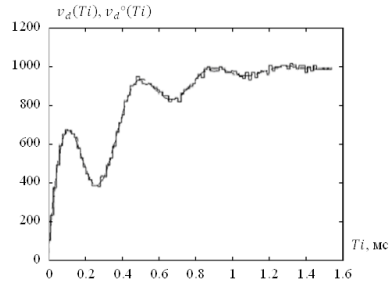


Рис. 11. Исходная функция доплеровской скорости  $\mathbf{v}_d(Ti)$  и ее оценка  $\mathbf{v}_d^\circ(Ti)$

**5. Погрешности оценивания доплеровских скоростей вибрирующих объектов для лазерных систем** (рис. 5). Наблюдаемый сигнал  $\mathbf{y}(Ti)$  в дискретном виде представлен модельной формулой аналогичной (7):

$$\mathbf{y}(Ti) = E_{01} + E_{02} \cos(\delta \boldsymbol{\varphi}_d(Ti)) + \mathbf{w}(i), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1,$$

где  $\mathbf{w}(i)$  – аддитивный нормальный шум с дисперсией  $\sigma_w^2$ .

Для процедуры статистического моделирования сформирован набор  $\bar{s}$  реализаций последовательностей шумов  $\mathbf{w}_s(i)$  и зашумленных наблюдений  $\mathbf{y}_s(Ti)$ ,  $s = 1, \dots, \bar{s}$ . Для каждой реализации  $\mathbf{y}_s(Ti)$  осуществлены вычисления оценок функций доплеровских скоростей  $\mathbf{v}_{d_s}^\circ(Ti) = \mathbf{v}_{d_s}^\circ(\sigma_w, N, Ti)$  на основе алгоритма № 5 аппроксимации кусочно-линейными моделями. Полученные оценки зависели от среднеквадратичных значений шумов наблюдений  $\sigma_w$  и числа точек  $N$  на локальном интервале. Вычисление погрешностей оценивания доплеровской скорости произведено при помощи следующих формул:

$$\sigma_{v_{d_s}}^2(\sigma_w, N) = \frac{1}{N_f} \sum_{i=0}^{N_f-1} \left( \mathbf{v}_d(Ti) - \mathbf{v}_{d_s}^\circ(\sigma_w, N, Ti) \right)^2,$$

$$\sigma_{v_d}(\sigma_w, N) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} \sigma_{v_{d_s}}^2(\sigma_w, N)}.$$

На рис. 12 представлены результаты вычисления погрешностей оценивания доплеровской скорости  $\sigma_{v_d}(\sigma_w, N)$  для набора значений  $\sigma_w = \{0.1, 0.3, 0.5\}$ ,  $N = \{10, 25, 50, 75\}$  и  $\bar{s} = 150$ .

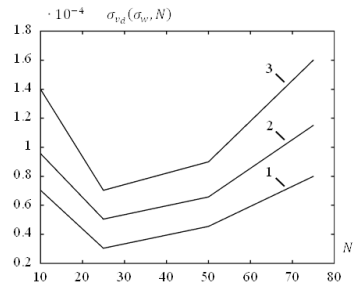


Рис. 12. Погрешности оценивания доплеровской скорости  $\sigma_{v_d}(\sigma_w, N)$

Из физических соображений очевидно, что погрешности оценивания доплеровской скорости зависят от величины  $N$  локальных интервалов. Точность

решения задачи оценивания определена степенью соответствия функции исходной доплеровской скорости и ее модели. Как показало статистическое моделирование предложенного алгоритма, среднеквадратичное значение погрешности оценивания доплеровской скорости составило величину  $\approx (3 - 8)\%$  от значения амплитуды синусоидальной затухающей доплеровской скорости  $v_0 = 0.001$  м/с для оптимального локального интервала  $N \approx 25$ . Так погрешность разработанного алгоритма меньше на  $\approx 40\%$  по сравнению с методом наименьших квадратов для восстановления спектра сложных колебаний и на  $\approx 50\%$  по сравнению с методом восстановления функции движения колеблющегося объекта.

Статистическое моделирование работы разработанного алгоритма показало удовлетворительную точность оценивания функций доплеровской скорости. Созданный алгоритм продемонстрировал свою работоспособность, что подтверждено его внедрением ООО ИНТЕРЮНИС-ИТ в рамках проекта по разработке систем вибрационного мониторинга Лель-М/А-Line 32D (DDM-M).

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача создания, исследования эффективности и применения метода и алгоритмов оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских систем на основе локальных аппроксимационных моделей. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования в рамках технологии системного анализа и цифровой обработки информации позволили сделать следующие выводы:

1. Разработанный метод цифровой обработки сигналов от доплеровских систем обеспечивает эффективное вычисление координат и скоростей объектов на основе произведенных наблюдений и моделей доплеровских сигналов благодаря предложенному математическому аппарату, базирующемуся на локальных аппроксимационных моделях и нелинейном программировании.
2. Созданный метод и система алгоритмов оценивания координат и скоростей объектов на основе локальных аппроксимационных моделей для доплеровских систем позволяет решать широкий круг прикладных задач, содержит научную новизну и является практически значимой.
3. Разработанный алгоритм оценивания координат и скоростей объектов для доплеровских акустических систем работает на дальних дистанциях и не требует длительных наблюдений. Для случая 5 приемников и отношения сигнал/шум 59 дБ при начальной координате объекта (-1500, 50) м погрешность оценивания координат равнялась величине  $\approx 11$  м. Граница применимости по дальности составила 2000 м.
4. Реализованный алгоритм пространственного разрешения излучателей для доплеровских акустических систем является работоспособными и позволяет различать объекты, находящиеся на малых расстояниях друг от друга и генерирующие излучения на близких или равных частотах.
5. Созданный алгоритм фильтрации помеховых отражений для доплеровских акустических систем является работоспособным и позволяет определять положение движущихся объектов в пространстве для случаев флюктуирующих рассеянных отражений, аналогичных отражениям, возникающим от взволнованной водной поверхности. Помехоустойчивость предложенного алгоритма определена отношением сигнал/шум составляющим -13.5 дБ для погрешности равной 1% от оцениваемого значения начальной координаты порядка 1500 м.
6. Разработанный алгоритм оценивания доплеровских скоростей объектов для доплеровских радиосистем принят эффективным и позволяет производить оценку быстроизменяющихся скоростей с учетом внешних помеховых возмущений. Для случая разгона объекта с нуля до  $\approx 1000$  м/с за  $\approx 0.1 - 5$  мс погрешность оценивания доплеровской скорости составляет величину равную (20-40) м/с, что является положительным показателем для практики доплеровских систем.
7. Реализованный алгоритм оценивания доплеровских скоростей вибрирующих объектов для лазерных систем показывает удовлетворительную работоспособность и не требуют наличия гетеродина в составе устройства, что значительно упрощает его конструкцию. Для оптимального интервала локальной аппроксимации среднее квадратичное значение относительной погрешности оценивания доплеровской скорости составляет величину  $\approx (3 - 8)\%$ .

8. Практическая реализация разработанных алгоритмов выполнена в виде набора программ для ЭВМ, осуществляющих оценивание координат и скоростей объектов на основе цифровой обработки сигналов, получаемых от доплеровских систем. Указанные программы зарегистрированы в Роспатенте и имеют соответствующие свидетельства.

9. Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены ФГУП ВНИИФТРИ при выполнении эскизного проекта ОКР Батарея-ТОФ, реализуемого в соответствии с Государственным заказом, и ООО ИНТЕРЮНИС-ИТ в рамках проекта по разработке систем вибрационного мониторинга Лель-М/А-Line 32D (DDM-M).

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах.

***В журналах, входящих в перечень ВАК и представленных в базе данных научной периодики Scopus:***

1. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Оценивание параметров движения источника звука на основе цифровой обработки системы доплеровских гидроакустических сигналов // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57. – № 4. – С. 479-484 (есть пер. на англ. яз.: **Getmanov V.G., Firsov A.A.** Estimation of Parameters of Motion of a Moving Sound Source by Digital Processing of a Set of Doppler Shifted Underwater Acoustic Signals. *Acoustical Physics*. 2011. Vol. 57. No. 4. pp. 490-495).

2. **Гетманов В.Г., Модяев А.Д., Фирсов А.А.** Метод измерения координат движущегося объекта с помощью пассивной локационной гидроакустической системы // Измерительная техника. – 2012. – № 3. – С. 21-26 (есть пер. на англ. яз.: **Getmanov V.G., Modyaev A.D., Firsov A.A.** A Method of Measurement of the Coordinates of a Moving Object with the Use of a Passive Hydroacoustic Detection and Ranging System. *Measurement Techniques*. 2012. Vol. 55. No. 3. pp. 248-256).

3. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Аппроксимационная фильтрация помеховых отражений в гидроакустических сигналах для задачи измерения координат движущегося объекта с помощью пассивной гидролокационной системы // Измерительная техника. – 2013. – № 8. – С. 53-58 (есть пер. на англ. яз.: **Getmanov V.G., Firsov A.A.** Approximate Filtration of Noise Reflections in Hydroacoustic Signals. *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56. No. 8. pp. 919-927).

***В журналах, входящих в перечень ВАК:***

4. **Битюков В.К., Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Технология пространственного разрешения системы звуковых излучателей на основе

двухэтапного алгоритма цифровой обработки гидроакустических сигналов // Научное издание. – № 10. – 2010. – С. 6-13.

***Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:***

5. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615860. – 26.05.2015. – Роспатент.

6. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615858. – 26.05.2015. – Роспатент.

7. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615863. – 26.05.2015. – Роспатент.

8. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615859. – 26.05.2015. – Роспатент.

***В других изданиях:***

9. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Алгоритм оценивания доплеровских виброскоростей для системы дистанционного виброконтроля на основе лазерного интерферометра // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – Тез. докл. – М.: Издательский дом МЭИ. 2011. – Т. 1. – С. 479-480.

10. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Бесконтактное измерение вибраций на основе лазерного компьютерного интерферометра // XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов Молодежь и наука. – Тез. докл. – М.: НИЯУ МИФИ. 2012. – Ч. 3. – С. 51-52.

11. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Система бесконтактного виброконтроля на основе лазерного компьютерного виброметра с использованием аппроксимационных алгоритмов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – Тез. докл. – М.: Издательский дом МЭИ. 2012. – Т. 2. – С. 160-162.

12. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Применение аппроксимационных алгоритмов в радиолокационной системе измерения доплеровских скоростей // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. – Сб. науч. тр. – М.: РНТОРЭС имени А.С. Попова. 2012. – Сер.: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – Вып. XIV-1. – Т. 1. – С. 65-68.

13. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Алгоритм оценивания вибрационных параметров для систем дистанционного виброконтроля // XVI Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и

студентов Молодежь и наука. – Тез. докл. – М.: НИЯУ МИФИ. 2013. – Ч. 3. – С. 103.

14. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Алгоритм оценивания параметров вибрации для систем дистанционного контроля // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XIX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – Тез. докл. – М.: Издательский дом МЭИ. 2013. – Т. 2. – С. 134.

15. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Алгоритм аппроксимационной фильтрации помеховых отражений в гидроакустических сигналах // XVII Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов Молодежь и наука. – Тез. докл. – М.: НИЯУ МИФИ. 2014. – Ч. 3. – С. 79-80.

16. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Аппроксимационные алгоритмы оценивания виброскоростей для доплеровских систем акустического, радио и оптического диапазонов // XX Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. – Тез. докл. – М.: Издательский дом Спектр. 2014. – С. 347-350.

17. **Фирсов А.А., Гетманов В.Г.** Методы оценивания параметров движения цели в доплеровских локационных системах // XVIII Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов Молодежь и наука. – Тез. докл. – М.: НИЯУ МИФИ. 2015. – Ч. 3. – С. 34.

18. **Гетманов В.Г., Фирсов А.А.** Применение доплеровских систем акустического, радио и оптического диапазонов для неразрушающего контроля конструкций атомной отрасли // Труды сессии РАН и деловой программы форума Территория NDT 2016. – Сб. науч. тр. – М.: Издательский дом Спектр. 2016. – С. 115-118.