

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

<b>Принятые сокращения и обозначения .....</b>	7
<b>Предисловие .....</b>	15
<b>Введение .....</b>	17
<b>Глава 1. Роль и место траекторных измерителей координат и параметров движения в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки.....</b>	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
<b>Глава 2. Математические модели входного воздействия для траекторных измерителей координат и параметров движения .....</b>	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
<b>Глава 3. Линейные и квазилинейные траекторные измерители координат и параметров движения .....</b>	<b>76</b>
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
<b>Глава 4. Влияние условий наблюдения на показатели качества измерителей координат и параметров движения .....</b>	<b>92</b>
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
<b>Глава 5. Нелинейные траекторные измерители координат и параметров движения .....</b>	<b>118</b>
5.1. Итерационный фильтр Калмана при косвенных измерениях координат и параметров движения .....	118
5.2. Модификации фильтров Калмана, основанные на ансентном 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

<b>Глава 6. Адаптивные траекторные измерители координат и параметров движения</b>	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
<b>Глава 7. Обобщенная методика синтеза адаптивных к классу объекта и модели входного воздействия траекторных измерителей . . . . .</b>	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
<b>Глава 8. Особенности реализации измерителей координат и параметров движения</b>	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
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>251</b>
<b>Литература и источники . . . . .</b>	<b>253</b>