

На правах рукописи

Гуторов Александр Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ ТРАЕКТОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: Васильев Константин Константинович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится марта 2017 г. в :00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте СПбГЭТУ www.eltech.ru.

Автореферат разослан января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.238.03
к.т.н., доцент

Шевченко М.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последние годы произошло заметное улучшение тактико-технических показателей радиолокационных станций (РЛС). Вместе с тем изменяются и характеристики целей: наблюдается увеличение их числа и разнообразия, повышение скорости и маневренности, снижение радиолокационной видимости. Несмотря на значительный прогресс в технике, в этих условиях выдвигаются новые требования к анализу радиолокационной информации (РЛИ), которые во многих случаях не удастся удовлетворить в рамках традиционного построения РЛС. Раздельное применение РЛС при наличии комплекса нескольких разнесенных в пространстве РЛС с общей зоной обзора (многопозиционного радиолокационного комплекса (МП РЛК)) может существенно проигрывать стратегии объединенного использования их ресурса.

В настоящее время МП РЛК стали объектом интенсивных исследований во многих странах. Появилось большое число публикаций, в которых развивается теория МП РЛК, приводятся результаты научно-исследовательских проектных разработок и экспериментальных работ.

Анализируя перспективы радиолокации, многие авторы рассматривают развитие методов и алгоритмов совместной обработки информации МП РЛК как одно из важнейших направлений повышения эффективности систем контроля охраняемых территорий. Поэтому анализ известных и разработка новых алгоритмов траекторной фильтрации сигналов МП РЛК с целью снижения погрешностей оценки траекторных параметров обнаруживаемых целей является актуальной задачей.

Степень разработанности. В настоящее время проблема цифровой обработки данных в МП РЛК изучается достаточно интенсивно. Опубликовано большое число научных работ как в нашей стране, так и за рубежом. В 80-90-х годах исследования были направлены, в основном, на совершенствование способов и алгоритмов обработки, разработанных для однопозиционных РЛС. В последние годы интерес к проблеме обработки сигналов в МП РЛК существенно повысился ввиду возросшей эффективности вычислительной техники и сетей передачи данных. В то же время многие работы посвящены обработке данных синхронизированных РЛС, что накладывает ограничения по использованию алгоритмов для объединенных в сеть разнородных некогерентных РЛС.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является повышение точности оценивания траекторий целей в МП РЛК на основе разработки и исследования алгоритмов траекторной фильтрации данных нескольких асинхронных РЛС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Анализ известных и разработка новых математических моделей для описания изменения наблюдаемых в радиолокационных комплексах координат целей в асинхронные моменты времени.

2. Разработка алгоритмов фильтрации траекторных параметров радиолокационных целей на основе нахождения функций сглаживающего сплайна.

3. Разработка алгоритмов многомодельного байесовского совместного решения и оценивания параметров траекторий в радиолокационных комплексах, анализ их эффективности.

4. Объединение в многомодельных алгоритмах разнородных процедур траекторной фильтрации при сложном характере движения целей.

5. Создание имитационного программного комплекса для моделирования процессов формирования и обработки сигналов радиолокационных комплексов.

6. Проведение натуральных испытаний разработанных алгоритмов траекторной обработки.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм фильтрации данных РЛС с применением сглаживающих сплайнов, позволяющий уменьшить время обнаружения маневра, а также оценивать координаты быстроманеврирующей цели с большей точностью.

2. Разработаны и исследованы алгоритмы многомодельной байесовской обработки наблюдений МП РЛК, обеспечивающие устойчивое сопровождение целей в условиях существенной неопределенности характера их движения.

3. Предложен многомодельный алгоритм траекторной обработки сигналов МП РЛК, дополнительно содержащий процедуру вычисления сглаживающего сплайна, позволяющий уменьшить погрешность фильтрации при наличии быстроманеврирующей цели.

4. Создан программный комплекс для имитации 3D обстановки при наличии маневрирующих целей в зоне действия нескольких РЛС, формирования радиолокационных сигналов и помех, позволяющий исследовать эффективность разнообразных алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационной информации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретический интерес представляют:

1. Создание базы разнообразных математических моделей, предназначенных для применения в задачах оптимального байесовского синтеза и анализа алгоритмов совместного различения и фильтрации траекторных параметров маневрирующих целей.

2. Разработка методики применения сглаживающих сплайнов для решения задач траекторной фильтрации по асинхронным разноточным наблюдениям РЛС, учитывающей характеристики движения и маневры целей.

3. Разработка и исследование алгоритмов асинхронного многомодельной байесовской траекторной фильтрации маневрирующих целей.

К практической значимости работы можно отнести:

1. Рекомендации по улучшению характеристик существующих устройств цифровой обработки радиолокационных сигналов, поступающих от МП РЛК, на основе внедрения новых алгоритмов траекторной фильтрации.

2. Создание многофункционального программного комплекса, предоставляющего разработчикам МП РЛК широкие возможности для отладки разнообразных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов от маневрирующих целей в условиях помех.

3. Разработку и обоснование основных принципов и особенностей построения МП РЛК на базе опыта эксплуатации двух некогерентных стационарных навигационных РЛС с пересекающимися зонами видимости, предназначенных для наблюдения за акваторией реки.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач основано на статистической теории радиолокации, методах представления и обработки сигналов, математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм траекторной фильтрации сигналов, основанный на применении сглаживающих сплайнов, позволяет обнаруживать маневр цели за меньшее время, чем при использовании известных алгоритмов, а также повысить точность фильтрации траекторий движения быстроманеврирующих целей.

2. Многомодельный алгоритм совместного различения и оценивания обеспечивает повышенную точность фильтрации траекторных параметров в условиях сложного характера движения целей.

3. Включение сглаживающих сплайнов в алгоритм многомодельной фильтрации повышает точность фильтрации при появлении быстроманеврирующих целей в зоне обзора МП РЛК.

4. Разработанный программный комплекс позволяет проводить имитационное моделирование всех основных этапов радиолокационного наблюдения маневрирующих целей и обработки сигналов МП РЛК.

Достоверность результатов и апробация работы. Обоснованность научных положений, результатов и выводов обусловлена корректным использованием математических методов исследования, применением современных вычислительных средств и прикладных программ, подтверждается близостью теоретических результатов, данных математического моделирования и натурных испытаний на комплексе двух РЛС.

Публикации и апробация результатов. По теме диссертации автором опубликовано 16 работ: 3 статьи в рецензируемых изданиях [1-3], патент на изобретение [4], 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ [5, 6], 2 тезиса доклада [8, 13] и 8 статей в сборниках трудов научных конференций [3, 9-12, 14-16]. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- VIII и IX Всероссийские научно-практические конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», г. Ульяновск (2013 г., 2015 г.);
- VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», г. Москва (2014 г.);
- Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях», г. Ульяновск (2013-2015 г.);
- Научно-техническая конференция «Интегрированные системы управления», г. Ульяновск (2013 г., 2016 г.).

Результаты диссертации, связанные с конкретными НИР, докладывались на НТС предприятия ФНПЦ АО «НПО «Марс» (2013-2015 г.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, списка принятых сокращений и трех приложений. Основная часть работы изложена на 143 страницах машинописного текста, включает 41 рисунок, список литературы содержит 101 наименование, в том числе 16 работ автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая ценность.

В первой главе представлена общая характеристика и классификация МП РЛК, проанализированы существующие алгоритмы траекторной обработки сигналов, применимых в том числе для многопозиционных комплексов, изучены варианты и особенности архитектур построения МП РЛК. Приведены известные модели сигналов и помех в МП РЛК, намечены пути повышения эффективности систем совместной обработки данных.

При фильтрации траектории маневрирующей цели предложено использовать методику сглаживания сплайнами. Показано, что кубический сплайн особенно эффективен для экстраполяции данных быстро маневрирующей цели; при этом функция сглаживающего сплайна отражает закономерность маневрирования.

Во второй главе приведена разработка новых алгоритмов фильтрации с применением сглаживающих сплайнов.

Разработаны и предложены алгоритмы стробирования и фильтрации траекторных данных, основанные на нахождении функции кубического сглаживающего сплайна $f_i(x) = A_i + B_i(x - x_i) + C_i(x - x_i)^2 + D_i(x - x_i)^3$. Область определения сплайна задается отрезком $[a, b]$ – первым и последним

наблюдением в заданном скользящем окне, $[x_i, x_{i+1}] \in [a, b]$ - интервалы сплайна ($x_1 < x_2 < x_3 \dots$).

При определении коэффициентов необходимо решить задачу минимизации функционала $(1-\rho) \sum_{k=i}^{i+N} (Y_k - \hat{f}(x_k))^2 + \rho \int_{x_i}^{x_{i+N}} \hat{f}''(x)^2 dx$, где Y_i - наблюдения,

определяемые как $Y_i = f(x_i)$; \hat{f} - сглаживающие сплайны функции f ; $0 \leq \rho \leq 1$ - коэффициент сглаживания; $N > 3$ - количество наблюдений в скользящем окне.

При фильтрации траектории цели фильтр сглаживающего сплайна (ФСС) учитывает погрешности радиолокационных измерений и маневр цели, при этом не требуется строгая периодичность наблюдений. Для реализации фильтра задается количество наблюдений N в скользящем окне, по которым будет производиться нахождение функции сглаживающего сплайна и коэффициент сглаживания ρ . Коэффициент сглаживания ρ задается на основании предположения по возможностям маневрирования цели. Выбор параметра необходимо осуществлять в зависимости от СКО измерений, интервалов времени между отметками, динамических характеристик обнаруживаемых целей. При задании малого коэффициента сглаживания ρ , сплайн будет проходить близко к наблюдениям, а большом ρ произойдет слишком сильное усреднение. Было показано, что при фильтрации траекторных данных цели с преимущественно прямолинейным равномерным перемещением, подходящим является значение ρ близкое к 0.6, а для маневрирующей цели целесообразно задавать коэффициент между 0.6 и 0.8. На рисунке 1 показаны СКО ошибок фильтрации при различных коэффициентах сглаживания ρ (0.01, 0.21, 0.35, 0.70, 0.95). Хорошо видно, что на 50-57 наблюдениях обнаруживается маневр цели. Для фильтра с коэффициентом сглаживания $\rho = 0.95$ наблюдается заглаживание маневра и увеличение СКО на этом участке маневрирования. При малых ρ (0.01, 0.21), наоборот, фильтр повторяет все погрешности измерений, в результате чего фильтрация оказывается недостаточной.

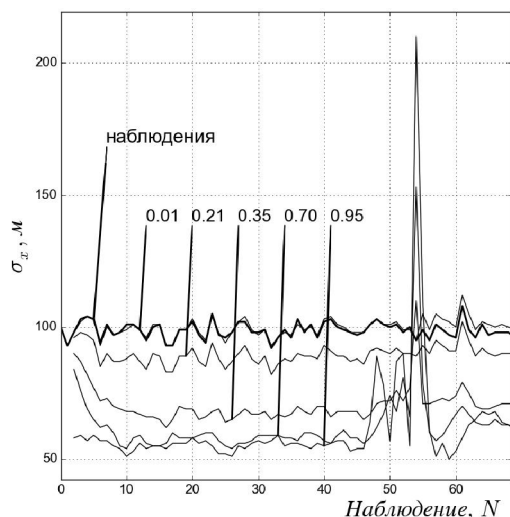


Рисунок 1 – СКО ошибок фильтрации сглаживающим сплайном при разных заданных коэффициентах сглаживания ρ

Для работы алгоритма требуется накопление первых N наблюдений траектории цели $R_1 \dots R_N$. При последующем асинхронном получении наблюдения находится функция сглаживающего сплайна по предыдущим N наблюдениям, строится отфильтрованная траектория $\bar{R}_1 \dots \bar{R}_N$ и корреляционный эллиптический строб оценки экстраполированного положения цели на момент времени принятого наблюдения. Если наблюдение попадает в корреляционный строб, то принимается решение о принадлежности цели к данной траектории. Показано, что одним из результатов рекуррентной фильтрации N последних наблюдений является уточнение положения цели.

Для проверки эффективности и вычислительной сложности работы алгоритмов траекторной фильтрации данных было проведено статистическое моделирование движения цели и наблюдений ее положения с помощью имитируемых асинхронных РЛС. Полученные результаты имитационного моделирования иллюстрируются графической зависимостью среднеквадратических ошибок (СКО) результатов фильтрации от номера наблюдения. Для сравнительного анализа и фильтрации всех видов рассматриваемых траекторий, при построении сглаживающего сплайна были взяты постоянный оптимальный весовой коэффициент сглаживания для смешанных движений $\rho = 0.5$, а также постоянные значения ковариации шума процесса и ковариация ошибки измерения для фильтра Калмана с одинаковыми начальными значениями.

При движении цели с малым маневром оценка траектории на основе ФСС имеет большее СКО, чем для фильтра Калмана настроенного на движение с малыми дисперсиями порождающего процесса (рисунок 2). Но при более сильном маневрировании цели, алгоритм с применением фильтра Калмана, при тех же начальных параметрах фильтрации, может привести к большим ошибкам.

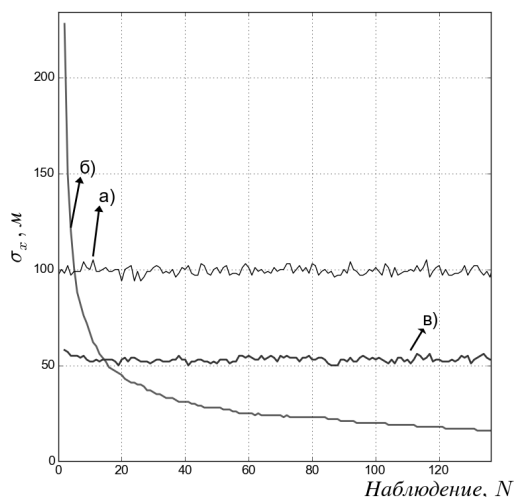


Рисунок 2 – СКО ошибок фильтрации при движении цели со слабым маневрированием:

а) наблюдения; б) фильтр Калмана; в) фильтр сглаживающего сплайна

Для более сложных траекторий (рисунок 3), где на 55–59 наблюдениях РЛС наблюдается маневр цели по курсу (поворот на 45°) с постоянной угловой скоростью равной $v_{CT} = 0.104 \text{ рад/с}$, СКО ошибки фильтра Калмана резко увеличивается (до 10 раз относительно установившегося значения), в отличие от СКО ФСС который кратковременно увеличивается в 3 раза (рисунок 4). Для уменьшения инерционности фильтра Калмана можно изменить значения ковариационной матрицы порождающего процесса в уравнении состояния. При этом фильтр Калмана более динамично реагирует на маневр, но СКО ошибок увеличивается. Особенно этот эффект заметен при фильтрации позиции быстро маневрирующей цели с изменяющимся вектором ускорения. Для тех же условий сглаживающий сплайн более “отзывчив” на смену траектории движения цели. Уже через два наблюдения с помощью ФСС существенным образом корректируется предсказание направления движения цели. Моделирование показало, что в случае априорно неизвестной модели движения цели предпочтительно использовать совокупность алгоритмов фильтрации, оптимизированных под различные динамические модели; при этом на каждой очередной итерации целесообразно принимать решение о применимости той или иной модели к наблюдаемому движению цели.

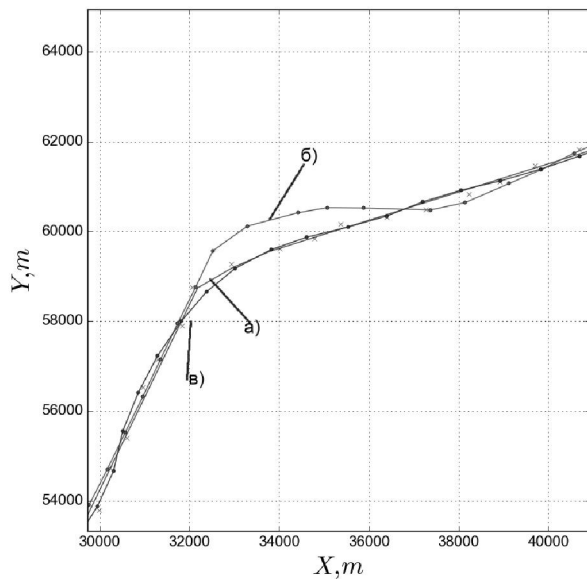


Рисунок 3 – Оцениваемая траектория движения цели:
а) наблюдения; б) фильтр Калмана; в) фильтр сглаживающего сплайна

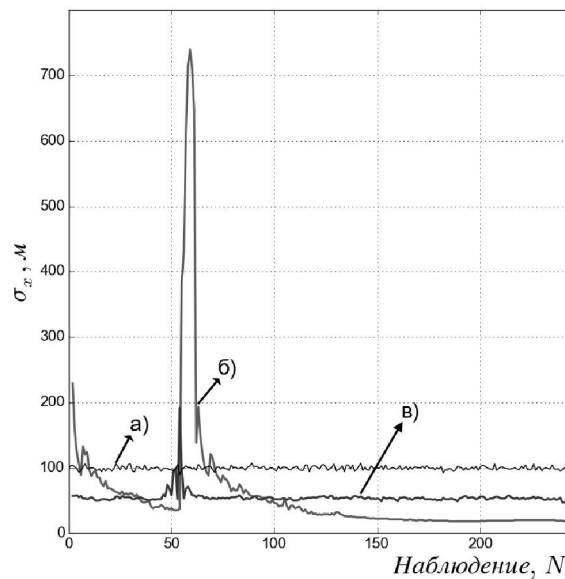


Рисунок 4 – СКО ошибок фильтрации движения цели:
а) наблюдения; б) фильтр Калмана; в) фильтр сглаживающего сплайна

Таким образом, предлагается одновременное применение нескольких ФСС, настроенных на разные модели движения с выбором той, которая имеет наименьшее СКО. Предложен новый метод фильтрации траектории цели сглаживающими сплайном, который учитывает погрешности радиолокационных измерений и маневр цели. Его достоинством является сокращение времени обнаружения траектории маневрирующей цели, путем рекуррентного нахождения функции сплайна.

В третьей главе проведен синтез и анализ многомодельного (ММ) алгоритма. Для оценки траектории целей предлагается многомодельный алгоритм, принцип действия которого основан на представлении движения цели в виде последовательной смены моделей. ММ алгоритм включает в свой состав набор из N моделей, являющимися кандидатами на соответствие характеру движения цели в данный момент, а также набор фильтров, соответствующих каждой из этих моделей. ММ алгоритм базируется на оптимальном байесовском совместном различении и рекуррентном оценивании при описании траектории движения объекта с помощью векторных стохастических разностных уравнений.

Рассмотрена работа нескольких некогерентных двухкоординатных РЛС, объединенных в МП РЛК, передающих информацию в центр обработки. Работа ММ алгоритма начинается с приема первого наблюдения (z_{x0}, z_{y0}, z_{z0}) от любой РЛС из состава МП РЛК в момент времени t_0 , в результате которого будет произведена операция автозахвата цели в условиях отсутствия априорных характеристик ее положения. Данные о координатах поступают в виде $z_{xi} = x_i + \xi_{xi}$,

$z_{yi} = y_i + \xi_{yi}$, $z_{zi} = z_i + \xi_{zi}$, где ξ_{xi} , ξ_{yi} , ξ_{zi} – случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями σ_{xi}^2 , σ_{yi}^2 , σ_{zi}^2 соответственно. Модели движения цели задаются с помощью следующих стохастических уравнений для координат $x_{l(i)} = x_{l(i-1)} + V_{l(x_{i-1})} T_i$, $y_{l(i)} = y_{l(i-1)} + V_{l(y_{i-1})} T_i$, $z_{l(i)} = z_{l(i-1)} + V_{l(z_{i-1})} T_i$ и скоростей их изменения: $V_{xl(i)} = V_{xl(i-1)} + \gamma_{xl} \sigma_{xl(i)} \xi_{xl(i)}$, $V_{yl(i)} = V_{yl(i-1)} + \gamma_{yl} \sigma_{yl(i)} \xi_{yl(i)}$, $V_{zl(i)} = V_{zl(i-1)} + \gamma_{zl} \sigma_{zl(i)} \xi_{zl(i)}$ для моделей с номерами $l = 0, 1, \dots, M-1$ и произвольного интервала времени $T_i = t_i - t_{i-1}$ между последовательными наблюдениями. Дисперсии определяются как $\sigma_{x(i)}^2 = V_{x0}^2 \frac{T_i}{T_{npl}}$, $\sigma_{y(i)}^2 = V_{y0}^2 \frac{T_i}{T_{npl}}$, $\sigma_{z(i)}^2 = V_{z0}^2 \frac{T_i}{T_{npl}}$, где V_{x0} , V_{y0} , V_{z0} – начальная скорость движения цели по координатам x_i, y_i, z_i .

Коэффициенты $\gamma_{xl}, \gamma_{yl}, \gamma_{zl}$ определяют относительное среднее изменение скорости цели за время прямолинейного движения с определенной начальной скоростью в зоне действия РЛС. Для их выбора определим общее изменение скорости за время T_{np} по координатам x_i, y_i, z_i как $V_{xl(k)} - V_{xl(0)} = \gamma_{xl} V_{xl(0)} \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{T_i}{T_{np}}} \xi_{xl}$, $V_{yl(k)} - V_{yl(0)} = \gamma_{yl} V_{yl(0)} \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{T_i}{T_{np}}} \xi_{yl}$, $V_{zl(k)} - V_{zl(0)} = \gamma_{zl} V_{zl(0)} \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{T_i}{T_{np}}} \xi_{zl}$. Дисперсия изменения скорости $\sigma_{Vx(i)}^2 = \gamma_{xl}^2 V_{xl(0)}^2$, $\sigma_{Vy(i)}^2 = \gamma_{yl}^2 V_{yl(0)}^2$, $\sigma_{Vz(i)}^2 = \gamma_{zl}^2 V_{zl(0)}^2$, а его СКО $\sigma_{Vx(i)} = \gamma_{xl} V_{xl(0)}$, $\sigma_{Vy(i)} = \gamma_{yl} V_{yl(0)}$, $\sigma_{Vz(i)} = \gamma_{zl} V_{zl(0)}$. Таким образом, коэффициенты $\gamma_{xl} = \frac{\sigma_{Vx(i)}}{V_{xl(0)}}$, $\gamma_{yl} = \frac{\sigma_{Vy(i)}}{V_{yl(0)}}$, $\gamma_{zl} = \frac{\sigma_{Vz(i)}}{V_{zl(0)}}$ можно определить как относительное среднее изменение скорости по

координатам x_i, y_i, z_i . Например, при $\gamma_{xl} = 0,01$, возможное изменение скорости по координате x на рассматриваемом интервале наблюдения с помощью РЛС составит 1%. Задавая различные значения $\gamma_{xl}, \gamma_{yl}, \gamma_{zl}$ можно получить модели для различной динамики движения целей. Поскольку рассмотренные модели относятся к векторным авторегрессионным линейным уравнениям состояния, то рассмотренный подход позволяет использовать известные методы совместного различения-оценивания параметров при траекторной обработке информации от любого числа источников.

Для решения задачи совместного различения типа модели и оценки параметров воспользуемся рекуррентной процедурой, базирующейся на следующей модели наблюдений $\bar{z}_i = C_{li} \bar{x}_{li} + \bar{n}_{li}$, $i = 1, 2, \dots, k$, и модели изменения параметров $\bar{x}_{li} = \phi_{l(i-1)} \bar{x}_{l(i-1)} + \bar{\xi}_{li}$, $i = 1, 2, \dots, k$, $l = 0, 1, \dots, M-1$. Тогда рекуррентное

оценивание параметров осуществляется на основе соотношений $\hat{\bar{x}}_{li} = \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li} + P_{li} C_{li}^T V_{li}^{-1} (z_i - C_{li} \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})$, $\hat{\bar{x}}_{\varepsilon li} = \varphi_{l(i-1)} \hat{\bar{x}}_{l(i-1)}$, $i = 1, 2, \dots, k$, $l = 0, 1, \dots, M-1$.

В соответствии байесовским критерием качества решение о выборе номера модели принимается из условия минимума

$$\hat{J}_l = \sum_{i=1}^k (\bar{z}_i - C_{li} \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})^T (V_{li}^{-1} - V_{li}^{-1} C_{li} P_{li} C_{li}^T V_{li}^{-1}) (\bar{z}_i - C_{li} \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li}), \quad \text{где} \quad l = 0, 1, \dots, M-1,$$

$\hat{\bar{x}}_{\varepsilon li} = (\hat{x}_{\varepsilon li} \quad \hat{y}_{\varepsilon li} \quad \hat{z}_{\varepsilon li} \quad \hat{v}_{\varepsilon lix} \quad \hat{v}_{\varepsilon liy} \quad \hat{v}_{\varepsilon liz})^T$. Представленная сумма \hat{J}_l взвешенных ошибок представляет собой точное значение критерия для совокупности ровно k наблюдений. Однако при непрерывном поступлении асинхронных данных необходимо принимать решение в скользящем окне. Для этого может быть предложена статистика $\hat{J}_{lk} = \sum_{i=k}^{k+N} (\bar{z}_i - C_{li} \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})^T (V_{li}^{-1} - V_{li}^{-1} C_{li} P_{li} C_{li}^T V_{li}^{-1}) (\bar{z}_i - C_{li} \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})$. Как показали

результаты статистического моделирования, можно существенно сократить объем вычислений без заметной потери эффективности, если заменить \hat{J}_{lk} суммой квадратов разностей экстраполированных значений и наблюдений в скользящем окне длиной N : $\hat{J}_{lk} = \sum_{i=k}^{k+N} (\bar{z}_i - \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})^T (\bar{z}_i - \hat{\bar{x}}_{\varepsilon li})$, $l = 0, 1, \dots, M-1$, $\hat{\bar{x}}_{\varepsilon li} = (\hat{x}_{\varepsilon li} \quad \hat{y}_{\varepsilon li} \quad \hat{z}_{\varepsilon li})^T$.

Результаты обработки траектории цели с помощью ММ алгоритма представлена на рисунках 5 и 6. Анализ показывает, что для прямолинейных равномерных перемещений, как правило, выбирается модель с малым значением $\gamma_l = 0,001$. При увеличении интенсивности маневрирования сначала будет выбрана модель с $\gamma_l = 0,01$ а, затем, на 19 шаге, - модель с $\gamma_l = 0,1$. При возвращении цели к равномерному прямолинейному движению происходит смена моделей в обратной последовательности.

Для анализа эффективности работы предложенного ММ алгоритма было проведено статистическое компьютерное моделирование для различных видов движения целей. В качестве базового алгоритма был выбран фильтр Калмана, работающий с разными параметрами дисперсий изменения скоростей ($\gamma = 0.01; 0.1; 0.5$). Это позволяет лучше анализировать одновременно линейно движущиеся и маневрирующие цели.

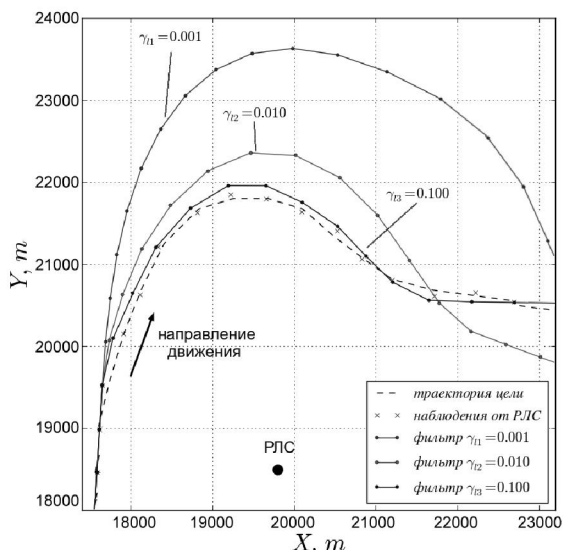


Рисунок 5 – Отрезок траектории движения цели и ее оценка при различных коэффициентах маневрирования

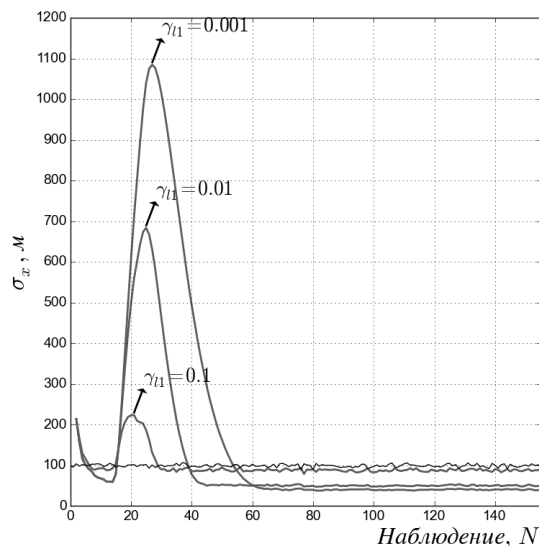


Рисунок 6 – СКО ошибки оценивания траектории движения цели с помощью ММ алгоритма

Для сравнительной оценки эффективности были взяты два одномодельных алгоритма. Один из одномодельных алгоритмов настроен на сопровождение неманеврирующей цели (CV), второй – на сопровождение маневрирующей цели (CA). Производилось определение положения цели на основе данных асинхронных двухкоординатных РЛС-1 и РЛС-2 с периодами сканирования 1 сек. и 2.2 сек. и СКО 100 м.; учет очередного наблюдения осуществлялся в момент его поступления. Траектория цели, представленная на рисунке 7, состоит из четырех типовых участков движения: прямолинейное равномерное, радиальное равноускоренное, прямолинейное равноускоренное.

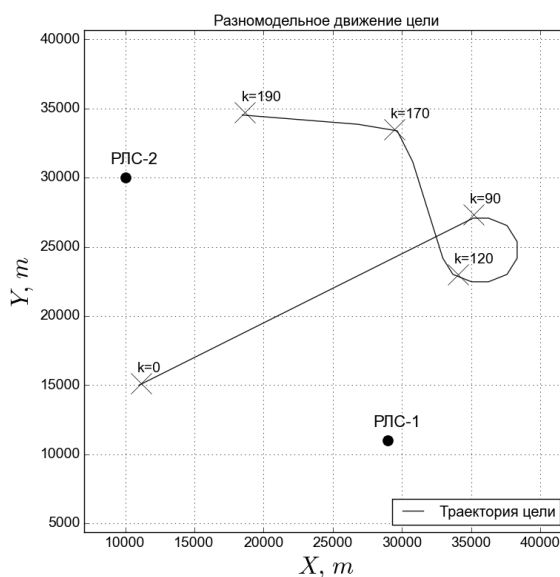


Рисунок 7 – Траектория движения цели

Полученные результаты моделирования иллюстрируются графической зависимостью СКО σ_x фильтрации от номера наблюдения (рисунок 8). На первом участке прямолинейного движения предлагаемый алгоритм и одномодельный алгоритм, настроенный на равномерное прямолинейное движение, показывают близкое качество оценки координат.

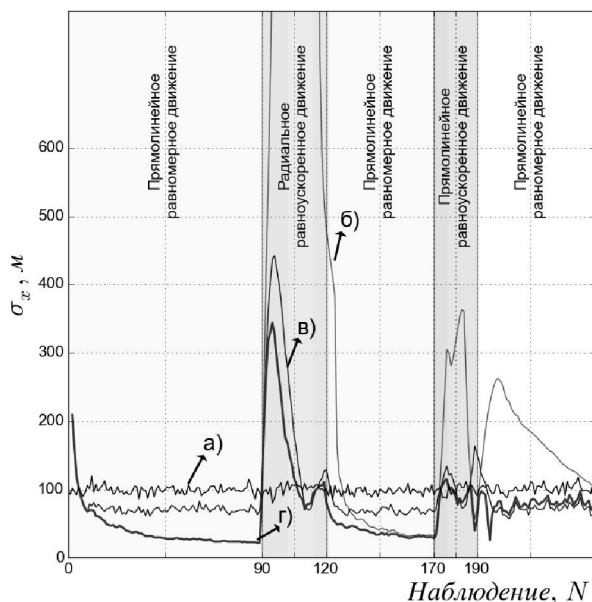


Рисунок 8 – СКО ошибок фильтрации движения цели:

- а) наблюдения; б) одномодельный фильтр Калмана (настройка на прямолинейное равномерное движение); в) одномодельный фильтр Калмана (настройка на маневр); г) ММ алгоритм с тремя моделями движения

При начале радиального движения одномодельные алгоритмы, рассчитанные на прямолинейное равноускоренное движение, приводят к большим ошибкам; в реальной ситуации с большой вероятностью произойдет срыв сопровождения цели. Так как одномодельные фильтры работают в установившемся режиме и их настройки не соответствуют радиальному движению, требуется достаточно большое количество времени для их адаптации к текущей динамике движения. Например, если в системе будет задано пороговое значение СКО оценивания координат цели $2 \cdot \sigma$, то цель будет снята с сопровождения и потребуется завязка новой траектории.

Вместе с тем, для ММ алгоритма СКО оценки координат оказываются на 10 - 50% меньше, чем для одномодельных алгоритмов. При наблюдении быстроманеврирующих целей с помощью ММ алгоритма выигрыш становится более 50%. Сравнение предложенных процедур со значительно более сложным известным адаптивным алгоритмом с межмодельным взаимодействием (ИММ), возможностью обновления состояния фильтров или их полной переинициализации, показало близость их эффективности и даже выигрыш ММ

алгоритма до 10% при неудачно заданных вероятностях переходов для IMM алгоритма.

На основе анализа результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- в многомодельных алгоритмах заданная точность в процессе маневрирования цели достигается уже на третьем-четвертом наблюдении благодаря быстрой смене применяемого фильтра, тогда как одномодельные алгоритмы достаточно инерционны: без переинициализации настроек фильтра требуется до 10-20 итераций для достижения приемлемой точности;
- реализация IMM алгоритмов с межмодельным взаимодействием требуют значительно больше затрат, в отличие от MM алгоритма, где достаточно добавить в набор фильтры с предустановленными параметрами, вычисляя оценку по каждому из них с последующим сравнением результатов оценки и наблюдений;
- по критерию «точность-вычислительные затраты» MM алгоритм может быть рекомендован в качестве базового для траекторной фильтрации данных МП РЛК.

Дальнейшее улучшение качества MM алгоритмов может быть основано на включении в его состав алгоритма ФСС, обладающим быстрой реакцией на изменение характера движения цели. Это определяет высокую устойчивость ФСС при сопровождении траектории по отношению к срыву. Структурная схема MM-ФСС алгоритма представлена на рисунке 9.

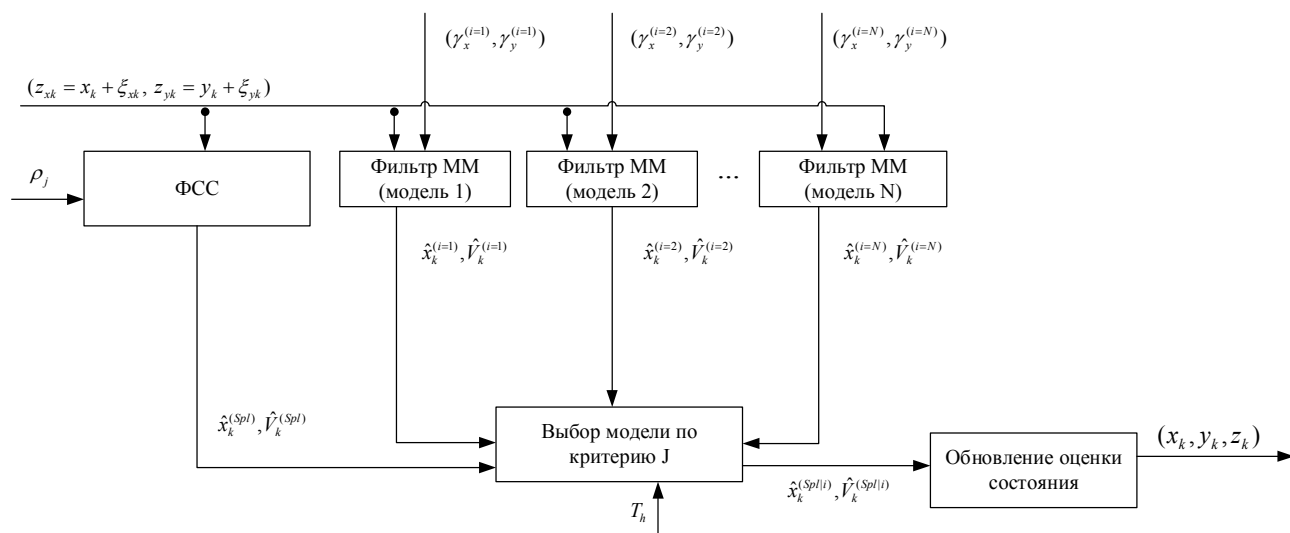


Рисунок 9 – Структурная схема многомодельного алгоритма фильтрации при включении разнородных алгоритмов

Отличием алгоритма является добавление с схему MM блока компарации результатов фильтрации набора γ -фильтров и ФСС, настроенного на

интенсивный маневр $\rho \rightarrow 0.75$. Выбор между фильтрами Калмана и фильтром сглаживающего сплайна осуществляется по критерию \hat{J}_{0lk} минимума суммы квадратов разностей экстраполированных значений и наблюдений в скользящем окне.

Анализ работы алгоритма ММ-ФСС проводился для различных траекторий и при разных настройках фильтров. Для демонстрации характерных зависимостей и численного анализа предложенного подхода ММ-ФСС алгоритма сравним его действие на примере траектории цели, представленная на рисунке 7. На рисунке 10 показаны отдельные результаты фильтрации траектории ММ и ФСС. СКО ошибок работы алгоритма ММ-ФСС с тремя фильтрами Калмана и ФСС в пуле фильтров показаны на рисунке 11.

Реализация алгоритма ММ-ФСС дает до 10% снижения СКО при обнаружении и завершении маневра, поскольку алгоритм ФСС обладает более быстрой реакцией на изменение характера движения цели. При равномерных прямолинейных и равноускоренных характерах движения ММ-ФСС алгоритм не дает существенного выигрыша в точности определения координат по сравнению с алгоритмом ММ. Для прямолинейного равномерного движения будет выбран фильтр с $\gamma_1 = 0,001$, для радиального равноускоренного – ФСС.

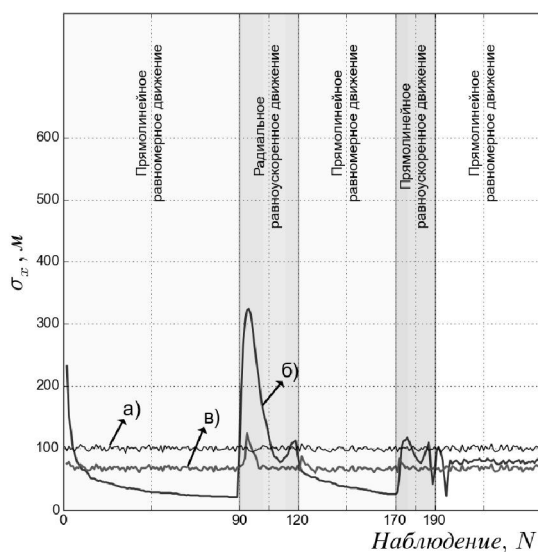


Рисунок 10 – СКО оценивания координат цели:

а) наблюдения; б) ММ алгоритм с тремя моделями движения; в) ФСС с заданным $\rho = 0.75$

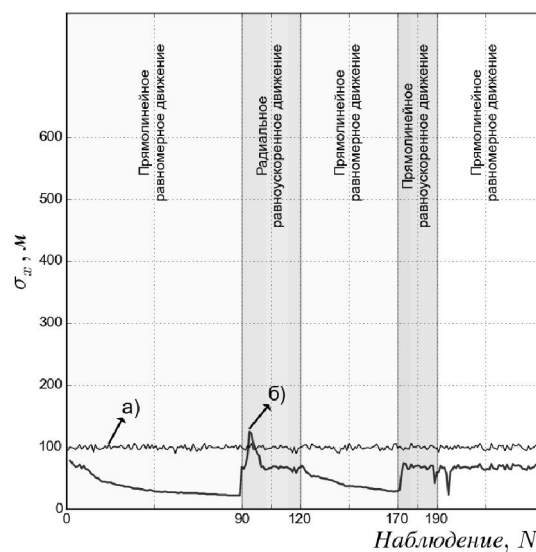


Рисунок 11 – СКО оценивания координат цели:

а) наблюдения; б) ММ-ФСС алгоритм

Таким образом, основным достоинством предложенного алгоритма ММ-ФСС с разнородными фильтрами от ММ является определение маневров за меньшее количество наблюдений. При этом на участках движения цели с малыми

ускорениями существенного ухудшения точности оценивания координат не наблюдается.

Одним из дополнительных результатов проведенного исследования было получение способа измерения пространственных координат цели в многопозиционной системе двухкоординатных РЛС.

Основные результаты и выводы

1. Предложено для фильтрации траектории цели использовать сглаживающие сплайны, которые учитывают погрешности радиолокационных измерений и маневр цели. При этом наблюдается быстрое обнаружение маневра цели (до 3-4 наблюдений) на основе рекуррентного нахождения функции сплайна.

2. Проведен синтез и анализ многомодельного алгоритма, позволяющего производить фильтрацию и объединение наблюдений с учетом изменяющегося характера движения целей. Выбор модели может осуществляться с помощью классического подхода или предложенного критерия по наблюдениям в скользящем окне. При наблюдении быстроманеврирующих целей СКО ошибок оценивания изменяющихся координат снижается на *10-50%* по сравнению с одномодельными процедурами.

3. Предложено включение в многомодельный алгоритм фильтра скользящего сплайна. Анализ показал возможности дополнительного снижения СКО ошибок до *10%* при резких изменениях траектории цели.

4. Разработан программный комплекс моделирования движения целей в трехмерной сцене, имитации работы РЛС, объединения и построения обобщенной траектории по наблюдениям в радиолокационном комплексе. На основе комплекса были апробированы известные и предлагаемые методы траекторной обработки сигналом МП РЛК.

5. Разработан аппаратно-программный комплекс наблюдения за акваторией реки на основе двухкоординатных стационарных навигационных РЛС типа «Река», включающий предложенные алгоритмы обработки траекторных данных. Полученные экспериментальные результаты позволили выработать рекомендации по практическому использованию многомодельных алгоритмов траекторной фильтрации и подтвердили основные теоретические положения.

В приложении содержатся акт внедрения результатов диссертационной работы в производственную деятельность ФНПЦ АО «НПО «Марс», копия патента на изобретение, копии свидетельств на государственную регистрацию программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Васильев, К. К. Многомодельные алгоритмы обработки данных системы мобильных РЛС / К. К. Васильев, Э. Д. Павлыгин, А. С. Гуторов //

- Автоматизация процессов управления. : – Ульяновск, 2015. – №4(38). – С. 4-14
2. Гуторов, А. С. Математическое моделирование и исследование алгоритмов фильтрации при траекторной обработке данных по целям / А. С. Гуторов // Автоматизация процессов управления. : – Ульяновск, 2015. – №1(39). – С. 34-41
3. Васильев, К. К. Построение траекторий маневрирующих целей на основе сплайнов и фильтра Калмана / К. К. Васильев, Э. Д. Павлыгин, А. С. Гуторов // Автоматизация процессов управления. : – Ульяновск, 2016. – №1(43). – С. 67-76

Патенты, свидетельства об государственной регистрации программ для ЭВМ

4. Пат. 2581706 Российская федерация, МПК G01S 11/04 (2006.01). Способ измерения пространственных координат цели в многопозиционной системе двухкоординатных РЛС / К. К. Васильев, В. А. Маклаев, А. С. Гуторов, Э. Д. Павлыгин : заявитель и патентообладатель Ульяновск : Федеральный научно-производственный центр акционерное общество «Научно-производственное объединение «Марс». – № 2014154571/07 ; заявл. 31.12.2014 ; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11; – 3 с.
5. Свидетельство № 2014616169. Программа для ЭВМ «Имитатор сигналов двухпозиционной РЛС»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / С. М. Наместников, Д. С. Кондратьев, М. Н. Служивый, Н. А. Андриянов, А. С. Гуторов ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет». – № 2014613552 ; 21.04.2014 ; зарегистр. 20.07.2014. – 1 с.
6. Свидетельство № 2014616169. Программа для ЭВМ «Web-сервис наблюдения за акваторией реки»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / А. С. Гуторов, Э. Д. Павлыгин, К. К. Васильев, С. М. Наместников, Д. С. Кондратьев ; заявитель и правообладатель Федеральный научно-производственный центр акционерное общество «Научно-производственное объединение «Марс». – № 2015662271 ; 15.05.2015 ; зарегистр. 09.02.2016. – 1 с.

Публикации в других изданиях

7. Гуторов, А. С. Способы удаления избыточности и сжатия РЛИ при передаче по цифровым каналам связи / А. С. Гуторов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Восьмой выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 29-32
8. Павлыгин, Э. Д. Многопозиционные радиолокационные системы / Э. Д. Павлыгин, А. С. Гуторов, Н. В. Лучков // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем :

- Сборник научных трудов Восьмой всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). : – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 15-17
9. Гуторов, А. С. Проблемы совмещения отождествленных объектов от РЛС в многопозиционных системах / А. С. Гуторов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов Восьмой всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). : – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 15-17
10. Гуторов, А. С. Проблемы выделения движущихся объектов в многопозиционных системах РЛС / А. С. Гуторов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Девятый выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – С. 44-47
11. Васильев, К. К. Алгоритмы траекторной обработки по наблюдениям нескольких РЛС / К. К. Васильев, А. С. Гуторов, С. М. Наместников // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Девятый выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – С. 47-50
12. Гуторов, А. С. Реализация алгоритма построения траекторий целей по многопозиционным наблюдениям / А. С. Гуторов, С. М. Наместников, Д. С. Кондратьев // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Девятый выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – С. 50-55
13. Павлыгин, Э.Д. Программный комплекс для имитации целей и обработки сигналов в многопозиционной РЛС / Э. Д. Павлыгин, К. К. Васильев, А. С. Гуторов, С. М. Наместников // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» : Сборник докладов. – М. : JRE – ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2014. – С. 286-290
14. Гуторов, А. С. Некоторые вопросы построения комплекса наблюдения за акваторией реки с применением сети многопозиционной РЛС / А. С. Гуторов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Десятый выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 49-52
15. Гуторов, А. С. Применение алгоритма оценки сглаживающего сплайна для фильтрации данных траектории цели / А. С. Гуторов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. Десятый выпуск. : – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 52-55
16. Гуторов, А. С. Алгоритм матричного отождествления траекторий / А. С. Гуторов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов. : – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – С. 61-64