

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт прикладной физики

П. А. Хмарский

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

**координат и параметров движения
в системах мониторинга
воздушной и наземной
обстановки**

Минск
«Беларуская навука»
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Принятые сокращения и обозначения | 7 |
| Предисловие | 15 |
| Введение | 17 |
| Глава 1. Роль и место траекторных измерителей координат и параметров движения в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки | 20 |
| 1.1. Особенности обработки результатов измерений координат и параметров движения объектов в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки | 21 |
| 1.2. Входные и выходные параметры траекторных измерителей | 27 |
| 1.3. Обзор литературы по траекторным измерителям координат и параметров движения | 27 |
| 1.3.1. Неадаптивные траекторные измерители | 28 |
| 1.3.2. Адаптивные траекторные измерители | 32 |
| 1.4. Выводы по главе | 34 |
| Глава 2. Математические модели входного воздействия для траекторных измерителей координат и параметров движения | 36 |
| 2.1. Входное воздействие для траекторных измерителей координат и параметров движения наблюдаемых объектов | 36 |
| 2.2. Дискретная математическая модель задающего воздействия с некоррелированными случайными приращениями | 38 |
| 2.3. Дискретная математическая модель задающего воздействия с коррелированными случайными приращениями | 40 |
| 2.4. Траекторное описание объектов наблюдения | 45 |
| 2.4.1. Траекторное описание аэродинамических летательных аппаратов | 45 |
| 2.4.2. Траекторное описание дискретных мешающих отражений | 47 |
| 2.4.2.1. Классификация и общие сведения о дискретных мешающих отражениях | 47 |
| 2.4.2.2. Модели задающего и возмущающего воздействий на измерители параметров траекторий дискретных мешающих отражений и воздушных объектов | 50 |
| 2.4.3. Траекторное описание баллистических объектов | 53 |
| 2.4.4. Траекторное описание наземных объектов | 62 |
| 2.4.4.1. Модели движения, используемые в алгоритмах измерения параметров траекторий наземных объектов | 62 |
| 2.4.4.2. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наземных объектов в бортовых оптико-локационных системах | 66 |

| | |
|---|------------|
| 2.5. Общие рекомендации по выбору моделей входного воздействия при построении траекторных измерителей координат и параметров движения объектов в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки | 72 |
| 2.6. Выводы по главе | 74 |
| Глава 3. Линейные и квазилинейные траекторные измерители координат и параметров движения | 76 |
| 3.1. Линейные траекторные измерители координат и параметров движения объектов. Фильтр Калмана при прямых измерениях | 76 |
| 3.2. Ошибки аппроксимации разовых оценок методом линеаризации | 80 |
| 3.3. Модификации фильтра Калмана при косвенных измерениях координат и параметров движения. | 82 |
| 3.4. Особенности применения метода линеаризации в модификациях фильтра Калмана при косвенных измерениях. | 85 |
| 3.5. Выводы по главе. | 90 |
| Глава 4. Влияние условий наблюдения на показатели качества измерителей координат и параметров движения | 92 |
| 4.1. Оценка точности аппроксимации гауссовой плотности вероятности при переходе из полярных в прямоугольные координаты | 94 |
| 4.2. Оценка точности аппроксимации гауссовой плотности вероятности при переходе из прямоугольных в полярные координаты | 100 |
| 4.3. Закономерности влияния условий наблюдения на показатели качества модификаций квазилинейных траекторных измерителей координат и параметров движения объектов. | 106 |
| 4.4. Влияние высоты воздушного объекта на точность измерения его местоположения в двухкоординатной радиолокационной станции обзора | 111 |
| 4.4.1. Связь между координатами объекта в плоскости наблюдения с ее координатами в прямоугольной системе координат | 111 |
| 4.4.2. Влияние высоты полета объекта на значение суммарной ошибки измерения ее местоположения в двухкоординатной радиолокационной станции | 113 |
| 4.5. Выводы по главе. | 116 |
| Глава 5. Нелинейные траекторные измерители координат и параметров движения | 118 |
| 5.1. Итерационный фильтр Калмана при косвенных измерениях координат и параметров движения. | 118 |
| 5.2. Модификации фильтров Калмана, основанные на ансцентном преобразовании | 120 |
| 5.3. Фильтр с несмещенной оценкой наблюдения и оптимальный линейный фильтр | 125 |
| 5.4. Использование нелинейного метода наименьших квадратов в обработке результатов измерений координат и параметров движения баллистических объектов | 129 |
| 5.4.1. Способ оценки высоты баллистического объекта по данным двухкоординатной РЛС обзора на основе нелинейного метода наименьших квадратов | 129 |
| 5.4.2. Пример результатов фильтрации координат баллистической цели с использованием нелинейного метода наименьших квадратов. | 134 |
| 5.5. Обобщенный метод Монте-Карло в нелинейной дискретной фильтрации координат и параметров движения | 136 |
| 5.5.1. Использование численного метода интегрирования Монте-Карло для аппроксимации плотностей вероятности | 136 |
| 5.5.2. Фильтрация посредством выборки весовых коэффициентов. Обобщенный фильтр частиц (Particle Filter) | 146 |
| 5.5.3. Подходы к выбору значимой плотности вероятности в фильтрах частиц (Particle Filters) | 151 |
| 5.6. Выводы по главе. | 154 |

| | |
|--|------------|
| Глава 6. Адаптивные траекторные измерители координат и параметров движения | 156 |
| 6.1. Одноканальные адаптивные траекторные измерители | 156 |
| 6.1.1. Адаптивный дискретный фильтр с коррекцией полосы пропускания | 156 |
| 6.1.2. Адаптивный дискретный фильтр с коррекцией результирующей оценки параметра | 157 |
| 6.2. Многоканальные адаптивные траекторные измерители | 158 |
| 6.2.1. Адаптивный многомодельный фильтр по моделям движения с коммутируемой структурой | 158 |
| 6.2.2. Адаптивный многогипотезный измеритель с межобзорной памятью гипотез | 161 |
| 6.2.3. Особенности работы многомодельного фильтра частиц для оценки координат и параметров движения объекта | 163 |
| 6.2.3.1. Особенности работы многомодельного фильтра частиц для оценки координат и параметров движения объекта в горизонтальной плоскости | 166 |
| 6.2.3.2. Особенности работы многомодельного фильтра частиц для оценки координат и параметров движения объекта в вертикальной плоскости | 168 |
| 6.3. Выводы по главе | 170 |
| Глава 7. Обобщенная методика синтеза адаптивных к классу объекта и модели входного воздействия траекторных измерителей | 171 |
| 7.1. Постановка задачи статистического синтеза | 171 |
| 7.2. Оценка координат и параметров движения наблюдаемого объекта, адаптивная к его классу и модели входного воздействия | 173 |
| 7.3. Структура адаптивного к классу объекта и модели входного воздействия траекторного измерителя в системах мониторинга | 176 |
| 7.4. Методика идентификации объектов по траекторным признакам | 178 |
| 7.4.1. Аппроксимация плотности вероятности вектора состояния методом Монте-Карло | 179 |
| 7.4.2. Особенности представления априорных траекторных признаков | 181 |
| 7.5. Методика оптимизации траекторных измерителей координат и параметров движения | 191 |
| 7.6. Выводы по главе | 192 |
| Глава 8. Особенности реализации измерителей координат и параметров движения | 194 |
| 8.1. Траекторные измерители координат и параметров движения по данным угломерных систем мониторинга | 194 |
| 8.1.1. Постановка задачи | 195 |
| 8.1.2. Алгоритм работы и структура измерителя координат и параметров движения маневрирующего объекта по данным неподвижного пеленгатора | 195 |
| 8.1.3. Результаты компьютерного моделирования | 196 |
| 8.2. Траекторные измерители координат и параметров движения по данным радиолокаторов обзора | 200 |
| 8.2.1. Сопоставление квазилинейных и нелинейных измерителей координат и параметров движения объектов по данным двухкоординатного радиолокатора обзора | 200 |
| 8.2.2. Сопоставление адаптивных измерителей координат и параметров движения объекта, совершающего разворот, по данным двухкоординатного радиолокатора обзора | 203 |
| 8.2.3. Результаты экспериментальных исследований траекторных измерителей по данным макета модернизированной станции 1РЛ133 | 208 |

| | |
|--|------------|
| 8.2.4. Результаты экспериментальных исследований многомодельного фильтра частиц. | 211 |
| 8.2.5. Сопоставление измерителей координат и параметров движения баллистических объектов по данным РЛС обзора | 215 |
| 8.2.5.1. Оценка эффективности траекторных измерителей координат и параметров баллистических объектов для двухкоординатной РЛС обзора. . . | 216 |
| 8.2.5.2. Оценка эффективности траекторных измерителей координат и параметров баллистических объектов для трехкоординатной РЛС обзора. . . | 220 |
| 8.3. Траекторные измерители координат и параметров движения по данным радионавигационных систем | 228 |
| 8.3.1. Траекторные измерители координат и параметров движения в спутниковых радионавигационных системах | 229 |
| 8.3.1.1. Постановка задачи. | 229 |
| 8.3.1.2. Алгоритм работы расширенного фильтра Калмана при траекторной обработке информации в спутниковых навигационных системах | 231 |
| 8.3.1.3. Алгоритм работы ансамблевого фильтра Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых навигационных системах. | 233 |
| 8.3.1.4. Результаты математического моделирования. | 234 |
| 8.3.2. Траекторные измерители координат и параметров движения по индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации | 236 |
| 8.4. Траекторные измерители координат и параметров движения наземных объектов по данным оптико-локационных систем | 241 |
| 8.4.1. Устройство межкадровой обработки оптико-локационной информации и входящий в его состав траекторный измеритель координат и параметров движения наземных объектов. | 242 |
| 8.4.2. Результаты компьютерного моделирования | 244 |
| 8.5. Выводы по главе. | 249 |
| Заключение | 251 |
| Литература и источники | 253 |