**Коновалов Александр Анатольевич. Обнаружение траектории в многопозиционном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.14 / Коновалов Александр Анатольевич;[Место защиты: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова (Ленина)"].- Санкт-Петербург, 2015.- 143 с.**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

На правах рукописи

Коновалов Александр Анатольевич

**Обнаружение траектории**

**в многопозиционном радиолокационном комплексе**

**с асинхронным объединением отметок**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,

Кутузов Владимир Михайлович

Санкт-Петербург, 2015

2

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ 5

1 Основные принципы построения алгоритма обнаружения траектории

в МП РЛК с АОО 11

1. Объединение информации в радиолокационных средствах 11
2. Принципы построения алгоритмов обнаружения траектории 17
3. Краткий обзор алгоритмов обнаружения траектории в системах

с объединением информации 21

1. Алгоритм MSTI 21
2. Алгоритм на основе решения многомерной задачи назначения 22
3. Логические алгоритмы обнаружения траектории 23
4. Алгоритм на основе модифицированного преобразования Хафа 27
5. Алгоритм на основе полярного преобразования Хафа 31
6. Алгоритм децентрализованного обнаружения траектории 33

1.4 Разработка структуры алгоритма обнаружения траектории

в МП РЛК с АОО 34

1. Постановка задачи 34
2. Задачи, решаемые в ходе обнаружения траектории 36
3. Критерий обнаружения траектории 42
4. Симуляционная модель для исследования алгоритма обнаружения траектории 45

1.5 Выводы по главе 1 46

2 Формирование набора отметок в алгоритме обнаружения траектории

в МП РЛК с АОО 49

2.1 Стробирование 49

1. Постановка задачи 49
2. Кольцевой строб захвата и его недостатки 50

3  
2.1.3 Формирование строба захвата с учетом погрешностей  
радиолокационных измерений и маневра цели 52

2.2 Накопление отметок 59

1. Постановка задачи 59
2. Временные свойства потока истинных отметок 60
3. Пространственное и временное распределение ложных отметок 67

2.3 Выводы по главе 2 71

3 Синтез алгоритма выделения траектории в МП РЛК с АОО на основе оценок  
константных параметров движения 73

1. Постановка задачи 73
2. Формирование оценок константных параметров движения цели 74
3. Формирование оценок скорости 74
4. Формирование оценок ускорения 78
5. Формирование оценок угловой скорости 82
6. Кластеризация оценок скорости, ускорения и угловой скорости 84
7. Статистические характеристики алгоритма ОКП и формирование на их основе критерия обнаружения траектории 89
8. Статистические характеристики алгоритма ОКП 89
9. Критерий обнаружения траектории 95

3.5 Исследование работы алгоритма на основе ОКП при обнаружении  
траектории цели, движущейся по различным законам 97

1. Модель CV 97
2. Сравнение алгоритмов ОКП и ППХ для модели CV 99
3. Модель СА 102
4. Модель СТ 107

3.6 Выводы по главе 3 108

4 Оценивание параметров траектории в алгоритме ОКП 111

1. Постановка задачи 111
2. Исследование классификационных свойств алгоритма выделения 113

4

1. Фильтрация параметров траектории в алгоритме ОКП 121
2. Характеристики алгоритма обнаружения траектории на основе ОКП при сопровождении целей разных типов 127
3. Выводы по главе 4 131

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 138

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 139

5

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность.** Многопозиционный радиолокационный комплекс (МП РЛК) в настоящее время рассматривается как доступная альтернатива многопозицион­ным РЛС, совмещающая повышение качества радиолокационного наблюдения за счет наличия дополнительной (по сравнению с одиночной РЛС) информации с относительной простотой и практичностью разработки и эксплуатации (по срав­нению с многопозиционной РЛС). Наибольший эффект от совместного использо­вания информации возникает в радиолокационных комплексах, осуществляющих объединение единичных измерений (отметок). Поскольку в общем случае МП РЛК объединяет произвольное количество пространственно-разнесенных РЛС различного назначения, разных частотных диапазонов и с независимыми ре­жимами работы, предпочтительным вариантом совместного использования ин­формации является асинхронное объединение отметок (АОО). В МП РЛК с АОО возникает необходимость разработки алгоритма обнаружения траектории по дан­ным, поступающим от нескольких датчиков. Спецификой этой задачи является асинхронное поступление неравноточных измерений, причем, в общем случае, в неизвестный момент времени.

**Степень разработанности.** В настоящее время основное внимание при раз­работке алгоритмов объединения данных в радиолокации уделяется объединению траекторий (трасс). Схемы, в которых производится объединение отметок, рас­сматриваются реже, причем исследуются, как правило, вопросы объединения синхронных либо синхронизированных (при помощи экстраполяции) данных; асинхронные способы объединения рассматриваются в основном в контексте фильтрации или отождествления. Как показывает анализ представленных в от­крытой литературе алгоритмов обнаружения траектории (ОТ) в системах с объе­динением информации, большая их часть не может быть применена в МП РЛК с АОО, поскольку в них либо подразумевается синхронность наблюдений, либо они имеют высокую вычислительную сложность, либо недостаточно теоретически проработаны. Исключением является алгоритм ОТ на основе полярного преобра-

6 зования Хафа, который может быть применен в МП РЛК, однако имеет ряд не­достатков, свойственных самому преобразованию Хафа и затрудняющих его практическую реализацию.

**Цели и задачи.** Целью диссертационной работы является разработка и ис­следование алгоритма обнаружения траектории одиночной радиолокационной це­ли на фоне помех при неизвестном характере ее движения на основе асинхронных и неравноточных измерений ее координат, производимых в РЛС комплекса.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка метода формирования набора отметок, потенциально содержа­щих траекторию движения радиолокационной цели.
2. Исследование статистических свойств потока истинных и ложных отметок на входе алгоритма обнаружения траектории в МП РЛК с АОО.
3. Разработка метода выделения траектории цели, способной двигаться со­гласно одной из некоторого заданного набора моделей.
4. Формирование критерия обнаружения траектории из расчета обеспечения требуемых значений вероятности обнаружения истинной и ложной траекторий.
5. Разработка метода оценки параметров траектории в условиях неопреде­ленности характера движения цели.

**Научная новизна.** В диссертации проведен анализ существующих алгорит­мов обнаружения траекторий в системах объединения данных с точки зрения их применимости в МП РЛК с АОО. Разработана и реализована структура блочного алгоритма обнаружения траектории одиночной маневрирующей цели в МП РЛК, объединяющем на уровне единичных измерений произвольное количество неза­висимых обзорных двухкоординатных пространственно-разнесенных независи­мых РЛС разных диапазонов длин волн.

Новыми являются следующие результаты:

1. Разработан новый принцип выделения траектории радиолокационной це­ли, в котором селекция истинных и ложных отметок производится на основе ана­лиза оценок константных параметров (ОКП) движения, которые являются посто­янными на интервале обнаружения траектории.

7

1. Разработан алгоритм обнаружения траектории, использующий принцип ОКП и предназначенный для применения в многопозиционном радиолокацион­ном комплексе с асинхронным объединением отметок.
2. Разработан метод стробирования отметок на этапе обнаружения траекто­рии, учитывающий погрешности радиолокационных измерений и возможный ма­невр цели.
3. Получены аналитические выражения для расчета статистических характе­ристик алгоритма обнаружения траектории на основе ОКП.
4. Предложена методика определения времени накопления данных и порогово­го числа отметок для принятия решения об обнаружении траектории цели из расчета обеспечения заданных значений вероятностей обнаружения истинной и ложной тра­екторий;
5. Предложена методика расчета значения и дисперсии угловой скорости це­ли, совершающий маневр в виде поворота с постоянной скоростью, с применени­ем нелинейного ансцентного преобразования.
6. Предложена методика оценивания параметров траектории цели на этапе ее обнаружения в условиях неопределенности характера движения цели, исполь­зующая алгоритм статической многомодельной фильтрации.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретический интерес представляют:

1. Результаты разработки нового принципа выделения траектории цели, ко­торый можно использовать для обнаружения траектории маневрирующей цели в различных радиотехнических средствах наблюдения и сопровождения.
2. Статистические свойства потока данных на входе алгоритма обнаружения траектории при его использовании в системах с объединением информации;
3. Адаптация к применению для обнаружения траектории современных ме­тодов траекторной обработки, таких как ансцентное преобразование и многомо­дельная фильтрация.

**Практическая ценность результатов работы.** Практическое значение ре­зультатов работы заключается в разработке полноценного алгоритма обнаруже­ния траектории одиночной цели в МП РЛК, объединяющем в своем составе про-

8 извольное количество разнотипных пространственно-разнесенных РЛС и исполь­зующем асинхронное объединение данных на уровне отметок; разработка мето­дики выбора параметров алгоритма; результаты исследования особенностей его работы при обнаружении целей, движущихся по разным законам.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссер­тационной работе задач использовались методы теории вероятностей, статистиче­ские методы обработки данных, статистическое компьютерное моделирование.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Принцип выделения траектории радиолокационной цели, основанный на анализе константных параметров движения, позволяющий обнаруживать траекто­рии маневрирующих и не маневрирующих целей;
2. Алгоритм, использующий предложенный принцип выделения и реали­зующий обнаружение траектории в многопозиционном радиолокационном ком­плексе с асинхронным объединением отметок.
3. Метод стробирования отметок на этапе обнаружения траектории, обеспе­чивающий вероятность стробирования истинной отметки не хуже заданной.
4. Методика определения времени накопления данных и порогового числа отметок, позволяющая формулировать критерий обнаружения траектории.
5. Методика оценки параметров обнаруженной траектории в условиях неоп­ределенности характера движения цели.

**Степень достоверности и апробация работы.** Обоснованность и достовер­ность научных положений, результатов и выводов диссертации обусловливается корректным использованием методов исследования, применением современных вычислительных средств и программных комплексов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсужда­лись на следующих конференциях:

– научно-практическая конференция «Транспортно-коммуникационная сис­тема Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в ус­ловиях чрезвычайных ситуаций», 13–14 ноября 2009 г.;

9

– научно-практическая конференция «Наукоемкие и инновационные техно­логии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных си­туаций и их последствий, Санкт-Петербург, 12–13 ноября 2010 г.;

– научно-практическая конференция «Наукоемкие и инновационные техно­логии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных си­туаций и их последствий, Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2011;

– XVIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 17–19 апреля 2012 г.;

– научно-практическая конференция «Геополитические факторы устойчивого развития и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрез­вычайных ситуаций», СПб, 29 ноября 2012;

– конференции профессорско-преподавательского состава СПБГЭТУ «ЛЭ-ТИ» с 2009 по 2012 гг.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опублико­ваны в 8 научных работах, среди которых три статьи в изданиях, рекомендован­ных в действующем перечне ВАК.

В рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Коновалов, А. А. Исследование статистических свойств потока данных на входе системы траекторной обработки многопозиционного радиолокационного комплекса с асинхронным объединением отметок / А. А. Коновалов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – №4. – 2011. – С. 30–36.
2. Коновалов, А. А. Алгоритм завязки траектории цели в асинхронном мно­гопозиционном радиолокационном комплексе / А. А. Коновалов // Радиотехника. – 2012. – № 7. – С. 50–54.
3. Бархатов, А. В. Использование сигналов цифрового эфирного телевидения для определения координат и скорости автомобилей / А. В. Бархатов, А. А. Коновалов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектрони­ка. – 2014. – № 4. – С. 32–37.

Публикации в других изданиях:

10

1. Коновалов, А. А. Формирование строба захвата траектории с учетом по­грешностей радиолокационных измерений / А. А. Коновалов // Материалы науч­но-практической конференции «Транспортно-коммуникационная система Аркти­ки в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрез­вычайных ситуаций», 13–14 ноября 2009 г., Санкт-Петербург. – С. 68–73.
2. Коновалов, А. А. Выбор критерия завязки траектории цели в многопозици­онном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок / А. А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Наукоѐмкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвраще­ния чрезвычайных ситуаций и их последствий», 12–13 ноября 2010 г., Санкт-Петербург. – С. 100–104.
3. Коновалов, А. А. Алгоритм завязки траектории при многопозиционном со­провождении радиолокационной цели / А. А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Наукоемкие и инновационные технологии в реше­нии проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий, Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2011. – С. 83–88.
4. Коновалов, А. А. Расчет размера и формы строба захвата при завязке тра­ектории радиолокационной цели / А. А. Коновалов // XVIII международная науч­но-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 17–19 апреля 2012 г. – Том 3. – С. 1445–1452.
5. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной ин­формации. Часть 1 / А. А. Коновалов. – СПб.: – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – 164 с.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе проведена разработка и исследование алгоритма обнаружения траектории в многопозиционном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок. Такого рода комплекс объединяет произ­вольное количество пространственно-разнесенных двухкоординатных обзорных РЛС разных диапазонов длин волн, осуществляющих независимо друг от друга обзор пространства, обнаружение и разрешение целей, измерение их параметров и передачу этой информации в центр совместной обработки. Обнаружению подле­жит траектория одиночной воздушной цели, для которой известны максимальная и минимальная скорости и максимальное линейное ускорение. Считается, что на интервале обнаружения траектории цель может двигаться согласно одной из трех моделей движения: прямолинейно с неизвестной постоянной скоростью; прямоли­нейно с неизвестным постоянным ускорением; поворот с неизвестной угловой скоростью. Характер движения цели на интервале ОТ не изменяется. Истинный характер движения цели алгоритму ОТ неизвестен.

За основу при построении алгоритма ОТ взята блочная стратегия, при этом он состоит из четырех этапов: стробирование, накопление отметок, выделение траектории и оценка параметров траектории.

В работе показано, что для традиционно применяемого кольцевого строба вероятность стробирования истинной отметки зависит от дальности цели, ее ре­альной скорости и погрешностей измерения координат и что эта вероятность мо­жет принимать низкие значения и фактически является случайной величиной. Предложен вариант алгоритма стробирования, учитывающего погрешности ра­диолокационных измерений и возможный манер цели, который обеспечивает ве­роятность стробирования истинной отметки не ниже заданной. В этом алгоритме сначала проверяется попадание отметки в кольцевой строб, а при непопадании проверяется возможность выхода отметки за пределы кольца из-за наличия по­грешностей измерения. Предложенный вариант отличается от существующих тем, что позволяет учитывать изменение формы внутреннего круга, не предъявляет

133 требований к ковариационной матрице вектора измерений и учитывает возмож­ность совершения целью маневров заданных типов. Получено выражение для площади строба захвата.

В ходе разработки алгоритма накопления отметок проанализированы некото­рые важные статистические характеристики суммарного потока истинных и лож­ных отметок, поступающих на вход алгоритма ОТ в МП РЛК с АОО. Рассмотрен процесс образования суммарного потока истинных отметок, определено число об­зоров (возможных моментов прихода отметок от данной цели от всех РЛС ком­плекса) *К* на произвольном интервале наблюдения *t* и вероятность появления ис­тинной отметки на каждом из них. Получены аналитические выражения для рас­чета вероятностей *Р(п,К)* появления ровно *п* истинных отметок на *К* обзорах и

для вероятностей *Р]м* (/) получения не менее *М* истинных отметок за время *t.* Аналогичный анализ проведен для числа групп ложных отметок. Введено понятие эффективного количества ЛО, которое учитывает факт того, что при обнаружении одиночной цели к формируемой траектории присоединяется только одна отметка из группы. Получены выражения для вероятностей появления ровно *п* групп ЛО, вероятностей появления ровно *М* эффективных ЛО, общего и эффективного коли­чества ЛО за время накопления.

Предложен новый принцип выделения траектории на основе оценки кон­стантных параметров движения цели. Такими параметрами являются: для модели CV - компоненты вектора скорости; для модели СА - компоненты вектора ускоре­ния; для модели СТ - угловая скорость поворота. Этот принцип использован для построения алгоритма обнаружения траектории в МП РЛК с АОО. Алгоритм вы­числяет оценки константных параметров и их статистические характеристики для всех отметок из набора, сформированного на этапе накопления, и производит кла­стеризацию этих оценок в пространстве константных параметров, выделяя оценки, с заданной степенью вероятности образующие траекторию цели, движущейся по тому или иному закону. Решение об обнаружении траектории принимается в том случае, если в кластере оказываются оценки в количестве не менее заданного. Ал­горитм реализует многоканальность по типу маневра, он имеет три канала ОТ, в

134 каждом из которых осуществляются вычисление соответствующих оценок, класте­ризация и принятие решения об обнаружении траектории.

Особенность предложенного алгоритма ОКП заключается в том, что в нем при выделении используется информация не только о пространственном положе­нии отметок, но и о времени их прихода, а строб, выставляемый при кластериза­ции, играет такую же роль, как строб сопровождения на этапе подтверждения. В других блочных алгоритмах, например, ПХ, информация о времени прихода от­метки используется только при стробировании, но не при выделении (и там нет стробирования при выделении), а в последовательных методах параллельно фор­мируется и сопровождается множество ложных траекторий, причем параметры этих траекторий в начале процесса ОТ оцениваются по малому числу отметок, что может привести к искажению результатов ОТ. Так, для рассматриваемого примера МП РЛК алгоритм ОКП имеет в 130 раз меньшую вероятность отнесения к траек­тории ложной отметки.

Для этого алгоритма:

– предложен способ формирования пар отметок для вычисления оценок ско­рости, при котором скорость оценивается для сочетаний одной (опорной) отметки со всеми остальными;

– предложен способ формирования пар оценок скорости для вычисления оце­нок ускорения и угловой скорости, который заключается в сочетании первой и по­следней оценок скорости с каждой из остальных;

– разработан алгоритм кластеризации, предназначенный для выделения оце­нок константных параметров, с заданной вероятностью образующих траекторию истинной цели;

– предложен способ вычисления оценки угловой скорости и ее дисперсии на основе нелинейного ансцентного преобразования;

– получены аналитические выражения для расчета статистических характери­стик алгоритма, среди которых: вероятность обнаружения истинной траектории; среднее время от появления цели в зоне видимости комплекса до обнаружения его

135 траектории; вероятность обнаружения ложной траектории; среднее число обнару­женных ложных траекторий в единицу времени;

– сформулировано правило выбора параметров критерия обнаружения траек­тории *M*/*Tinit* на основе критерия Неймана-Пирсона, при этом задаются требуемые вероятности обнаружения истинной *PT* и ложной *FT* траектории и выбирается та­кое значение *M*, которое обеспечивает заданные вероятности и минимизирует *Tinit* .

Достоинствами предложенного алгоритма являются:

– возможность обнаружения траектории цели, совершающей маневр;

– фильтрация ложных отметок в рамках единственной гипотезы отождествле­ния;

– нечувствительность к пропускам отметок;

– уменьшение размера области, в которой ожидается появление истинной от­метки по сравнению с ПХ, за счет использования информации о времени съема;

– в многопозиционном варианте – индивидуальный учет погрешностей изме­рения для каждой отметки.

Как показывает моделирование, алгоритм ОКП обладает высокими характери­стиками при обнаружении цели в канале CV, поэтому его можно рекомендовать в качестве альтернативы современным алгоритмам ОТ, которые в большинстве сво­ем обнаруживают именно такие цели. На результат выделения в каналах СА и СТ определенное влияние оказывает наличие ложных отметок на опорном обзоре, что не сильно сказывается на вероятности обнаружения истинной траектории, но мо­жет привести к снижению точности оценивания константного параметра; при по­мощи разработки специальных мер можно добиться некоторого снижения влияния этого фактора.

Для оценки параметров траектории в разрабатываемом алгоритме ОТ ис­пользован статический многомодельный алгоритм с набором из трех моделей (CV, СА и СТ). Необходимость использования многомодельного алгоритма обу­словлена недостаточно высокой надежностью разделения каналов выделения от­меток, которая объясняется как особенностями собственно алгоритма выделения (обнаружение траектории во всех каналах при истинности модели CV, обнаруже-

136 ние в канале СТ при истинности модели СА), так и наличием достаточно больших погрешностей радиолокационных измерений. Статический многомодельный ал­горитм является оптимальным в условиях, когда неизвестный характер модели принадлежит одному из конченого множества моделей и не меняется на интерва­ле оценивания, что соответствует условиям рассматриваемой задачи. Формирова­ние набора моделей осуществляется по результатам выделения, предусмотрена также возможность использования локальными фильтрами оценок константных параметров, полученных на этапе выделения.

Проведено сравнение работы алгоритма оценивания параметров траектории в рамках алгоритма обнаружения траектории на основе оценки константных пара­метров для рассматриваемого примера МП РЛК с АОО при разных значениях по­грешностей радиолокационных измерений. Главный вывод, который можно сде­лать по результатам моделирования, заключается в том, что несмотря на то, что обнаружение траектории может происходить в нескольких каналах, и несмотря на то, что итоговое правдоподобие не всегда однозначно указывает на истинную мо­дель (хотя и более точно, чем результат выделения), итоговая оценка положения цели в любом случае оказывается выше, чем исходная погрешность, а значит, ал­горитм фильтрации работает адекватно.

Проведено сравнение предложенного принципа выделения отметок ОКП с принципом на основе преобразования Хафа. Поскольку при адекватном выборе размера ячейки аккумулятора в ПХ набор отметок, попавших в нее будет анало­гичен набору отметок, попавших в кластер ОКП, вероятность обнаружения ис­тинной траектории и точность оценки ее параметров будут одинаковыми. Поэто­му указанные алгоритмы сравнивались с точки зрения среднего числа ложных отметок, попадающих в ячейку или кластер. Показано, что алгоритм ОКП имеет существенное преимущество перед ПХ за счет того, что в нем используется ин­формация о времени получения каждой из отметок, а размеры накопителя (кла­стера) вычисляются индивидуально для каждой оценки.

В целом проведенное исследование показало, что предложенный принцип обнаружения траектории на основе анализа константных параметров движения

137 обладает высокими характеристиками (высокой вероятностью обнаружения, низ­кой вероятностью обнаружения ложной траектории), особенно при обнаружении цели, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью, и является вполне конкурентоспособным на фоне традиционных алгоритмов ОТ, прежде всего на основе преобразования Хафа. Кроме того, этот алгоритм позволяет успешно об­наруживать траектории цели, совершающих маневр на интервале ОТ.

Ряд тем, затронутых в данной диссертации, заслуживают отдельного рас­смотрения. Прежде всего это относится к исследованию механизма обнаружения траектории в каналах CA и СТ по ложной опорной оценке при использовании принципа формирования оценок «последняя с каждой». Здесь были намечены не­которые возможные направления, связанные с использованием не одного, а не­скольких последних обзоров. Вторая большая тема – разделение каналов в усло­виях неопределенности характера движения цели при реальных значениях по­грешностей радиолокационных измерений, прежде всего разработка критерия от­несения характера разделения моделей к достоверному или недостоверному. Са­мостоятельное исследование представляет из себя и точный расчет среднего чис­ла обнаруженных ложных траекторий в единицу времени.

Дальнейшая разработка темы может заключаться в преодолении ряда допу­щений, принятых при постановке задачи. В данной диссертации ставилась задача обнаружения траектории одиночной цели, которая начинает и заканчивает маневр одного из трех возможных типов за пределами интервала ОТ. Обнаружение тра­екторий нескольких целей, обнаружение траектории цели, начинающей или за­канчивающей маневр в процессе ОТ, а также цели, совершающей более сложные маневры, в том числе в трехмерном пространстве, представляют собой возмож­ные направления дальнейших исследований. Заслуживает внимания также воз­можность обнаружения смешанных траекторий, в образовании которых участву­ют одновременно истинные и ложные отметки. Представляет также интерес уве­личение размерности пространства измерений включением в него угла места и радиальной скорости цели; адаптация алгоритма для ОТ в других радиотехниче­ских средствах (не обязательно многопозиционных и радиолокационных), напри­мер, бистатических, многофункциональных РЛС с ФАР, загоризонтных и пр.

138

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

|  |  |
| --- | --- |
| АОО | – асинхронное объединение отметок |
| ИММ | – интерактивный многомодельный |
| ЛО | – ложная отметка |
| МП | – многопозиционный |
| ОКП | – оценка константных параметров |
| ОТ | – обнаружение траектории |
| ПИ | – пространство изображения |
| ПП | – пространство параметров |
| ППХ | – полярное преобразование Хафа |
| ПСК | – полярная система координат |
| ПУЛТ | – постоянный уровень ложной тревоги |
| ПХ | – преобразование Хафа |
| РЛК | – радиолокационный комплекс |
| РЛС | – радиолокационная станция |
| СК | – система координат |
| СКО | – среднеквадратическое отклонение |
| ССМ | – статический многомодельный |
| ТО | – траекторная обработка |
| ФК | – фильтр Калмана |
| ЦО | – центр обработки |
| CA | – Constant Acceleration |
| CT | – Coordinated Turn |
| CV | – Constant Velocity |

139

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 418 с.
2. Аверьянов, В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / В. Я. Аверьянов. – Мн: Наука и техника, 1978. – 184 с.
3. Пат. 102267 Российская Федерация, МПК G01S 13/04. Радиолокационный комплекс мониторинга воздушного пространства и морских акваторий / Бархатов А.В., Веремьев В.И., Калениченко С.П., Ковалев Д.А., Коновалов А.А., Михайлов В.Н., Попов А.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 2010131738/09; заявл. 28.10.10; опубл. 20.02.11, Бюл. № 5. – 3 с.
4. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной ин­формации / С. З. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
5. Bar-Shalom, Y. Mulitarget-multisensor tracking: principles and techniques / Y. Bar-Shalom, X. R. Li. – Storrs: YBS Publishing, 1995. – 616 p.
6. Blackman, S. Design and analysis of modern tracking systems / S. Blackman, R. Popoli. – Boston: Artech House, 1999. – 1230 p.
7. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузь­мин. – Киев: КВИЦ, 2000. – 428 с.
8. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной ин­формации: Часть 1 / А. А. Коновалов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. – 164 с.
9. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной ино-рмации: Часть 2. / А. А. Коновалов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. – 180 с.
10. Bar-Shalom, Y. Tracking and data fusion: A handbook of algorithms / Y. Bar-Shalom, P. K. Willett, X. Tian. – Storrs: YBS Publishing, 2011. – 1236 p.
11. Pao, L. Y. A comparison of parallel and sequential implementation of a multi-sensor multitarget tracking algorithm / L. Y. Pao, C. W. Frei // Proc. of the American Control Conf., Seattle, USA, 21–23 June 1995. – P. 1683–1687.

140

1. Alouani, A. T. Tracking with three asynchronous sensors: Solution existence and performance analysis / A. T. Alouani, J. E. Gray, H. McCabe // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4728. – P. 368–376.
2. Pawlak, R. J. Fusion technique for multisensor track initiation / R. J. Pawlak, A. A. Beex // IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. – 1995. – № 5. – P. 225–231.
3. Li, Y. Multisensor Hough transform and logic-based track initiation techniques / Y. Li, H. Leung, M. Blanchet // Opt. Eng. – 1997. – № 3. – P. 729–736.
4. Krieg, M. L. Asynchronous single platform sensor fusion: Technical Report № DSTO-TN-0084. / M. L. Krieg. – DSTO Electronics and Surveillance Research La­boratory, Salisbury, Australia, 1997. – 42 p.
5. Deb, S. An S-dimensional assignment algorithm for track initiation / S. Deb, K. S. Pattipati, Y. Bar-Shalom // IEEE Int. Conf. on Systems Engineering, Kobe, Japan, 17–19 Sept. 1992. – P. 527–530.
6. Poore, A. B. Data association for track initiation and extension using multiscan windows / A. B. Poore, N. Rijavec, T. N. Barker // Proc. SPIE. – 1992. – Vol. № 1698. – P. 432–441.
7. Poore, A. B. Data association using multiple frame assignments / A. B. Poore, S. Lu, B. J. Suchomel. Handbook of Multisensor Data Fusion. Theory and Practice, 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – P. 299–318.
8. Kutuzov, V. M. Multi-band and multi-position radar complex for airspace monitoring / V. M. Kutuzov, S. P. Kalenitchenko, A. A. Konovalov et al. // Proceedings of St. Petersburg IEEE Chapters. SPb.: SPb ETU “LETI” Publishing House. – 2001. – P. 79–84.
9. Кутузов, В. М. Принципы построения системы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе мониторинга ок­ружающего пространства / В. М. Кутузов, С. П. Калениченко, А. А. Коновалов и др. // XVIII междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воро­неж, 17-19 апреля 2012 г. – Том 3. – С. 1453–1461.

141

1. Lo, T. Multitarget track initiation using a modified Hough Transform / T. Lo, J. Litva, H. Leung, A. W. Bridgewater // AGARD Proc. Conf. on Pointing Tracking Systems, Seattle, USA, 12–15 Oct. 1993. – P. 25.1–25.8.
2. Hu, Z. Statistical performance analysis of track initiation techniques / Z. Hu, H. Leung, M. Blanchette // IEEE Trans. on Signal Processing. – 1997. – № 2. – P. 445–456.
3. Garvanov, I. Radar detection and track determination with a transform analo­gous to the Hough Transform / I. Garvanov, Ch. Kabakchiev // Proc. of Int. Radar Symp., Krakow, Poland, 24–26 May 2006. – P. 121–124.
4. Kabakchiev, Ch. Multisensor detection in randomly arriving impulse interfer­ence using the Hough transform / Ch. Kabakchiev, H. Rohling, I. Garvanov et al. // G. Kouemou (ed.). Radar Technology. – Vukovar: In-Tech, 2009. – P. 179–204.
5. Semerdjiev, E. Multiple sensor data association algorithm using Hough trans­form for track initiation / E. Semerdjiev, K. Alexiev, L. Bojilov. // Int. Conf. on Infor­mation Fusion, Las Vegas, USA, 6–9 July 1998. – Vol. 2. – P. 980–985.
6. Kabakchiev, Ch. Netted radar Hough detector in randomly arriving impulse in­terference / Ch. Kabakchiev, I. Garvanov, H. Rohling // Proc. of the RADAR Conf., Edinburgh, United Kingdom, 15–18 Oct. 2007. – Р. 1–5.
7. Kabakchiev, Ch. TBD netted radar system in presence of multi false alarms / Ch. Kabakchiev, I. Garvanov, L. Doukovska, V. Kyovtorov // Proc. of the 6th European Radar Conf., Rome, Italy, 30 Sept.–2 Oct. 2009. – P. 509–512.
8. Yankovich, S. M. Hough transform based multisensor, multitarget track initiation technique / S. M. Yankovich, M. Farooq // Opt. Eng. – 1998. – № 7. – P. 2064–2077.
9. Солонар, А. С. Особенности фильтрации координат и параметров движе­ния объекта на этапе совершения установившегося разворота / А. С. Солонар, П. А. Хмарский, А. А. Михалковский // Доклады БГУИР. – 2013. – № 4. – С. 67–73.
10. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
11. Василин, Г. Я. Зенитные ракетные комплексы / Г. Я. Василин, А. Л. Гу-ринович. – Мн.: Попурри, 2002. – 464 с.

142

1. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. посо­бие / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др.; под ред. И. Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 672 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
3. Татузов, А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации / А. Л. Татузов. – М.: Радиотехника, 2009. – 432 с.
4. Leung, H. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environments / H. Leung, Z. Hu, M. Blanchette // IEE Proc. on Radar, Sonar Navigation. – 1996. – № 4. – P. 246–254.
5. Brunner, J. S. A recursive method for calculating binary integration detection probabilities / J. S. Brunner // IEEE Trans. on AES. – 1990. – № 6. – P. 1034–1035.
6. Большаков, И. А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума / И. А. Большаков. – М.: Сов. радио, 1969. – 464 с.

38. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part I: Dynamic models /  
X. R. Li , V. P. Jilkov // IEEE Trans. on AES. – 2003. – № 4. – P. 1333–1364.

1. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: том 1 / Б. Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.
2. Julier, S. J. Unscented filtering and nonlinear estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proc. of the IEEE. – 2004. – № 3. – P. 401–422.
3. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление: выпуск 1 / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
4. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
5. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
6. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М.: Финансы и ста­тистика, 1988. – 176 с.

143

45. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инжене­  
ров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

46. Li, X. R. A survey of maneuvering target tracking. Part IV: Decision-based  
methods / X. R. Li, V. P. Jilkov // Proc. SPIE. – 2002. – Vol. 4728. – P. 511–534.

47. Li, X. R. A survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model me­  
thods / X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. on AES. – 2005. – № 4. – P. 1255–1321.