

На правах рукописи

Соколов Анатолий Игоревич

**МЕТОД МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
ЭХОСИГНАЛА ПРИ ОЦЕНИВАНИИ СКОРОСТИ В  
ДОПЛЕРОВСКОМ ЛАГЕ**

Специальность 05.13.01. – Системный анализ, управление и  
обработка информации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» – Государственный  
научный центр Российской Федерации

Научный руководитель  
Дмитриев Сергей Петрович,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты  
Челпанов Игорь Борисович,  
доктор технических наук, профессор

Осюхин Борис Александрович,  
кандидат технических наук

Ведущая организация  
ЗАО «Аквамарин»

Защита состоится 25 декабря 2009 года в 16 часов на заседании диссертационного  
совета ДС 411.007.01 при ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» по адресу:  
197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Концерн «ЦНИИ «Элек-  
троприбор».

Автореферат разослан 24 ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Колесов Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** На сегодняшний день возрастают требования к технико-эксплуатационным характеристикам доплеровских измерителей скорости морских объектов, информация от которых совместно с данными от приборов курсоуказания позволяет вести непрерывное автономное счисление, а также используется для коррекции других технических средств навигации (например, демпфирование ИНС) и для автоматического управления движением. Основными из этих требований являются точность оценивания скорости и быстродействие при выработке оценок. При этом оценка должна вычисляться с учетом изменения скорости объекта, вызванного внешними возмущениями и возможным маневрированием объекта.

В настоящее время в доплеровских измерителях скорости движения объекта применяются алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье реализации эхосигнала, с достаточной адекватностью аппроксимируемого узкополосным случайным процессом, свойства которого определяются неоднородностью отражающей поверхности, конечной шириной диаграммы направленности, условиями распространения, шумом приемника и т.п. Фундаментальные исследования, касающиеся механизма возникновения, структуры и свойств эхосигнала в доплеровском лаге, изложены в работах Б.А. Осюхина, А.А. Хребтова, К.А. Виноградова, В.Н. Кошкарёва, В.И. Бородина, В.В. Ольшевского, Г.В. Яковлева, Г.Е. Смирнова, Н.А. Толстяковой. Важно отметить, что использование эмпирического спектра случайного отраженного сигнала требует осреднения и взвешивания периодограмм. Выполнение этих операций требует значительного времени, что приводит к задержке в определении скорости движения объекта.

Оказывается возможным при аппроксимации спектральной плотности эхосигнала использовать ее дробно-рациональное представление, открывающее возможность описания эхосигнала в форме пространства состояний, а, следовательно, удастся привлечь аппарат оптимального оценивания параметров аппроксимирующей модели для оценивания информативного параметра – доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала.

Настоящая работа направлена на оптимизацию алгоритма оценивания доплеровского сдвига частоты эхосигнала путем решения задачи идентификации пара-

метра отраженного сигнала, отвечающего за центральную частоту спектра. В качестве метода предложено многоальтернативное решение на основе банка фильтров Калмана. Такое решение направлено на минимизацию дисперсии ошибки оценки параметра модели. Подробно многоальтернативный подход применительно к ряду нелинейных навигационных задач изложен в работах С.П. Дмитриева, О.А. Степанова, А.Е. Пелевина, А.К. Розова. За счет использования предлагаемого метода время решения задачи выработки скорости движения морского подвижного объекта сокращается до  $2 \div 5$  с (вместо обычно используемых  $30 \div 60$  с), что особенно актуально для маневренных объектов, например, для глубоководных подводных аппаратов. Следует отметить, что задача оценивания скорости решается в условиях наличия на входе приемника эхосигнала, принимаемого на фоне шума приемника в общем случае с неизвестным, но большим или равным 1 соотношением сигнал/шум, т.е. предполагается выявление отражающего слоя, найденного в результате решения не рассматриваемой в данной работе задачи обнаружения сигнала.

Все вышесказанное определяет актуальность и важность разработки на основе аппарата оптимальной нелинейной фильтрации более совершенного алгоритма решения задачи оценивания доплеровского сдвига частоты эхосигнала и обоснования его применимости путем исследования чувствительности алгоритма к неопределенности знания модели эхосигнала.

**Цель работы** – на основе методов теории нелинейной фильтрации разработать для доплеровского лага морского объекта алгоритм, обладающий повышенными показателями по точности и быстродействию выработки скорости.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- приведено обоснование возможности использования стохастического описания эхосигнала в виде узкополосного случайного процесса.
- проанализированы существующие методы оценивания скорости объекта.
- постановлена задача оценивания параметра модели эхосигнала, отвечающего за центральную частоту спектра случайного процесса.
- выполнен сравнительный анализ результата решения задачи банком стационарных фильтров Винера и банком нестационарных фильтров Калмана.

- исследована точность многоальтернативного алгоритма, основанного на банке фильтров Калмана и известных методов оценивания скорости.
- исследована чувствительность многоальтернативного алгоритма к неопределенности параметров и структуры аппроксимирующей модели.
- метод многоальтернативной фильтрации эхосигнала апробирован в опытном образце гидроакустического доплеровского лага.
- подтверждена эффективность предложенного алгоритма оптимального оценивания скорости движения объекта путем моделирования и в условиях натурных испытаний гидроакустического лага.

**Методы исследований.** В работе использовался аппарат теории вероятности и математической статистики, теории линейной и нелинейной оптимальной фильтрации, матричной алгебры, а также методы математического моделирования и обработки экспериментальных данных, проведение натурального эксперимента.

#### **Научная новизна**

- Для решения задачи оценивания скорости в доплеровском лаге в диссертации предложено использование метода многоальтернативной фильтрации эхосигнала, основанного на дробно-рациональной аппроксимации спектральной плотности узкополосного эхосигнала, с оценкой параметра модели, отвечающего за центральную частоту спектра.
- Выполнено сопоставление многоальтернативных фильтров Винера и Калмана при оценке параметров модели сигнала. Выявлена нецелесообразность использования банка стационарных фильтров Винера из-за его неработоспособности в условиях работы доплеровского лага при малых глубинах под килем, т.е. при приеме коротких реализаций эхосигнала.
- Детально проанализирован традиционно используемый в современных доплеровских измерителях скорости «частотный» подход, основанный на определении эмпирической оценки спектральной плотности эхосигнала. Выявлены значительные ошибки оценивания скорости связанные с несостоятельностью эмпирической оценки спектральной плотности эхосигнала.

- Путем математического моделирования с использованием метода Монте-Карло получены значения погрешностей при оценивании скорости методами максимума функции правдоподобия и многоальтернативной фильтрации. Сделан вывод о более высокой точности и быстродействии метода многоальтернативной фильтрации.
- Проведен анализ чувствительности предложенного подхода к неопределенности типа и параметров принятой модели. Подтверждена малая чувствительность алгоритма многоальтернативной фильтрации.

### **Практическая ценность**

В ходе выполнения работы получены следующие результаты, имеющие практическую ценность:

- Разработанный алгоритм оценки параметра модели эхосигнала, отвечающего за скорость объекта, позволяет решать задачу оценивания в реальном времени.
- Метод многоальтернативной фильтрации эхосигнала использован в опытном образце доплеровского лага. Эффективность метода подтверждена при проведении натурных испытаний в акватории Ладожского озера, а также в период опытной эксплуатации на глубоководном аппарате в Баренцевом море. Среднее значение ошибки продольной составляющей скорости объекта за 512 с не превысило 0.025 узла на пяти пробегах.

**Апробация работы.** Материалы работы докладывались на XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2007 г.; на IX, X и XI конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением», 2007, 2008, 2009 г.

**Публикации.** По материалам диссертации имеется 8 опубликованных работ, из них 1 статья и 3 реферата докладов в научно-техническом журнале, рекомендуемом ВАК, 3 доклада в сборниках материалов докладов, проводимых в Санкт-Петербурге конференций молодых ученых «Навигация и управление движением» и 1 реферат доклада в сборнике трудов XVI международного научно-технического семинара 2007 в г. Алушта.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, содержащего 64 наименования. Объем работы составляет 107 страниц, включая 47 рисунков, 4 таблицы и 2 приложения.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Расширение области применения метода многоальтернативной фильтрации на задачу оценивания доплеровского сдвига частоты эхосигнала.
2. Результаты сопоставления эффективности работы банка стационарных фильтров Винера и банка нестационарных фильтров Калмана в поставленной задаче.
3. Результаты сравнительного анализа точности и быстродействия при выработке оценок скорости методами максимума функции правдоподобия и многоальтернативной фильтрации.
4. Результаты исследования чувствительности многоальтернативного банка фильтров Калмана к неточности знания структуры и параметров аппроксимирующей модели эхосигнала.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы и определены основные задачи исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, отражены научная новизна и практическая ценность работы, приводится перечень методов проведения исследований.

**В первой главе** диссертации изложено: обоснование возможности использования стохастического описания эхосигнала в виде узкополосного случайного процесса; проанализирован вариант описания эхосигнала в виде случайного поля; описан механизм формирования эхосигнала применительно к доплеровскому лагу; выбрана наиболее адекватная математическая модель аппроксимации эхосигнала, характеризующаяся дробно-рациональной спектральной плотностью и соответствующей системой дифференциальных уравнений для вектора состояния.

В главе отражается необходимость использования для описания эхосигнала стохастической модели, в силу наличия следующих эффектов:

- диаграмма направленности при излучении и приеме имеет конечную ширину, приводя к набору лучей с разными значениями углов  $\theta$ ;
- отражение определяется шероховатостью поверхности дна, приводящей к набору отраженных лучей различной мощности, для каждого из которых в силу геометрии характерен свой доплеровский сдвиг;
- неоднородность области распространения лучей приводит к нелинейному характеру траектории луча.

В диссертации указано, что полный учет всех факторов, влияющих на формирование эхосигнала при построении математической модели, возможен только теоретически. На практике в силу отсутствия достоверной информации прибегают к упрощению описания эхосигнала, передавая его стохастический узкополосный характер. Тем не менее, этот факт не приводит к потере общности, т.к. при наличии качественной информации о факторах, влияющих на формирование эхосигнала и приводящих к деформации его спектра, возможен их учет либо непосредственно при формировании модели, либо путем выработки поправок к оценке скорости, полученной по более простой математической модели.

Рассмотрено описание эхосигнала в раскрыве приемной антенны в форме пространственно-временного случайного поля донного рассеяния и последующего представления отраженного сигнала в частотно-пространственном или частотно-волновом виде. Делается вывод, что применение обобщения в форме случайного поля эффективно для решения ряда специфических задач, требующих учета пространственных переменных, например, в гидроакустике и радиолокации при обнаружении и идентификации объектов для обеспечения безопасности и т.п., а также при описании геофизических полей и т.д.

Применительно к доплеровскому измерителю скорости при фиксированном направлении излучения и приема отраженного сигнала использование модели эхосигнала в форме случайного поля не приносит дополнительной информативности, т.к. пространственные координаты не увеличивают набор исходных данных для последующего учета в алгоритмах обработки при работе в дальней зоне, когда принимаемое поле представляется как результат падения плоской волны на антенну. Поэтому далее рассматривается эхосигнал как временной случайный процесс.



В качестве достаточно адекватной аппроксимации эхосигнала, передающей факт асимметрии спектра и удобной для последующей обработки, принимается математическая модель в виде стационарного случайного процесса с дробно-рациональной спектральной плотностью:

$$S_z(\omega) = \frac{2\sigma^2\alpha(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия процесса;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры модели, определяющие ширину и центральную частоту спектральной плотности. Данная модель, позволяет определить эхосигнал как решение системы дифференциальных стохастических уравнений для вектора состояний второго порядка. Следует также отметить, что в случае потребности более полного учета факторов, влияющих на деформацию доплеровского спектра, возможна аппроксимация эхосигнала в дробно-рациональной форме более высокого полрядка, нежели (1).

В первой главе приведены выражения, связывающие параметры спектральной плотности в виде (1) с основными характеристиками доплеровского эхосигнала – центральной частотой

$$\omega^* \cong \beta, \quad (2)$$

а также шириной полосы частот:

$$\Delta_f = \alpha. \quad (3)$$

Приведено описание эхосигнала в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t), \quad (4)$$

$$z(t) = Cx(t), \quad (5)$$

где  $A$  – матрица динамики системы;  $B$  – матрица интенсивности порождающих шумов;  $z(t)$  – выход системы;  $C$  – матрица наблюдений.

Применительно к спектральной плотности (1) получено:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \sqrt{2\alpha\sigma^2} w \\ \dot{x}_2 = -(\alpha^2 + \beta^2) x_1 - 2\alpha x_2 + \sqrt{2\alpha\sigma^2} (\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} - 2\alpha) w \\ z = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

Эхосигнал на входе приемника представляется в виде:

$$y(t) = z(t) + v(t), \quad (7)$$

где  $z(t)$  – случайный процесс со спектральной плотностью вида (1);  $v(t)$  – аддитивный белый шум с интенсивностью  $R$ , представляющий, в частности, шум приемника. Следует отметить, что описание эхосигнала в виде (1) является одной из возможных аппроксимаций, ее адекватность подтверждена с использованием натуральных данных в главе 4.

**Во второй главе** диссертации описаны свойства эмпирической оценки спектральной плотности стационарного случайного процесса, приведены известные методы определения скорости в доплеровских системах, описаны их особенности, подробно рассмотрен метод максимального правдоподобия в применении к задаче оценивания скорости объекта, проиллюстрирован эффект несостоятельности оценки спектральной плотности в виде периодограммы.

В работе приведена классификация известных методов оценивания скорости объекта (см. табл. 1), часть из которых нашли свое применение в существующих гидроакустических и радиолокационных лагах отечественного и зарубежного производства, например, таких фирм как: Sperry, Magnavox, Ametek Straza, Raytheon (все США), JRC, Furuno (обе Япония), Tomson-CSF (Франция), Krupp Atlas Elektronik (Германия), Consilium Marine (Швеция), АО «РиФ-Аквааппарат» (Молдова), ОАО «Концерн «Океанприбор», ОАО «Концерн «ЦНИИ» Электроприбор».

**Таблица 1. Классификация методов оценки скорости объекта в доплеровских системах.**

<b>Временная область</b>	<b>Частотная область</b>
Метод «счета нулей» реализации эхосигнала	Метод определения положения максимума спектра эхосигнала
Метод максимального правдоподобия при использовании оценки корреляционной функции эхосигнала	Метод фильтрации узкополосными прямоугольными фильтрами
	Метод максимального правдоподобия при использовании периодограммы
	Поиск максимума свертки ожидаемого и принятого спектра

В настоящее время большинство методов оценивания скорости объекта базируется на определении доплеровского сдвига в частотной области с использованием преобразования Фурье эхосигнала. Во второй главе рассмотрены два способа нахождения оценки спектральной плотности (СП). Первый базируется на отыскании преобразования Фурье реализации сигнала  $s_T(\omega)$  на интервале времени  $T$ . Второй

способ предполагает отыскание оценки корреляционной функции и последующее использование преобразования Винера-Хинчина.

В рамках диссертации отмечается, что оценка корреляционной функции является несмещенной и состоятельной при  $T \rightarrow \infty$ . Это означает, что оценивая СП путем преобразования Фурье от состоятельной оценки корреляционной функции мы получаем состоятельную оценку  $S(\omega)$ . Но практическое использование данного способа оценивания СП сильно затруднено из-за неэкономичности алгоритма оценивания корреляционной функции и нереализуемости условия  $T \rightarrow \infty$ .

В виду развития вычислительной техники и наличия алгоритма быстрого преобразования Фурье на сегодняшний день оценку СП находят с помощью вычисления периодограммы.

В диссертации отмечается, что оценка СП в виде периодограммы является несмещенной, но несостоятельной. При этом дисперсия ошибки оценки СП стремится к  $S^2(\omega)$  при  $T \rightarrow \infty$ . В силу этого для отыскания эффективной оценки СП необходимо осреднять периодограммы, полученные по множеству независимых реализаций, а значит, требуется длительное время накопления данных.

Основное внимание во второй главе уделено методу максимального правдоподобия (ММП).

Содержание ММП определяется решением задачи оценивания скорости:

$$\hat{V} = V_{j^*} = \arg \max_{j=1 \dots N} \{F(y_0^T | V_j)\}, \quad (8)$$

где  $y$  – реализация эхосигнала на интервале  $0, T$ , принимаемого антенной приемника, как правило, выполненной в форме антенной решетки (АР);  $F(y_0^T | V_j)$  – функция плотности распределения.

Для частотной области максимум (8) достигается в случае максимизации выражения:

$$\Lambda(p(y_0^T | V_j)) = \frac{T}{\pi q} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{S}(\omega) \Phi_{y_0}(\omega | V_j) d\omega. \quad (9)$$

Здесь  $\hat{S}(\omega)$  – эмпирическая оценка спектральной плотности эхосигнала;  $q$  – отношение сигнал/шум;  $T$  – длительность эхосигнала;  $\Phi_{y_0}(\omega | V_j)$  – эталонная характери-

стика оптимального фильтра при оценке скорости по критерию максимального правдоподобия:

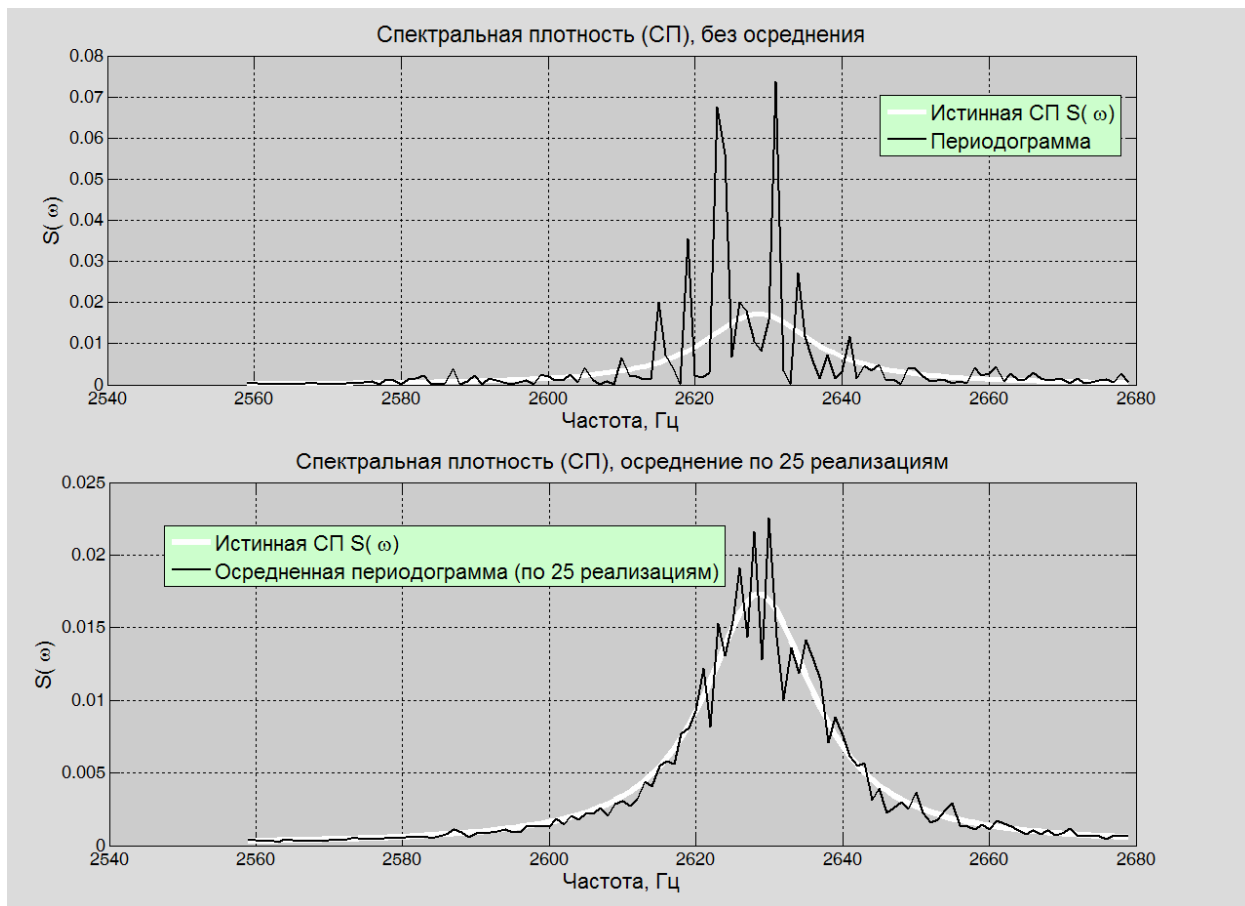
$$\Phi_{\dot{y}_0}(\omega | V_j) = \frac{S_{\dot{y}_0}(\omega | V_j)}{\frac{q}{2} + S_{\dot{y}_0}(\omega | V_j)}, \quad (10)$$

где  $S_{\dot{y}_0}(\omega | V_j)$  – эталонная спектральная плотность эхосигнала для значения  $V_j$ , учитывающая спектр излученного сигнала, вид характеристики направленности излучающей и приемной антенн, значение коэффициента рассеяния, затухание в среде, расстояние до дна и т.п.

В диссертации отмечается, что неопределенности, вызванные вышеперечисленными факторами, «преодолеваемые» целым рядом допущений, могут привести к существенному несоответствию «эталонной» и действительной плотностей, порождающему дополнительные погрешности при решении задачи (8). Эти скрытые дефекты, не учитываемые при решении задачи, не позволяют также адекватно оценивать точность на основе неравенства Рао-Крамера.

В указанных ситуациях для оценки точности и выбора аппроксимации плотности применим метод Монте-Карло. Используемое при этом моделирование позволяет также оценить чувствительность алгоритма ММП к тем или иным неопределенностям моделей.

В диссертации наглядно проиллюстрирован эффект несостоятельности оценки СП (рис. 1). Моделирование проводилось для частоты излучения  $f_E = 100$  кГц, скорости  $V = 5$  уз, после переноса спектра на промежуточную частоту  $f_{ix} = 2.5$  кГц, длительности приема сигнала  $T = 1$  с и при отношении сигнал/шум 10. Большие флуктуации оценки спектральной плотности связаны со свойством несостоятельности оценки СП.



**Рис. 1.** Вид оценок спектра при длине реализации модельного эхосигнала 1 с, верхний график – без осреднения, нижний график – с осреднением по 25 независимым реализациям.

В третьей главе диссертации приведена постановка нелинейной задачи оптимального оценивания скорости объекта путем многоальтернативной фильтрации эхосигнала банком фильтров Калмана, проведено сравнение использования многоальтернативных фильтров Винера и Калмана, проверена чувствительность алгоритма многоальтернативной фильтрации к неопределенности знания параметров и структуры модели эхосигнала, выполнена сравнительная оценка точности методов многоальтернативной фильтрации, максимума функции правдоподобия и поиска максимума эмпирического спектра, подтверждающая эффективность многоальтернативного подхода.

В нашем случае метод многоальтернативной фильтрации основывается на использовании банка из  $L$  фильтров Калмана. Каждый фильтр в банке имеет свою настройку (свой набор параметров матриц  $A$  и  $B$  в (4)), соответствующую определенной скорости движения объекта. На вход многоальтернативного фильтра поступают измерения (7), после чего каждый фильтр в банке выполняет фильтрацию входного сигнала и рекуррентно вырабатывает значения невязок и их ковариаций. Значения

невязок и ковариаций невязок используются для определения апостериорных вероятностей:

$$g_j(t) = p(V_j | y(0, t)), \quad j = \overline{1, L} \quad (11)$$

где  $p$  – условная вероятность соответствующего события  $V = V_j$ ,  $y(0, t)$  – входной сигнал (измерения),  $V_j$  – одно из возможных значений скорости объекта.

Оценка скорости вырабатывается путем взвешивания значений  $V_j$  с весами  $g_j$  (учитывая, что  $\sum_{j=1}^L g_j = 1$ ), что обеспечивает оптимизацию оценки

$$\hat{V}(t) = \sum_{j=1}^L g_j(t) V_j \quad (12)$$

по критерию минимума дисперсии ошибки оценки. На рис. 2. проиллюстрирована структура многоальтернативного фильтра.

В работе подробно рассмотрена структура многоальтернативного фильтра при использовании банка стационарных фильтров Винера, делается вывод, что в общем случае, ориентируясь на прикладную задачу оценивания скорости объекта  $\hat{V}$  при малых длительностях эхосигнала (при работе с одной приемопередающей антенной на малых глубинах под килем), получение оптимального результата невозможно. На качественном уровне приводится пояснение полученного результата.

Проанализирована работоспособность алгоритма МАФ на основе банка фильтров Калмана при различном уровне аддитивного шума измерений, отмечено, что алгоритм эффективно решает задачу оценивания скорости при соотношении сигнал/шум не менее 1, при возрастании отношения сигнал/шум уменьшается время решения задачи оценивания.

Путем математического моделирования проверена чувствительность принятого алгоритма многоальтернативной фильтрации к неточности знания структуры и параметров модели. При рассогласованном случае, т.е. когда зашумление эхосигнала значительно отличается от принятого расчетного значения, вероятность неправильного решения возрастает. Показана малая чувствительность к рассогласованию расчетного значения ширины полосы частот эхосигнала по отношению к действительному значению. Более того, в случае, если сигнал имеет более узкополосный харак-

тер, чем настройка банка фильтров Калмана, то выработка верного решения происходит быстрее, в противном случае наоборот. В силу вышеизложенного, для обеспечения качественного оценивания параметра модели  $a_{2l}$  в (6), отвечающего за скорость объекта, следует выбирать робастную настройку фильтров в банке с большей шириной полосы частот, при этом неточность знания интенсивности аддитивного шума (отношения сигнал/шум) не приведет к выработке неверного решения. Также была выявлена незначительная чувствительность алгоритма к типу модели входного сигнала, например, при использовании размерности системы уравнений (6) больше 2-х.

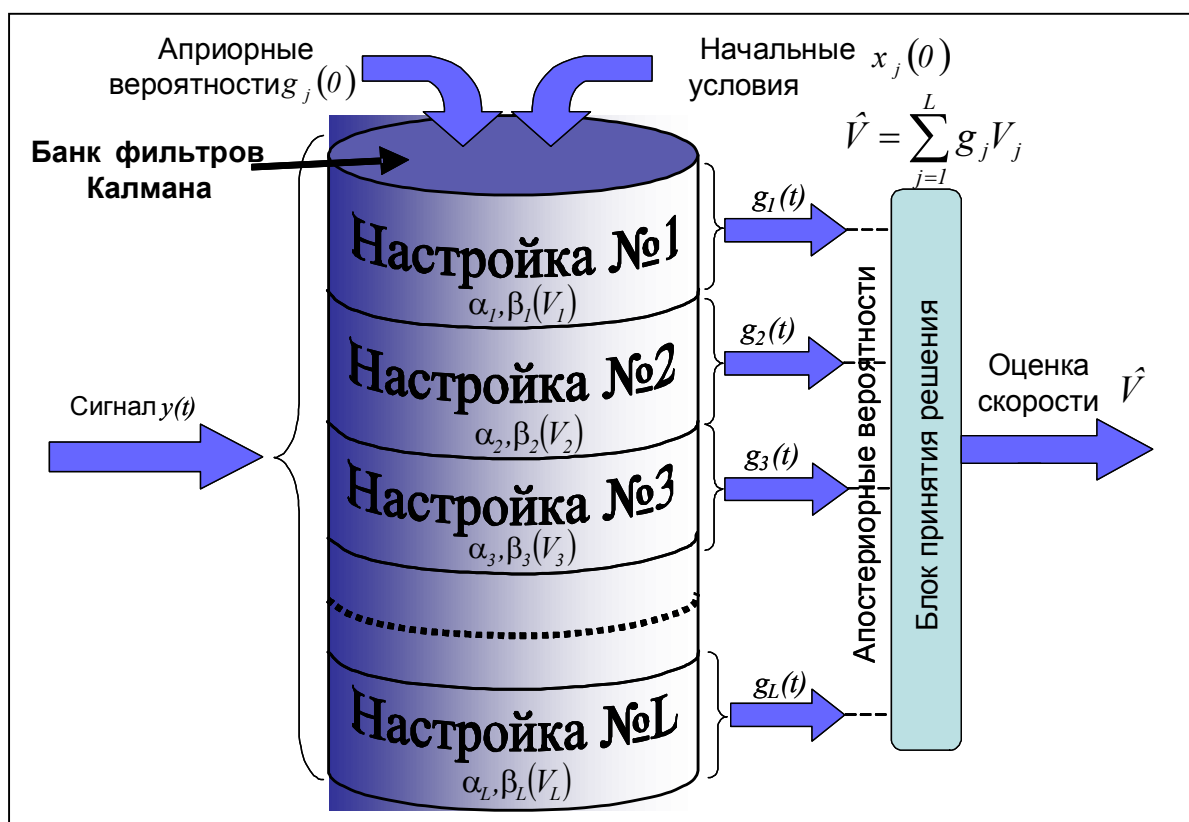


Рис. 2. Структура многоальтернативного фильтра.

В диссертации, используя математическое моделирование в соответствии с методом Монте-Карло, выполнена сравнительная оценка точности многоальтернативного фильтра (МАФ) с ММП и методом поиска положения максимума спектра (см. табл. 2). Результаты моделирования для 25 реализаций модельного эхосигнала длительностью  $l$  с приведены в табл. 2. Делается вывод о повышенной точности МАФ.

Важно отметить, что использование МАФ позволяет оптимизировать оценку скорости во все моменты времени наличия эхосигнала, а также вырабатывать оценку точности путем решения соответствующего ковариационного уравнения.

**Таблица 2. Результаты расчета математического ожидания и среднеквадратического отклонения ошибки оценки скорости.**

Метод	Сигнал/шум	Мат. ожидание ошибки оценки скорости, уз	СКО ошибки оценки скорости, уз
ММП	3	0.025	0.075
МАФ		0.005	0.023
Поиск положения максимума СП		0.006	0.15

В четвертой главе представлены основные аспекты создания и испытаний аппаратуры опытного образца гидроакустического доплеровского лага (ГАЛ) с алгоритмом оценки скорости движения объекта методом многоальтернативной фильтрации.

Приведена программно-аппаратная реализация МАФ в ГАЛ. Про моделирована работа алгоритма в условиях запуска при априори неопределенной скорости объекта.

В работе приводятся методика и результаты испытания ГАЛ с МАФ в акватории Ладожского озера и Баренцевого моря. Описана процедура выработки с требуемой точностью ( $m_{GPS} \leq 0.01$  уз) средних значений продольной и поперечной составляющих эталонной скорости объекта по данным приемника спутниковой навигационной системы (СНС) и гирокурсоуказателя (ГКУ). Отмечается, что в силу наличия погрешности ГКУ на широтах  $\varphi \approx 60^\circ$  уровня (СКП)  $\Delta_K = 0.3^\circ$ , при длительности пробега  $\Delta t = 512$  с и средней скорости  $\bar{V} = 6$  уз, возможна выработка поперечной составляющей «эталонной» скорости только с СКП не менее  $m_{GPSY} = 0.04$  уз, тогда как ожидаемая СКП скорости по ГАЛ  $m_{\dot{A}A\dot{E}} \leq 0.03$  уз. Этот факт не позволяет оценить точность выработки поперечной скорости ГАЛ. Тем не менее, имеется возможность выработки эталонного значения продольной составляющей средней эталонной скорости с СКП  $m_{GPSX} = 0.01$  уз за время  $\Delta t = 512$  с, позволяющей оценить точность ГАЛ.

В табл. 3. приведены результаты проведения точностных испытаний в акватории Ладожского озера, подтверждающие не превышение уровня СКП выработки средней продольной составляющей скорости по ГАЛ с МАФ  $0.03$  уз.



По результатам испытаний были получены также данные об изменчивости показаний скорости ГАЛ, снятые с темпом 1 с на интервале осреднения. Эта изменчивость, вызванная флуктуациями погрешности ГАЛ и непостоянством скорости судна-носителя (волнение моря, ошибка удержания постоянного курса), не превысила по среднеквадратическому значению 0.1 уз, что является оценкой сверху для уровня флуктуаций погрешности ГАЛ. Отметим, что основной вклад в уровень флуктуаций погрешности ГАЛ вносит непостоянство самой скорости движения объекта, вызванное различными причинами. Данные результаты подтверждены протоколами испытаний.

**Таблица 3. Погрешности ГАЛ.  
Глубины под килем от 40 до 120 м. Длительность пробега 512 с.**

Пробег №	Режим, уз	Сред. Курс, град	Скорость, уз				Погрешности на пробеге, уз		Средние погрешности на 5-ти пробегах, уз	
			ГАЛ		«ЭТАЛОН»		$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$mAx$	$mAy$
			$V_{\delta}$	$V_{\gamma}$	$V_{\delta\dot{\gamma}}$	$V_{\dot{\gamma}\dot{\gamma}}$				
1	6.4	165	6.373	0.518	6.396	0.564	0.023	0.046	0.022	0.014
2		165	6.466	0.475	6.491	0.498	0.025	0.023		
3		164	6.416	0.460	6.440	0.471	0.024	0.011		
4		164	6.388	0.448	6.403	0.445	0.015	-0.003		
5		164	6.406	0.471	6.427	0.463	0.021	-0.008		

По результатам испытаний в Баренцевом море удалось выполнить косвенную проверку точности ГАЛ, путем оценки невязки места выработанного по счислению ( $V_{ax}$  и  $V_{ay}$  от ГАЛ, курс  $K$  от ИНС) за сутки автономного подводного плавания при глубинах под килем от 3 до 50 м, скоростях хода подводного аппарата (ПА) до 2 уз. Оценка невязки места была выполнена с помощью повторного выхода на точечный ориентир (ТО) через ~1 сутки плавания при интенсивном и произвольном маневрировании ПА. Значение невязки места за ~24 часа составило ~2 каб., что при пересчете в ошибку вектора скорости составляет  $\Delta V = 0.008$  уз (положив среднюю ошибку курса равной 0).

Отмечается, что косвенный метод проверки точности, проведенный в Баренцевом море, дает сугубо качественную оценку работе ГАЛ, т.к. предполагается повторный выход на ТО, что в свою очередь подразумевает траекторию движения, при которой, возвращаясь в требуемую точку, ПА может «списать» часть погрешности счисления координат, накопленную при удалении от ТО. Тем не менее, полученный результат косвенно свидетельствует о малости флуктуационной составляющей

ошибки оценки скорости ГАЛ с МАФ, а также о надежной и качественной работе ГАЛ с предлагаемым алгоритмом.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Проведен детальный анализ существующих подходов оценивания скорости объекта в гидроакустических и радиолокационных доплеровских лагах, приведены основные особенности и недостатки известных методов.

2. Предложено описание модели эхосигнала в виде дробно-рациональной спектральной плотности, параметры которой зависят от скорости объекта.

3. На основе теории нелинейной фильтрации сформулирована задача оценивания параметра модели, «отвечающего» за значение скорости объекта.

4. Предложен вариант решения задачи многоальтернативной фильтрации в виде банка фильтров Калмана. Показаны преимущества использования банка фильтров Калмана по сравнению с банком фильтров Винера, не учитывающего нестационарный характер режима работы при перезапуске на коротких интервалах приема эхосигнала.

5. Путем моделирования выявлена достаточно низкая чувствительность алгоритма многоальтернативной фильтрации к неточности знания структуры и неинформативных параметров модели эхосигнала.

6. С помощью метода Монте-Карло проведено сопоставление точности оценивания скорости при использовании многоальтернативного фильтра, метода максимального правдоподобия и метода поиска положения максимума спектральной плотности. Точность оценки при использовании многоальтернативного фильтра в 2 – 3 раза превышает точность оценок, полученных другими рассмотренными методами. При этом оценки скорости вырабатывались путем обработки эхосигнала длительностью  $1$  с.

7. Решены задачи практической реализации предлагаемого алгоритма. При этом результаты натурных испытаний опытного образца прибора, подтвердили высокую точность и быстродействие оценивания скорости методом многоальтернативной фильтрации.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дмитриев С.П. Соколов А.И. Оценка сдвига частоты в доплеровском измерителе скорости путем идентификации модели принятого сигнала // Гироскопия и навигация. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», №1, 2006.
2. Соколов А.И. Применение метода спектрального анализа при определении скорости по данным гидроакустического лага // Гироскопия и навигация.– СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», №3, 2005.
3. Соколов А.И. Алгоритм обработки информации доплеровского измерителя скорости с использованием идентификации модели принятого сигнала // Гироскопия и навигация. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», №2, 2006.
4. Соколов А.И. Результаты определения доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала на основе идентификации модели по натурным данным // Гироскопия и навигация. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», №3, 2007.
5. Соколов А.И. Применение метода спектрального анализа при определении скорости по данным гидроакустического лага // Навигация и управление движением. – Сборник трудов VII конференции молодых учёных, СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2005.
6. Соколов А.И. Алгоритм обработки информации доплеровского измерителя скорости с использованием идентификации модели принятого сигнала // Навигация и управление движением. – Сборник трудов VIII конференции молодых учёных, – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
7. Соколов А.И. Многоальтернативная фильтрация в задаче определения доплеровского сдвига частоты эхосигнала. Сопоставление с известными методами и натурный эксперимент // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. – Труды XVI Международного научно-технического семинара. – Алушта–Тула: Изд-во ТулГУ, 2007, стр. 280.
8. Соколов А.И. Многоальтернативная фильтрация в задаче определения доплеровского сдвига частоты, оценка точности и чувствительности. / / Навигация и управление движением. – Сборник трудов X конференции молодых учёных. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2008.

