

На правах рукописи



Мелухов Ярослав Андреевич

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

20 ФЕВ 2014



005545251

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) на кафедре радиотехнических систем

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Орлов Владимир Константинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Волков Владимир Юрьевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов

кандидат технических наук, Коротков Александр Николаевич, Санкт-Петербургский филиал ЗАО «КБ НАВИС», зам. начальника отдела.

Ведущая организация – ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (ОАО «ВНИИРА»), Санкт-Петербург

Защита состоится «01» 04 2014 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «03» 02 2014 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Баруздин С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Постоянное совершенствование авиационной техники, возрастание интенсивности воздушного движения и повышение требований к безопасности полётов приводит к необходимости обеспечения пилота информацией не только о его собственном положении в пространстве, но и об относительном положении ближайших к нему летательных аппаратов (ЛА). В целом ряде видов авиации особенно остро ощущается потребность в проведении групповых полётов ЛА. Управление групповым полетом, поддержание строя, совместное маневрирование представляют собой как для экипажа, так и для наземных служб управления воздушным движением (УВД) задачи более сложные, чем управление полетом одиночного самолета. Обеспечение безопасного полёта большой группы ЛА является важной задачей вблизи аэропортов, где существующие системы УВД уже не могут обеспечить достаточную безопасность полётов в связи с отсутствием возможности создания сплошного радиолокационного покрытия. Таким образом, усовершенствование существующих систем относительной навигации (ОН), основной задачей которых является определение относительных координат взаимодействующих ЛА, является актуальной задачей.

Задача определения взаимных координат должна решаться при взаимодействии большого числа абонентов (до 100 и более ЛА), что, в свою очередь, требует, во-первых, ограничения числа используемых источников (датчиков) навигационной информации и, во-вторых, максимального внимания к вычислительной сложности алгоритмов, реализация которых производится в бортовом радиоэлектронном оборудовании (БРЭО). Минимальный набор используемых датчиков составляют измеритель абсолютных координат (приёмоизмеритель спутниковой радионавигационной системы СРНС) и радиодальномер, обеспечивающий контроль дальности между абонентами.

Наличие независимых оценок относительной дальности от нескольких источников (приёмоизмеритель СРНС и дальномер) влечёт за собой поиск оптимальных алгоритмов формирования единой выходной оценки дальности в системах ОН.

**Целью работы** является синтез алгоритмов, обеспечивающих решение задачи определения взаимных координат в группе взаимодействующих ЛА для систем ОН. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Исследование влияния коррелированности измерений абсолютных координат ЛА на точность оценки относительной дальности.

2. Выбор и обоснование структуры фильтра координатной и дальномерной информации (ФКИ и ФДИ соответственно).

3. Оценка вычислительных затрат, необходимых для аппаратной реализации ФКИ и ФДИ в реальном времени.

4. Разработка эффективных алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности при использовании двух независимых источников (фильтров).

5. Разработка компьютерной модели, позволяющей количественно оценить и провести с требуемой достоверностью сравнение точности определения выходной оценки относительной дальности предложенными алгоритмами комплексирования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы математического анализа, теории вероятностей и теории случайных процессов, методы теории оптимального оценивания, на которых базируются построенные компьютерные и математические модели, что обуславливает их достоверность и обоснованность полученных результатов.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Показано, что учёт влияния взаимной коррелированности ошибок измерения абсолютных координат приводит к незначительному выигрышу в точности оценки относительной дальности.

2. Рассчитана алгоритмическая сложность различных моделей ФКИ и ФДИ, позволяющая определить структуру фильтров вторичной обработки навигационных данных в системах ОН.

3. Предложены оптимальный и три квазиоптимальных алгоритма формирования выходной оценки относительной дальности при наличии двух источников данных (СРНС и дальномер). Проведённое полунатурное моделирование подтвердило работоспособность представленных алгоритмов

4. Проведён анализ работоспособности алгоритмов формирования выходной оценки при наличии различных типов пропаданий (одиночные, пакетные). Показано, что квазиоптимальный алгоритм на основе МНК проигрывает оптимальному методу не более 5% как при одиночных, так и при пакетных пропаданиях.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Влияние коррелированности измерения относительных прямоугольных координат на качество оценок относительной дальности мало. Корреляционная матрица может быть принята диагональной без существенной потери точности.

2. Использование трёх независимых координатных фильтров является оптимальной структурой по критерию «точность/вычислительные затраты».

3. Применение алгоритма многомодельной байесовской фильтрации для повышения качества оценивания относительной дальности при маневрировании ЛА в системах ОН нецелесообразно.

4. Для формирования выходной оценки относительной дальности целесообразно использование алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов.

**Практическая ценность работы.** В работе показано, что учёт влияния взаимной корреляции ошибок измерения параметров (абсолютных координат) на результаты оптимальной фильтрации приводит к незначительному выигрышу в точности, что позволяет принять матрицу ковариации ошибок измерения диагональной, тем самым упростив алгоритмы вторичной обработки навигационной информации. Представлены различные алгоритмы комплексирования оценок относительной дальности от двух источников – фильтра координатной и дальномерной информации (ФКИ и ФДИ соответственно) и установлено, что алгоритм, основанный на методе наименьших квадратов, является оптимальным по критерию «точность/вычислительные затраты». Показана высокая точность оценки относительной дальности при наличии как независимых, так и пакетных пропадания измерений.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на:

- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2010–2012 гг.;
- 67–69-й научно-технических конференциях, посвященных Дню радио, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011–2013 гг.;
- научно-технической школе-семинаре «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире». СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012 г.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 10 печатных трудов. Из них 4 работы опубликованы в центральных рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 6 работ содержится в материалах конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, двух приложений. Она изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 62 рисунка, библиографический список включает 72 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и основные решаемые задачи. Также введение содержит краткое содержание основных разделов работы.

**В первой главе** приведена классификация существующих систем ОН, рассмотрены их достоинства и недостатки. Проведён анализ источников навигационной информации, доступных на борту ЛА. Комплексирование всех источников данных позволяет уменьшить величину погрешности определения относительной дальности, однако, техническая реализация такого подхода в БРЭО ЛА не представляется возможной ввиду их большого количества, как следствие, высокой алгоритмической сложности алгоритма. Таким образом, необходимо задать некий ограниченный набор источников информации. Наиболее точной и доступной является спутниковая радионавигационная система (СРНС), обеспечивающая определение абсолютных координат и скорости ЛА. При обмене между взаимодействующими ЛА информацией, вырабатываемой приёмоизмерителями СРНС, работающими по единому созвездию навигационных спутников, реализуется псевдодифференциальный (относительный) режим, позволяющий свести к минимуму влияние коррелированной составляющей погрешности на измерения относительных координатах объектов. Помимо неоспоримых преимуществ, СРНС имеет и ряд недостатков, связанных с пропаданием измерений абсолютных координат ЛА особенно при маневрировании. Это приводит к тому, что не удаётся удовлетворить требования по точности и надёжности определения взаимных координат. В этих условиях необходимым является одновременное использование навигационных данных, получаемых по каналу информационного обмена, и результатов непосредственных измерений относительных дальностей между всеми взаимодействующими ЛА группы с помощью дальномера.

Проведена оценка количества измеряемых параметров, получаемых одним абонентом группы, состоящей из шести ЛА. Показано, что даже при использовании ограниченного набора датчиков (приёмоизмеритель СРНС и многоабонентная дальномерная система) количество измеряемых параметров достигает величин, чрезмерных для реализации алгоритмов обработки в БРЭО с учётом числа взаимодействующих абонентов. Это требует решения задачи синтеза эффективных и экономных алгоритмов вторичной обработки данных.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели перспективной системы ОН. Проводится обоснование выбора выходной системы координат, в качестве

которой используется местная прямоугольная система координат (МСК), связанная с ЛА, и разработана математическая модель движения объекта в этой системе.

Использование алгоритмов вторичной обработки информации в системах относительной навигации требует задания корреляционной матрицы погрешностей определения относительных координат, получаемых путем обмена данными СРНС. Представлен алгоритм определения корреляционной матрицы в МСК, связанной с ведущим ЛА и проведено исследование влияния её недиагональных элементов на точность оценки относительной дальности.

Представлено обоснование структуры фильтра координатной и дальномерной информации, а также приводится алгоритм определения вычислительной сложности различных структур оптимальных фильтров. Данный алгоритм основан на вычислении общего количества операций перемножения, требующегося для определения вектора состояния системы. На пути практической реализации алгоритмов оптимальной обработки навигационной информации в системах ОН существуют несколько препятствий, среди которых можно выделить:

- Размерность вектора состояния (при большом количестве взаимодействующих ЛА);
- Необходимость расчета элементов матрицы измерений;
- Необходимость расчета коэффициентов передачи фильтра.

Определение оптимальных коэффициентов передачи фильтра связано с операцией обращения матрицы, которая, в случае большой размерности вектора состояния, является очень ресурсоёмкой. Поэтому в данной главе предложены различные структуры квазиоптимальных фильтров и оценена их сложность по сравнению с оптимальными алгоритмами. В качестве ФКИ обосновывается использование трёх независимых фильтров по трём координатам, ФДИ – один фильтр, вектор состояния (ВС) которого имеет три элемента: относительную дальность, радиальную скорость и ускорение.

Проведено моделирование погрешностей измерения радиальных дальностей и абсолютных координат в системе ОН. Представленная модель используется в определении оптимальных (квазиоптимальных) оценок вектора состояния системы ОН.

**Глава три** является продолжением главы 2. В ней представлены результаты моделирования предложенных структур ФКИ и ФДИ при различных моделях движения группы ЛА, состоящей из двух объектов. Помимо использования оптимальных методов рассмотрен синтез квазиоптимальных алгоритмов вторичной обработки (фильтры с постоянными коэффициентами усиления).

Необходимым условием достижения высокой точности оценки вектора состояния в алгоритмах калмановской фильтрации является соответствие модели, заложенной в фильтр, с моделью динамики наблюдаемого объекта. В то же время на практике достаточно тяжело получить информацию о точной модели навигационного параметра. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование многомоделных байесовских алгоритмов, позволяющих повысить точность вычисления оценки вектора состояния. В этом случае принимают, что реальная траектория воздушной цели представляет собой набор ограниченных по времени участков движения, отличающихся видом пространственной кривой и характером движения ЛА. В частности, можно выделить участки прямолинейного равномерного, прямолинейного равноускоренного движения, движения по окружности с постоянной угловой скоростью и т.д. Многомоделные алгоритмы используют несколько фильтров, согласованных с различными участками траектории, взаимодействующих между собой, с последующим объединением их оценок. Существует несколько наиболее распространённых алгоритмов (АММ, GPB1, GPB2 и др.). В данной работе используется интерактивный многомоделный алгоритм (Interacting Multiple-Model (IMM) algorithm), отличающийся простотой реализации. В качестве моделей в алгоритме IMM рассматриваются фильтры с постоянными и переменными (оптимальные) коэффициентами передачи.

Анализ алгоритмов вторичной обработки навигационной информации проводился для группы ЛА, состоящей из двух объектов, для следующих типов движения:

- а) Прямолинейное движение с нулевой относительной скоростью ( $\Delta V = 0$  м/с);
- б) Прямолинейное движение с ненулевой относительной скоростью ( $\Delta V \neq 0$  м/с);
- в) Прямолинейное равноускоренное движение ( $a_i \neq 0$  м/с<sup>2</sup>),  $i = 1, \dots, L$ , где  $L$  – количество ЛА в группе;

г) «Поворот»: один из ЛА движется прямолинейно, другой совершает поворот вокруг первого ЛА в горизонтальной плоскости с постоянной угловой скоростью вращения ( $\omega_2 \neq 0$  рад/с).

На рис. 1, 3, 5 представлены зависимости разности истинного значения параметра и его оценки на всей длительности полёта для двух структур ФКИ с переменными коэффициентами передачи и алгоритма IMM на их основе, а на рис. 2, 4, 6 представлены те же характеристики для квазиоптимальных структур ФКИ с постоянными коэффициентами передачи. Результаты получены для модели в).



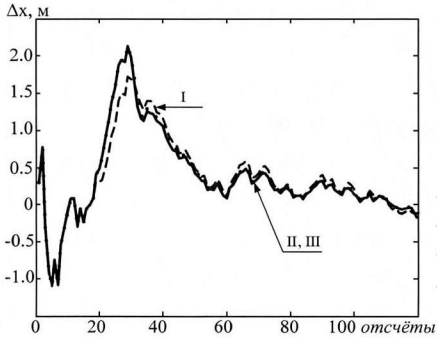


Рисунок 1

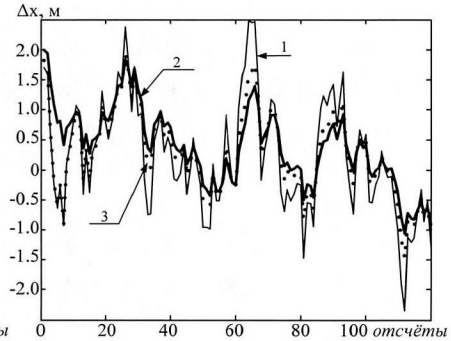


Рисунок 2

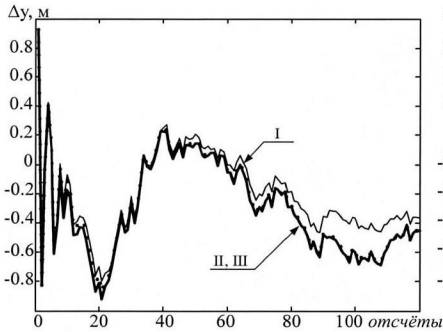


Рисунок 3

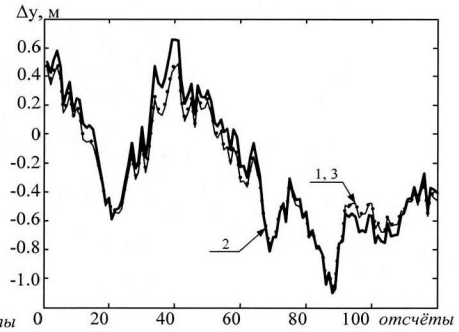


Рисунок 4

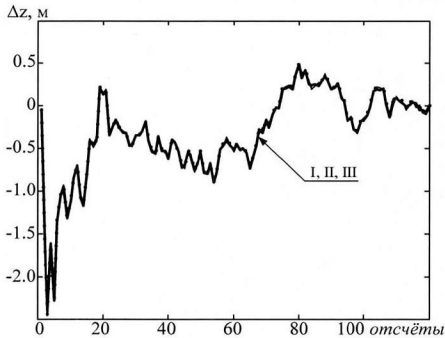


Рисунок 5

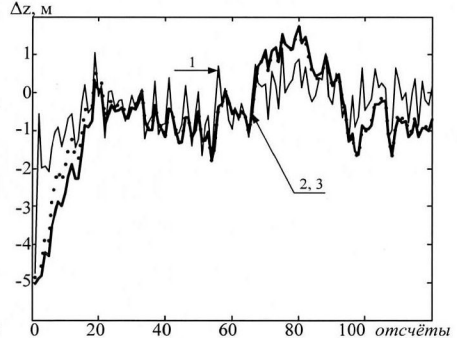


Рисунок 6

В качестве ФКИ выступают три фильтра, ВС которых двухэлементные – координата и составляющая скорости (зависимость I на рис. 1, 3, 5 и 1 на рис. 2, 4, 6 соответственно), а также три фильтра, в ВС которых присутствует компонента ускорения (зависимость II на

рис. 1, 3, 5 и 2 на рис. 2, 4, 6). Результаты использования ИММ алгоритма представлены зависимостями III (3) соответственно. Анализ полученных зависимостей показал, что для рассмотренной модели движения абсолютное значение погрешности определения координаты  $x$  фильтрами I и II не превышает 2,5 м при ошибке измерения 10 м. Точность определения вертикальной координаты (рис. 3, 4) оптимальными фильтрами и с постоянными коэффициентами передачи практически совпадает, что связано с особенностью модели движения группы (вертикальная координата практически не изменяется). Использование алгоритма ИММ в предельном случае позволяет получить выигрыш в точности оценки относительной дальности, равный ~6%.

Для численной оценки качества фильтрации используется среднеквадратическая ошибка (root-mean square error – *RMSE*):

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{X}}_i$$

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\mathbf{X}_{\text{ист},t} - \bar{\mathbf{X}}_i)^2,$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

где  $N$  – количество реализаций (100);  $T$  – длительность реализации (количество отсчётов);  $\bar{\mathbf{X}}_i$  – оценка параметра на  $i$ -ой реализации;  $\mathbf{X}_{\text{ист},t}$  – истинное значение параметра на  $t$ -ом отсчёте (момент времени). Результаты определения оценки относительной дальности различными алгоритмами вторичной обработки навигационной информации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Фильтр	Модель движения			
	RMSE, м			
	а)	б)	в)	г)
1	0,51/0,65	0,54/0,69	0,56/0,71	0,70/0,74
2	0,51/0,68	0,52/0,65	0,53/0,64	0,61/0,70
I	0,61/0,82	0,68/0,88	0,71/0,93	0,74/0,89
II	0,63/0,84	0,65/0,84	0,68/0,86	0,72/0,84
3	0,51/0,66	0,52/0,67	0,54/0,70	0,64/0,71
III	0,62/0,82	0,65/0,85	0,70/0,88	0,72/0,84

Для фильтров с постоянными коэффициентами передачи (строки 3, 4 и 6 настоящей таблиц) значения, записанные после символа «/», соответствуют погрешности, полученной для коэффициентов, одинаковых для каждой из моделей движения. Значения этих коэффициентов выбирались по критерию минимизации суммарной погрешности оценки

параметра для всех рассмотренных моделей движения группы. Для оптимальных фильтров (строки 1, 2 и 5 настоящих таблиц) значения, записанные после символа «/», соответствуют погрешности, полученной для одинаковых значений интенсивности (дисперсии) манёвра.

В четвёртой главе приводится обоснование использования алгоритмов комплексирования измерителей, производится обзор алгоритмов, как на уровне первичной, так и вторичной обработки навигационной информации. Так как в качестве источников информации об относительной дальности выступают СРНС и дальномер, то требуется разработка эффективных алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности.

Предложены четыре алгоритма формирования единой оценки дальности для системы ОН. Методика моделирования представлена на рис. 7. На передающей стороне отсчёты гауссовского шума (ГШ) смешиваются с истинными значениями координат и скоростей, рассчитанными для конкретной модели движения группы ЛА. Шумы предполагаются некоррелированными.

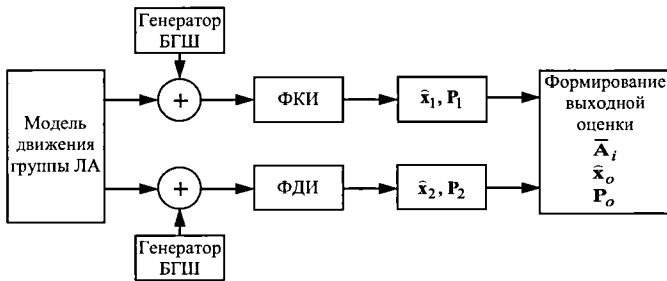


Рисунок 7

На приёмной стороне располагаются две независимые модели фильтра Калмана: ФКИ и ФДИ формируют оптимальную оценку параметров, согласно своему вектору состояния. Затем ВС ФКИ для каждой модели пересчитываются в единый вектор состояния. В конечном блоке производится расчёт весовых коэффициентов  $\bar{A}_i$  и формируются выходная оценка  $\hat{x}_o$  и ковариационная матрица ошибок  $P_o$ .

Выходная оценка  $\hat{x}_o$  определяется следующим выражением:

$$\hat{x}_o = \bar{A}_1 \hat{x}_1 + \bar{A}_2 \hat{x}_2 + \dots + \bar{A}_k \hat{x}_k,$$

где  $\bar{A}_i$  – матрица весовых коэффициентов  $i$ -го источника:

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{E} (\mathbf{E}^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{E})^{-1},$$

где  $\bar{\mathbf{A}} = [\bar{\mathbf{A}}_1, \bar{\mathbf{A}}_2, \dots, \bar{\mathbf{A}}_k]^T$ ,  $\mathbf{E} = [\mathbf{I}_n, \dots, \mathbf{I}_n]^T$  – матрицы размерностью  $nk \times n$ ;  $\mathbf{G}$  – положительно определённая матрица размерности  $nk \times nk$  ( $\mathbf{G} = (\mathbf{P}_{ij})_{nk \times nk}$ ).

Первый алгоритм определения весовых коэффициентов основывается на том, что ошибки фильтрации  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  и  $\tilde{\mathbf{x}}_j$ ,  $i \neq j$  являются некоррелированными случайными величинами.

Тогда весовые коэффициенты рассчитываются по формуле (в общем виде):

$$\bar{\mathbf{A}}_{i1} = \left( \sum_{j=1}^n \mathbf{P}_j^{-1} \right)^{-1} \mathbf{P}_i^{-1}, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

где  $\mathbf{P}_i$ ,  $\mathbf{P}_j$  – ковариационные матрицы оценок одинаковой размерности, полученные в результате пересчёта ковариационных матриц оценок каждого из фильтров;  $n$  – общее количество фильтров. В этом случае  $\bar{\mathbf{A}}_{i1}$  представляют собой матрицу, размерность которой совпадает с размерностью  $\mathbf{P}_i$  ( $\mathbf{P}_j$ ). В этом случае выходная оценка и соответствующая ей ковариационная матрица будут равны:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{o1} = \left( \sum_{j=1}^n \mathbf{P}_j^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_i \right), \quad \mathbf{P}_{o1} = \left( \sum_{j=1}^n \mathbf{P}_j^{-1} \right)^{-1},$$

где  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  – оценка единого вектора состояния, пересчитанная из оценки вектора состояния текущего фильтра (ФКИ, ФДИ).

Для снижения вычислительной сложности, связанной с обращением матриц большой размерности, во втором алгоритме в ковариационной матрице ошибок элементы, стоящие не на главной диагонали, обнуляются. Таким образом, в дальнейших расчетах квадратная матрица  $\mathbf{P}_i$  заменяется диагональной квадратной матрицей  $\bar{\mathbf{P}}_i$ . Тогда коэффициенты  $\bar{\mathbf{A}}_i$  являются векторами размерностью  $k \times 1$ ,  $k$  – размерность матрицы  $\bar{\mathbf{P}}_i$ . Выходная оценка и матрица ковариации:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{o2} = \left( \sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{P}}_j^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{P}}_i^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_i \right), \quad \mathbf{P}_{o2} = \left( \sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{P}}_j^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{P}}_j^{-1} \mathbf{P}_j \bar{\mathbf{P}}_j^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{P}}_j^{-1} \right)^{-1}.$$

В качестве третьего алгоритма используется метод, основанный на определении следа ковариационной матрицы ошибок. В этом случае коэффициенты  $\bar{\mathbf{A}}_i$  представляют собой скалярные величины:

$$\bar{A}_{i3} = \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_j} \right)^{-1} \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_i}, \quad i=1, 2, \dots, n.$$

Тогда:

$$\hat{\mathbf{x}}_{o3} = \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_j} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_i} \hat{\mathbf{x}}_i \right), \quad \mathbf{P}_{o3} = \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_j} \right)^{-2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\text{tr } \mathbf{P}_i} \right)^2 \mathbf{P}_i.$$

В качестве альтернативного метода формирования выходной оценки предложен метод наименьших квадратов (МНК, четвёртый метод). При наличии двух фильтров (ФКИ и ФДИ) оценка относительной дальности определяется как:

$$\hat{\mathbf{x}}_{o4} = \left( \sigma_d^2 \hat{D}' + \sigma_d^2 \hat{D} \right) / \left( \sigma_d^2 + \sigma_d^2 \right),$$

где  $\sigma_d^2$ ,  $\sigma_d^2$  – дисперсии оценок относительной дальности, полученные в ФДИ и ФКИ соответственно на каждом шаге фильтрации;  $\hat{D}'$ ,  $\hat{D}$  – векторы оценок относительной дальности от ФДИ и ФКИ соответственно.

Показано, что первый алгоритм, использующий в качестве весовых коэффициентов матрицы, даёт более точные результаты. Точность выходной оценки второго и третьего алгоритмов практически одинакова. В процессе моделирования было установлено следующее соотношение:

$$\text{tr}(\mathbf{P}_{o1}) < [\text{tr}(\mathbf{P}_{o2}) = \text{tr}(\mathbf{P}_{o4})] \leq \text{tr}(\mathbf{P}_{o3}).$$

Однако одним из существенных недостатков первого алгоритма является процедура обращения матриц (сложность алгоритма при использовании прямого метода Гаусса-Жордана равна  $O(n^3)$ ), что при большом количестве ЛА в группе, является ресурсоёмкой операцией для аппаратуры конечного потребителя. Таким образом, несмотря на незначительный проигрыш в точности выходной оценки, целесообразно использовать четвёртый алгоритм, вычислительная сложность которого по сравнению с остальными ниже.

Проведено исследование работоспособности представленных алгоритмов при наличии пропаданий измерений абсолютных координат и относительных дальностей. Использование СРНС в качестве источника данных (абсолютные координаты ЛА) помимо неоспоримых преимуществ влечёт за собой ряд проблем, связанных с недостаточной информационной надёжностью сигналов навигационных спутников, а также возможностью пропадания измерений координат, связанных с маневрированием ЛА.

На рис. 8, 9 представлены распределения пропаданий измерений двух типов (независимые и пакетные) для СРНС, а на рис. 10, 11 – для дальномеров.

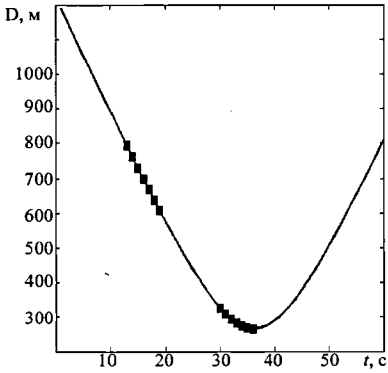


Рисунок 8

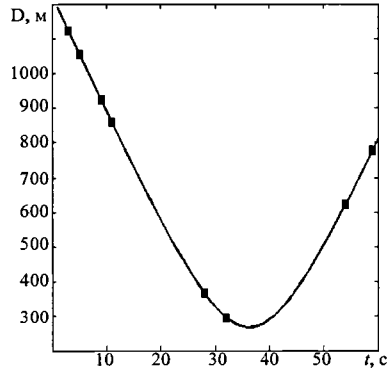


Рисунок 9

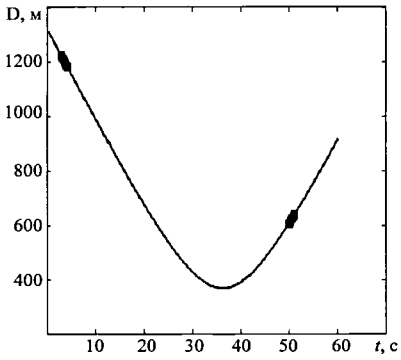


Рисунок 10

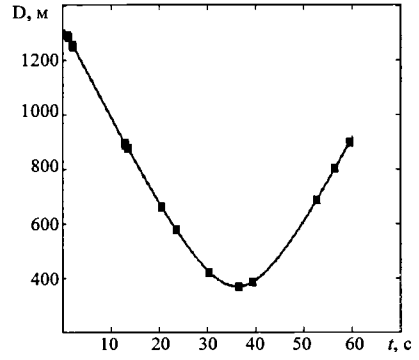


Рисунок 11

На рис. 12 отображены разностные зависимости истинных значений относительной дальности и её оценки от времени для различных алгоритмов формирования выходной оценки при наличии независимых пропаданий.

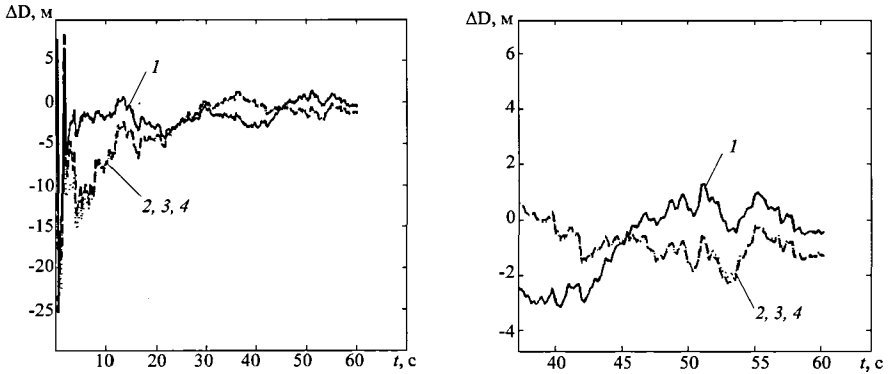


Рисунок 12

Установлено, наличие только лишь независимых пропаданий не накладывает каких-либо существенных негативных явлений на выходную оценку относительной дальности. Вычисление взвешенных коэффициентов оценок ФКИ и ФДИ позволяет эффективно бороться с наличием пропаданий в измерениях, т.к. вес (вклад в выходную оценку) экстраполированной оценки (в момент пропадания измерения) фильтра будет меньше, чем фильтрованной оценки. Аналогичная ситуация имеет место в случае пакетных пропаданий измерений дальности и одиночных пропаданий координатной информации. Самая сложная ситуация возникает при пакетных пропаданиях координатной информации, что одновременно с большим значением погрешности измерения дальномера, приводит к росту дисперсии (а также к росту абсолютной величины погрешности) выходной оценки относительной дальности. Первый алгоритм обеспечивает при этом наивысшую точность при наибольших вычислительных затратах. Приблизительно 5% проигрывает ему по точности алгоритм №4 на основе МНК.

В пятой главе приводятся результаты полунатурного моделирования разработанных алгоритмов совместной обработки навигационной информации в системах ОН. Методика исследования в целом повторяет концепцию, изложенную в главе 4. Основным отличием является источник (блок) истинного положения ЛА. В данном конкретном случае отсчёты истинной траектории движения ЛА являются результатом обработки записей реальных полётов. Полунатурное моделирование не выявило каких-либо расхождений результатов рассмотренных алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности с теоретическим моделированием, представленным в главе 4.

**В заключении** даётся перечень основных результатов диссертационной работы, а также рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Рассмотрены различные варианты вторичной обработки навигационных данных на основе фильтра Калмана с точки зрения точности оценивания относительной дальности и вычислительной сложности.

2. Обосновано использование трех независимых фильтров относительных прямоугольных координат с целью снижения вычислительной сложности фильтра координатной информации.

3. Показана целесообразность использования фильтров с постоянным коэффициентом усиления ( $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  фильтры) для обработки координатной и дальномерной информации.

4. Показано, что учёт влияния взаимной корреляции ошибок измерения относительных прямоугольных координат на результаты фильтрации приводит к выигрышу в точности выходной оценки относительной дальности, не превышающему 5%, что позволяет упростить алгоритмы обработки навигационной информации.

5. Проведено исследование возможности использования многомодельной байесовской фильтрации (ИММ алгоритм) с целью повышения точности определения оценки относительной дальности. Установлено, что использование ИММ позволяет повысить точность оценивания по сравнению с использованием обычных структур фильтров. Однако, повышение точности достигается за счёт значительного роста вычислительной сложности алгоритма, что делает использование ИММ в БРЭО ЛА на данный момент нецелесообразным.

6. Исследованы четыре алгоритма формирования выходной оценки относительной дальности при использовании двух источников – ФКИ и ФДИ. Показано, что оптимальный алгоритм, использующий для определения весовых коэффициентов полную ковариационную матрицу оценок, обеспечивает наименьшую величину погрешности оценки относительной дальности, однако его реализация весьма затруднительна из-за высокой вычислительной сложности. Целесообразным представляется использование алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов, проигрывающего оптимальному по точности на 3-5%.

7. Проанализировано влияние различных типов пропаданий (одиночные, пакетные) на результаты формирования выходной оценки относительной дальности.



Показано, что алгоритм на основе МНК проигрывает оптимальному методу не более 5% как при одиночных, так и при пакетных пропаданиях.

8. Полунатурное моделирование на основе записей реальных полетов показало работоспособность представленных алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности.

9. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить моделирование, а также анализ эффективности различных алгоритмов обработки навигационной информации.

### ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных трудах.

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Мелехов, Я.А. Фильтрация относительных координат при коррелированных погрешностях измерений [Текст] / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // Известия ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – Вып. 9. – С. 7–16.

Вклад: исследовано влияние коррелированности измерений абсолютных координат на точность оценки относительной дальности.

2. Мелехов, Я.А. Формирование выходной оценки относительной дальности в задачах межсамолётной навигации при наличии пропадания в канале измерения [Текст] / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – Вып. 6. – С. 7–14.

Вклад: построена модель пропадания измерений, исследовано влияние пропадания на точность алгоритмов формирования оценки относительной дальности

3. Мелехов, Я.А. Сравнительный анализ алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности в задачах межсамолётной навигации [Текст] / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – Вып. 5. – С. 8–16.

Вклад: разработаны алгоритмы формирования выходной оценки дальности, проведён их сравнительный анализ.

4. Мелехов, Я.А. Выходная оценка дальности при нелинейном законе изменения относительных координат в задачах межсамолётной навигации [Текст] / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2013. – Вып. 3. – С. 67–71.

Вклад: смоделировано нелинейное изменение относительных координат и представлены результаты алгоритмов формирования выходной оценки относительной дальности для данной ситуации.

**Публикации в сборниках трудов конференций**

5. Мелехов, Я.А. Разработка алгоритмов определения относительных координат летательных аппаратов в системах межсамолётной навигации / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // 66-я научно-техническая конференция, посвящённая Дню радио: труды конференции. – СПб: АльфаГарант, 2011. – С. 54–55.

6. Мелехов, Я.А. Корреляция ошибок измерения координат в задачах относительной навигации / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // 67-я научно-техническая конференция, посвящённая Дню радио: труды конференции. – СПб: БалтСервисГрупп, 2012. – С. 25–26.

7. Мелехов, Я.А. Алгоритм мультиплексирования выходной оценки относительной дальности в системах межсамолётной навигации / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // 68-я научно-техническая конференция, посвящённая Дню радио: труды конференции. – СПб: Атмосфера, 2013. – С. 64–65.

8. Мелехов, Я.А. Фильтрация относительных координат при коррелированных погрешностях измерений / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // сборник докладов научно-технической школы-семинара «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире». СПб, 2012.

9. Мелехов, Я.А. Алгоритмы вторичной обработки относительных координат / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // сборник докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб, 2012.

10. Мелехов, Я.А. Алгоритм комплексирования выходных оценок относительной дальности в задачах межсамолётной навигации / Я.А. Мелехов, В.К. Орлов // сборник докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб, 2013.

---

Подписано в печать 29.01.14. Формат 60\*84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 6.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета.  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5  
Тел./факс: 346-28-56