

На правах рукописи



Коновалов Александр Анатольевич

**ОБНАРУЖЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ
В МНОГОПОЗИЦИОННОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ
С АСИНХРОННЫМ ОБЪЕДИНЕНИЕМ ОТМЕТОК**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре Радиотехнических систем
Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель: Кутузов Владимир Михайлович
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Слукин Геннадий Петрович
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Радиоэлектронные
системы и устройства Московского
государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана

Жукова Ирина Николаевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры
Радиосистем Новгородского государственного
университета им. Ярослава Мудрого

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт «Вектор»

Защита состоится 23 декабря 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехниче-
ского университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376,
Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

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

Автореферат разослан 22 октября 2015 г.

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



Шевченко М. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Многопозиционный радиолокационный комплекс (МП РЛК) в настоящее время рассматривается как доступная альтернатива многопозиционной 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 (ОТ) по данным, поступающим от нескольких источников. Спецификой этой задачи является асинхронное поступление неравноточных измерений, причем, в общем случае, в неизвестные моменты времени.

Степень разработанности. В настоящее время основное внимание при разработке алгоритмов объединения данных в радиолокации уделяется объединению траекторий (Y. Bar-Shalom, P.K. Willett and X. Tian), в том числе асинхронному (A.T. Alouani, J.E. Gray and H. McCabe). Схемы, в которых производится объединение отметок, рассматриваются реже, причем исследуются, как правило, вопросы объединения синхронных данных (R.J. Pawlak and A.A. Beex) либо синхронизированных при помощи экстраполяции (Y. Li, H. Leung and M. Blanchet); асинхронные способы объединения рассматриваются в основном в контексте фильтрации (M.L. Krieg) или отождествления (S. Deb, K.S. Pattipati and Y. Bar-Shalom). Как показывает анализ представленных в литературе алгоритмов ОТ в системах с объединением информации (алгоритмы MSTI (Pawlak and Beex), на основе решения многомерной задачи назначения (A.V. Poore, N. Rijavec and T.N. Barker), логические (Li, Leung and Blanchet), на основе преобразований Хафа: модифицированного (T. Lo, J. Litva, H. Leung and A.W. Bridgewater) и полярного (I. Garvanov and Ch. Kabakchiev) (ППХ), децентрализованного ОТ (S. M. Yankovich and M. Farooq)), большая их часть не может быть применена в МП РЛК с АОО, поскольку либо в них подразумевается синхронность наблюдений, либо они имеют высокую вычислительную сложность, либо недостаточно теоретически проработаны. Исключением является алгоритм ОТ на основе ППХ, который может быть применен в МП РЛК, однако имеет ряд недостатков, обусловленных свойствами ПХ (прежде всего необходимостью использования аккумулятора) и затрудняющих его практическую реализацию. Кроме того, указанные алгоритмы предназначены для обнаружения траектории цели, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью, и не работоспособны при совершении целью маневра.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритма обнаружения траектории одиночной радиолокационной це-

ли на фоне помех при неизвестном характере ее движения на основе асинхронных и неравноточных измерений координат, осуществляемых в МП РЛК, объединяющем произвольное количество независимых обзорных двухкоординатных пространственно-разнесенных РЛС разных диапазонов длин волн.

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 вероятностей 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.

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, постоянных на интервале обнаружения траектории.
2. Разработан алгоритм обнаружения траектории, использующий принцип ОКП и предназначенный для применения в многопозиционном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок.
3. Разработан метод стробирования отметок на этапе обнаружения траектории, учитывающий погрешности радиолокационных измерений и возможный маневр цели.
4. Получены аналитические выражения для расчета статистических характеристик алгоритма обнаружения траектории на основе ОКП.
5. 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.
6. Предложена методика расчета значения и дисперсии угловой скорости цели, совершающий маневр в виде поворота с постоянной скоростью, с применением нелинейного ансцентного преобразования.
7. Предложена методика оценивания параметров траектории на этапе ее обнаружения в условиях неопределенности характера движения цели, использующая алгоритм статической многомодельной фильтрации.

Теоретическая значимость. Теоретический интерес представляют:

1. Результаты разработки нового принципа выделения траектории цели, ко-

торый можно использовать для обнаружения траектории маневрирующей и не маневрирующей цели в различных радиотехнических средствах наблюдения.

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 значимость. Практическое значение результатов работы заключается в разработке алгоритма обнаружения траектории одиночной маневрирующей цели в радиотехнических системах с объединением информации; метода стробирования отметок, обеспечивающего стабилизацию вероятности попадания в строб истинной отметки; методики выбора критериев обнаружения в МП РЛК с АОО. Результаты, полученные в диссертации, были использованы при обучении магистров в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по дисциплине «Радиолокационные комплексы» магистерской программы «Локация объектов и сред» по направлению «Радиотехника»; в отчетах по НИР «Разработка и исследование теоретических основ и методов траекторного сопровождения в асинхронных многопозиционных радиолокационных системах различных диапазонов волн» 2009–2011 гг. и ОКР «Разработка пассивного когерентного локационного комплекса для охраны важных объектов» 2014 г., что подтверждается актами о внедрении.

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», СПб, 13–14

ноября 2009 г.; конференция «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», СПб, 12–13 ноября 2010 г.; конференция «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», СПб, 24–25 ноября 2011; XVIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 17–19 апреля 2012 г.; конференция «Геополитические факторы устойчивого развития и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», СПб, 29 ноября 2012; конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с 2009 по 2012 гг.

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

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, списка сокращений, списка литературы. Общий объем диссертации 143 страницы, она содержит 54 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 47 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко проанализированы различные подходы к объединению данных в радиолокационных средствах; показаны преимущества МП РЛК перед однопозиционной и многопозиционной РЛС; обоснован выбор асинхронного объединения данных на уровне отметок для МП РЛК; показана необходимость разработки специального алгоритма ОТ для МП РЛК с АОО. Проведен анализ алгоритмов ОТ в системах с объединением данных.

Уточнено, что алгоритм должен обнаруживать траекторию цели, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью (модель СВ), линейно равноускоренно (СА) или поворачивающей с постоянной угловой скоростью (СТ). Характер движения цели неизвестен и не меняется на интервале ОТ. Проанализирована общая структура алгоритмов ОТ, сформулированы задачи, решаемые в ходе ОТ: пространственная селекция отметок при помощи стробирования; временная селекция в ходе накопления стробированных отметок; выделение траектории цели из набора накопленных отметок; оценка параметров траектории на основе выделенных отметок. Обоснована блочная стратегия построения алгоритма ОТ в МП РЛК; определены пути решения указанных задач ОТ при разработке алгоритма для МП РЛК с АОО. Определен вид критерия обнаружения траектории в МП РЛК с АОО, который заключается в требовании получения не менее M отметок в течение заданного временного интервала T_{init} .

Для демонстрации работы алгоритма используется тестовый МП РЛК; его состав, расположение и характеристики РЛС указаны в таблице 1. Начальные координаты тестовой воздушной цели $X = 35$ км, $Y = 25$ км, скорость 250 м/с,

курс 250° ; максимальная и минимальная скорости $v_{\max} = 500$ и $v_{\min} = 100$ м/с; максимальное линейное ускорение $a_{\max} = 30$ м/с², скорость поворота $5^\circ/\text{с}$.

Таблица 1

Характеристика	РЛС1	РЛС2	РЛС3	РЛС4
Диапазон	метр.	сантиметр.		дециметр.
Максимальная дальность, км	420	150		400
Период обзора, с	10	6		5
Погрешность измерения				
дальности, м	600	150		50
азимута, $^\circ$	1	0,5		1/6
Разрешающая способность				
по дальности, м	1000	250		120
по азимуту, $^\circ$	3	1,5		1
Вероятность обнаружения	0,9	0,7	0,8	0,8
Вероятность ложной тревоги	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Координаты X; Y, км	0; 0	10; 0	20; 0	0; 10

Во второй главе рассмотрены вопросы стробирования и накопления в ходе формирования набора отметок. Показано, что для традиционно применяемого кольцевого строга, размеры которого пропорциональны v_{\max} и v_{\min} , вероятность стробирования истинной отметки может принимать низкие значения и зависит от дальности цели, ее скорости и погрешностей измерения координат. Рассмотрены различные методы, в которых обеспечение заданной вероятности стробирования достигается при помощи учета погрешностей радиолокационных измерений; отмечены их недостатки.

Предложен новый метод стробирования, который учитывает погрешности радиолокационных измерений и маневр цели, обеспечивая вероятность стробирования истинной отметки не ниже заданной. В нем (рисунок 1):

1) Проверяется попадание новой отметки \mathbf{z}_2 в кольцевой строб с радиусами $R_{\max} = v_{\max}\tau + a_{\max}0,5\tau^2$, $R_{\min} = v_{\min}\tau$, выставленный вокруг начальной отметки \mathbf{z}_1 , где $\tau = t_2 - t_1$ – временной интервал между отметками; решение о стробировании принимается, если $R_{\min} \leq |\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1| \leq R_{\max}$.

2) При непопадании \mathbf{z}_2 в кольцо вычисляются координаты точки пересечения прямой, проходящей через \mathbf{z}_1 и \mathbf{z}_2 с внешним ($\mathbf{c}_m \equiv \mathbf{c}_{\max}$) или внутренним ($\mathbf{c}_m \equiv \mathbf{c}_{\min}$) кольцом, $\mathbf{c}_m = \mathbf{z}_1 + R' \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}$, $R' = R_{\max}$ при $|\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1| > R_{\max}$ и $R' = R_{\min}$ при $|\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1| < R_{\min}$; $\beta = \arctg((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1))$.

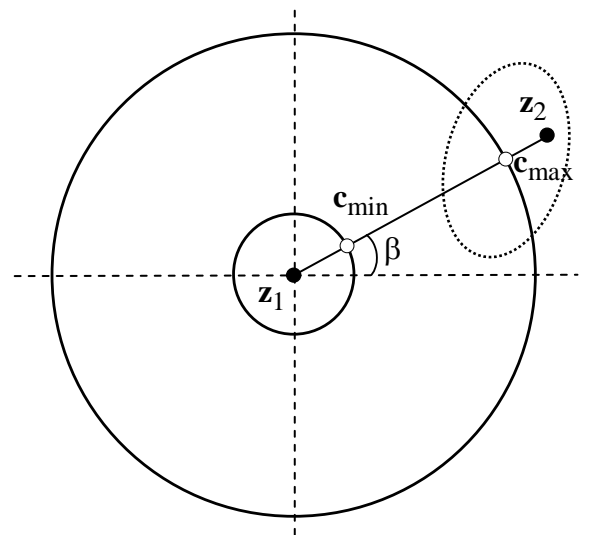


Рисунок 1

3) Вычисляется квадратичная форма $\rho_{12} = (\mathbf{c}_m - \mathbf{z}_2)^T (\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2)^{-1} (\mathbf{c}_m - \mathbf{z}_2)$, где \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 – ковариационные матрицы отметок \mathbf{z}_1 и \mathbf{z}_2 .

4) Ее значение сравнивается с порогом $\gamma = \chi_m^2(P_G)$, вычисленным для заданной вероятности P_G по критерию χ_m^2 ($m = 2$ – размер вектора \mathbf{z}); если оно меньше порога, принимается решение о попадании отметки в строб.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей вероятности стробирования второй отметки от скорости цели для дальности $R = 50$ км (рисунок 2,а) и от дальности для скорости $v = 200$ м/с (рисунок 2,б) при разных погрешностях радиолокационных измерений ($P_G = 0,9$). Цифрой 1 помечены вероятности для предложенного метода стробирования, цифрой 2 – для кольцевого строба. Их сравнение показывает, что предложенный метод обеспечивает более высокую и стабильную вероятность стробирования, которая независимо от дальности цели и ее скорости имеет значение не менее заданного.

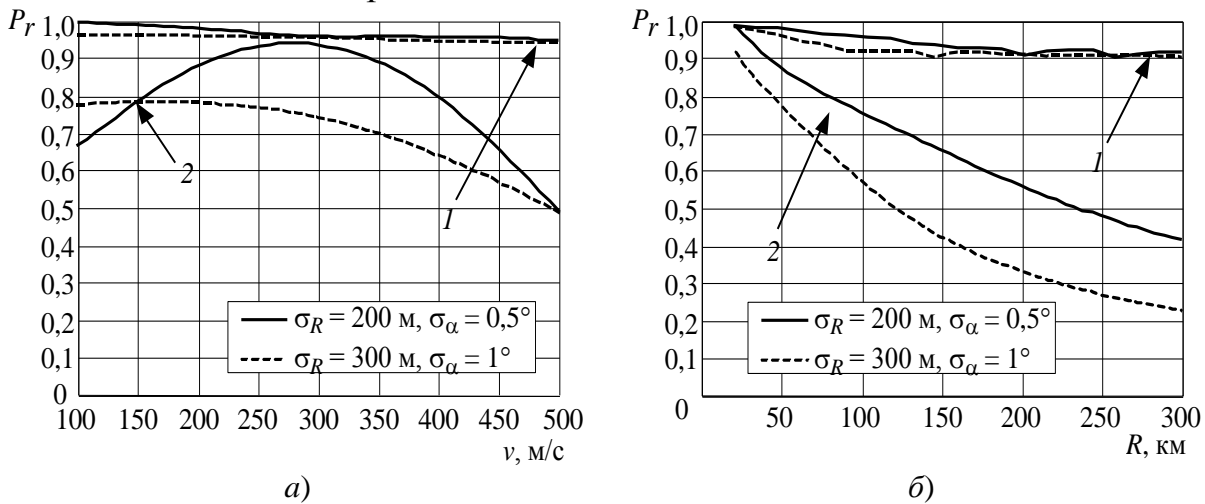


Рисунок 2

Предложенный вариант учета погрешностей измерений отличается от существующих тем, что он принимает во внимание изменение формы внутреннего круга, не предъявляет требований к ковариационным свойствам вектора измерений и учитывает возможность совершения целью маневра. Получено выражение для площади формируемого таким образом строба захвата.

Рассмотрен процесс образования суммарного потока истинных отметок от одной и той же цели, поступающих от РЛС комплекса, в предположении о том, что точно известны моменты возможного прихода отметок только от РЛС, обнаружившей начальную отметку. Определено общее число обзоров (моментов прихода отметок от данной цели) $K = \sum_j k_j$ на произвольном интервале наблюдения t , где k_j – число обзоров в j -й РЛС за время t ; причем $k_1 = \lfloor t/T_1 \rfloor$, $k_j = \lfloor t/T_j \rfloor$, $j = 2, \dots, N$, T_j – период обзора, N – количество РЛС. Найдены вероятности $p_j^{i_j}$, $j = 1, \dots, N$, $i_j = 1, \dots, k_j$ появления истинных отметок на каждом из этих обзоров: $p_1^{i_1} = p_1$; $p_j^{i_j} = p_j$, $i_j = 1, \dots, k_j - 1$; $p_j^{k_j} = p_j(t - T_j(k_j - 1))$ –

вероятность появления последней отметки от j -й РЛС в предположении о равномерном распределении положения ее антенны в момент времени t_1 ; $p_j = P_{Dj}P_G$, P_{Dj} – вероятность обнаружения цели в j -й РЛС, $j = 1, \dots, N$.

Найдены вероятности $P(n, K)$ появления ровно n истинных отметок на K обзорах, для чего использована схема Браннера, которая итеративно вычисляет нарастающие вероятности получения ровно n обнаружений на i -м, $i = 2, \dots, K$, обзорах:

$$P(0, i) = q_i^* P(0, i-1), \quad P(n, i) = q_i^* P(n, i-1) + p_i^* P(n-1, i-1),$$

$P(i, i) = p_i^* P(i-1, i-1)$, где p_i^* , $i = 1, \dots, K$ – одна из $p_j^{i_j}$; $q_i^* = 1 - p_i^*$. Среднее число истинных отметок за время t и его дисперсия равны соответственно

$\bar{n} = \sum_{i=1}^K p_i^*$ и $\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^K p_i^* q_i^*$. Вероятность получения не менее M истинных отме-

ток за время t равна $P_M(t) = \sum_{i=M}^K P(i, K)$. Распределение вероятностей числа

отметок для $t = 20$ с приведено на рисунке 3.

Рассмотрены характеристики потока групп ложных отметок (ЛО), получаемых от РЛС на каждом обзоре. Введено понятие эффективного числа ЛО, которое учитывает, что к траектории присоединяется только одна отметка из группы. Получены выражения для вероятностей появления ровно n и не менее M эффективных ЛО, общего и эффективного числа ЛО за время t . Аналогичный анализ потоков истинных и ложных отметок проведен для ситуаций, когда моменты обзоров известны или неизвестны во всех РЛС.

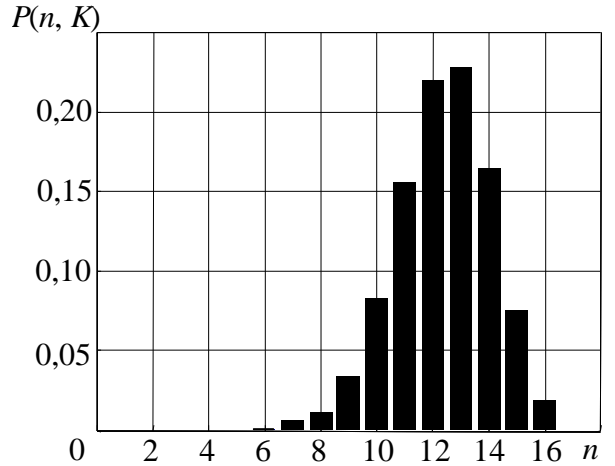


Рисунок 3

В третьей главе произведена разработка алгоритма выделения траектории из набора отметок, имеющих после накопления. Предложен новый принцип выделения, основанный на анализе оценок константных параметров (ОКП) движения цели. Такими параметрами являются: для модели CV – компоненты вектора скорости; для модели СА – компоненты вектора ускорения; для модели СТ – угловая скорость поворота. Алгоритм выделения на основе ОКП выполняется параллельно для трех каналов (CV, СА и СТ), реализуя многоканальность по типу маневра. В каждом из каналов осуществляются следующие действия:

- 1) Вычисление оценок соответствующего константного параметра и их ковариаций (дисперсий) для всех отметок из накопленного набора.
- 2) Кластеризация оценок в пространстве константных параметров с целью выделения оценок, с заданной степенью вероятности принадлежащих траектории объекта, движущегося согласно модели данного канала.
- 3) Принятие решения об обнаружении

(не обнаружении) траектории в результате сравнения числа кластеризованных оценок с пороговым значением.

Для вычисления оценок скорости предложен способ формирования пар отметок, при котором скорость вычисляется для сочетаний одной (опорной) отметки со всеми остальными. В качестве опорной принимается начальная отметка траектории, она же – центр строга захвата (принцип «первая с каждой») (рисунок 4). Пары, где обе отметки принадлежат цели, имеют в своей основе одинаковый вектор скорости, тогда как пары, включающие в себя одну или две ложные отметки, соответствуют разным «векторам скорости». Оценки скорости, полученные из пары истинных отметок, будут распределены определенным образом в пространстве скоростей вокруг неизвестного истинного значения вектора скорости, а ложные – случайным образом по всему пространству, что и дает возможность их разделения.

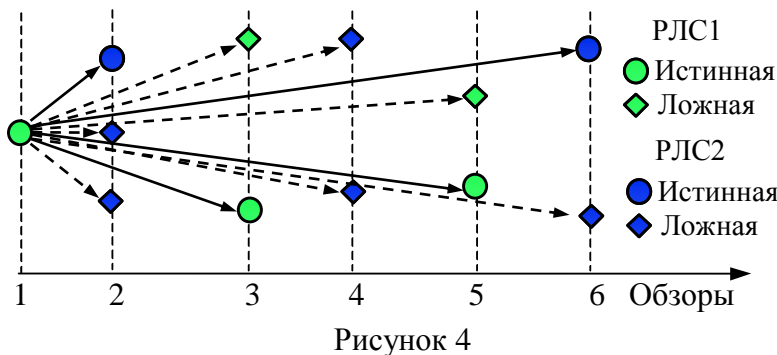


Рисунок 4

Оценки скорости вычисляются на основе первой отметки $\mathbf{z}_1, \mathbf{R}_1$ для каждой из накопленных за время обнаружения T_{init} отметок $\mathbf{z}_i, \mathbf{R}_i, i = 2, \dots, m$, соответствующих положению цели в моменты времени t_i (положим $t_1 = 0$)

следующим образом: $\hat{\mathbf{v}}_i = (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_1)/t_i, \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{v}}_i} = (\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_1)/t_i^2$.

Достоинство предложенного способа формирования оценок заключается в том, что он в рамках одной гипотезы способен выделить все отметки, которые вместе с начальной составляют траекторию истинной цели. Т. е. обладает свойством селекции ложных отметок без формирования множества гипотез отождествления. Кроме того, он нечувствителен к пропускам отметок.

При вычислении оценок ускорения используются две оценки скорости. Принцип «первая с каждой» способен выделить истинные оценки, но обладает низкой фильтрующей способностью ложных оценок, поскольку оценка скорости, построенная по второй отметке, часто характеризуется низкой точностью

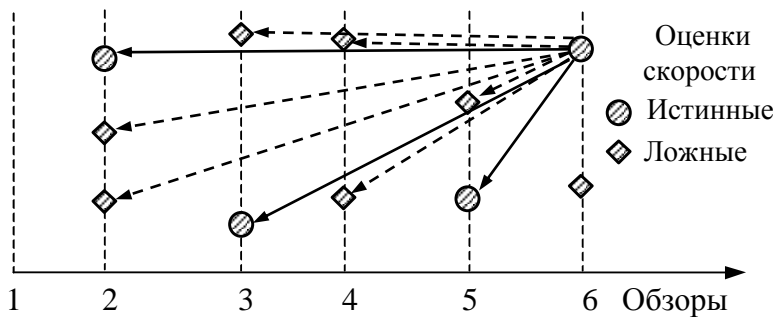


Рисунок 5

(большой ковариацией) вследствие малого промежутка времени между первой и второй отметками. Для вычисления оценок ускорения предложен принцип «последняя с каждой», при котором в качестве опорной используется оценка скорости, принадлежащая последнему обзору, как наиболее точная (рисунок 5). На этом обзоре может быть несколько отметок, столько же будет и процессов ОТ в канале СА,

как наиболее точная (рисунок 5). На этом обзоре может быть несколько отметок, столько же будет и процессов ОТ в канале СА,

при этом алгоритм должен обладать способностью выделять тот процесс, который использует истинную опорную оценку скорости. Если по оценкам с последнего обзора ОТ не зафиксировано, берутся оценки с предпоследнего и так далее вплоть до того момента, когда уже невозможно выделить M отметок, заданных в критерии ОТ.

Можно показать, что вычисленная по данному принципу оценка ускорения, использующая полученные ранее оценки скорости, обладает свойством $\mathbf{a}_i = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_i)/(t_m - t_i) = \mathbf{a}/2$, где \mathbf{a} – истинный вектор ускорения. Тогда $\hat{\mathbf{a}}_i = 2(\hat{\mathbf{v}}_m - \hat{\mathbf{v}}_i)/(t_m - t_i)$, $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{a}}_i} = 4(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{v}}_m} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{v}}_i})/(t_m - t_i)^2$.

Оценки угловой скорости $\hat{\omega}_i$ формируются с использованием оценок скорости по принципу «последняя с каждой» как производная курса цели ϕ : $\hat{\omega}_i = \hat{\phi}_i = (\phi_m - \phi_i)/(t_m - t_i)$, $\phi_k = \arctg(v_{x,k}/v_{y,k})$, следующим образом:

1) Оценка курса на i -м шаге находится преобразованием оценки скорости из прямоугольных координат в полярные с получением вектора

$$\hat{\mathbf{u}}_i = \begin{bmatrix} \hat{v}_i \\ \hat{\phi}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\hat{v}_{x,i}^2 + \hat{v}_{y,i}^2} \\ \arctg(\hat{v}_{x,i}/\hat{v}_{y,i}) \end{bmatrix}. \text{ Это нелинейное преобразование гауссовского}$$

случайного вектора \mathbf{v}_i ; для нахождения среднего $\hat{\mathbf{u}}_i$ и его ковариации $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{u}}_i}$ использовано ансцентное преобразование.

2) На основе оценок вектора \mathbf{u} и их ковариаций $\mathbf{P}_{\mathbf{u}}$ находятся оценки вектора \mathbf{b} и его ковариация $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{b}}_i}$ по принципу «последняя с каждой»:

$$\hat{\mathbf{b}}_i = [\hat{a}_i \ \hat{\omega}_i]^T = 2(\hat{\mathbf{u}}_m - \hat{\mathbf{u}}_i)/(t_m - t_i), \quad \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{b}}_i} = 4(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{u}}_m} + \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{u}}_i})/(t_m - t_i)^2 \quad (\text{коэффициенты 2 и 4 имеют тот же смысл, что и для оценок ускорения}).$$

3) Угловая скорость ω – второй компонент вектора \mathbf{b} (первый – модуль ускорения – не является константным параметром). Учитывая маргинальные свойства многомерного нормального распределения, получаем $\hat{\omega}_i = \hat{\mathbf{b}}_i(2)$, $\sigma_{\hat{\omega}_i}^2 = \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{b}}_i}(2, 2)$.

В ходе кластеризации для каждой i -й оценки константного параметра вычисляется мера точности – определитель ее ковариации $D_i = \det(\mathbf{P}_i)$. Оценки сортируются в порядке возрастания D_i . Первая (самая точная) образует первый кластер. Вторая проверяется на принадлежность первому кластеру, и либо присоединяется к нему, либо становится началом нового кластера; процедура повторяется для всех остальных оценок. В ходе проверки принадлежности i -й оценки j -му кластеру проверяется ее попадание в корреляционные стробы, выставленные вокруг каждой оценки, уже присвоенной этому кластеру, при помощи стандартной процедуры стробирования (размер строба пропорционален сумме ковариаций проверяемых оценок и заданной вероятности стробирования P_{GC}). Оценка присваивается кластеру, если она попала в стробы всех его оценок. Если оценка может быть присвоена нескольким кластерам, выбирается тот, в котором

на данный момент больше оценок. Если таких кластеров несколько или если на одном обзоре к кластеру присваивается несколько оценок от одной РЛС, используется точное отождествление по методу ближайшего соседа. Кластеризация оценок скорости и ускорения проводится в двумерном пространстве, угловой скорости – в одномерном.

Пороговое число отметок в кластере M , как и время накопления отметок T_{init} , определяются на основе критерия Неймана-Пирсона с использованием значений вероятностей обнаружения истинной P_T и ложной F_T траекторий.

Вероятность обнаружения истинной траектории рассчитывается следующим образом. Вероятность появления на входе алгоритма выделения истинной отметки на i -м обзоре в j -й РЛС p_j^{ij} найдены в гл. 2 ($t = T_{init}$).

Вероятность того, что i -я оценка скорости от j -й РЛС окажется в кластере, равна $p_{jc}^{ij} = p_j^{ij} P_{Gc}$. Далее аналогично гл. 2 формируются вероятности p_{ic}^* ; по схеме Браннера рассчитываются вероятности $P_c(n, K)$ попадания в строб ровно n

оценок скорости; вероятность ОТ $P_T = \sum_{i=M-1}^K P_c(i, K)$ (в стробе может оказаться

максимум $K + 1$ отметка, что дает K оценок скорости; M отметкам соответствует $M - 1$ оценка скорости, поэтому порог должен быть уменьшен на 1).

Вероятность обнаружения ложной траектории находится следующим образом. Полагая, что пространственное распределение ЛО подчиняется закону Пуассона, вероятности появления хотя бы одной ЛО в кластере для i -го обзора

в j -й РЛС равны $f_{jc}^{ij} = 1 - e^{-F_j S_j^{ij}}$, где $S_j^{ij} = S_j^{ij} / (\delta R \cdot R \delta \alpha)$ – размер эллиптического строба, выраженный в числе элементов разрешения этой РЛС ($S_j^{ij} = \pi \sqrt{\gamma_c |\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_j|}$ – абсолютный размер строба, $\gamma_c = \chi_2^2(P_{Gc})$, R – дальность цели; δR и $\delta \alpha$ – разрешающие способности РЛС по дальности и по азимуту).

Среднее число ЛО в стробе $\bar{n}_{fc,j}^{ij} = F_j S_j^{ij}$, общее число ожидаемых ЛО в кластере

$\bar{n}_{fc} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{k_j} F_j S_j^{ij}$. Эффективное число ЛО $\bar{n}_{fc}^{eff} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{k_j} \min(F_j S_j^{ij}, 1)$. Вероятности $F_{Tc}(n, K)$ находятся по схеме Браннера. Вероятность обнаружения ложной

траектории $F_T = \sum_{i=M-1}^K F_{Tc}(i, K)$. Графики $P_T(T_{init})$ и $F_T(T_{init})$ для разных M

приведены на рисунке 6. Скачок в моменты $6n$ ($n = 1, 2, \dots, k_1$) объясняется возможным получением отметки от РЛС1 – единственной, для которой точно известны моменты обзоров. Получены выражения для оценки среднего времени от появления цели в зоне наблюдения до обнаружения ее траектории и среднего числа обнаружений ложных траекторий в единицу времени.

Критерий обнаружения траектории формируется следующим образом: для заданной пары P_T , F_T по графикам находятся обеспечивающие их пары M , T_{init} , из которых выбирается та, у которой T_{init} минимальна. Например, для $P_T \geq 0,95$ и $F_T \leq 10^{-9}$ в МП РЛК получается критерий 5/16,8с, для $F_T \leq 10^{-12}$ 6/18,2с.

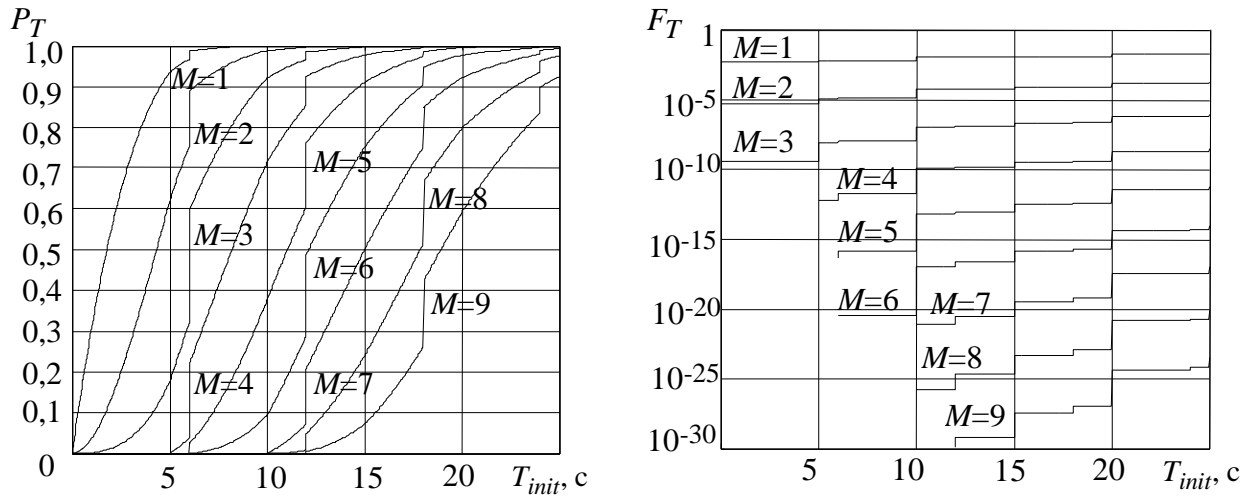


Рисунок 6

Примеры работы алгоритма выделения в разных каналах при истинности соответствующей модели показаны на рисунках 7–11. Точки – истинные оценки, звездочки – ложные, эллипсы построены для вероятности 0,95. Слева – исходные оценки в пространстве КП, справа – результат кластеризации.

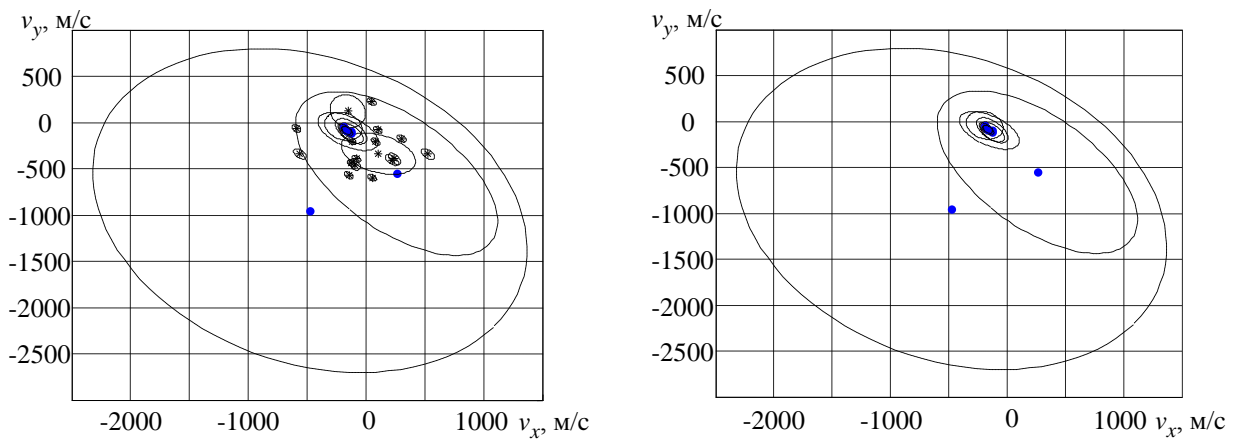


Рисунок 7 – Модель CV, канал CV

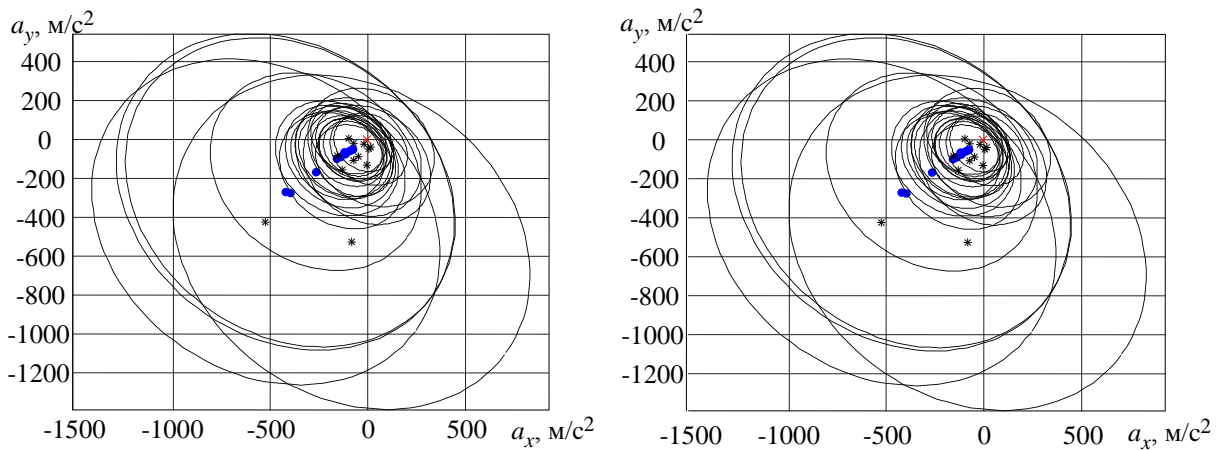


Рисунок 8 – Модель СА, канал СА, принцип «первая с каждой»

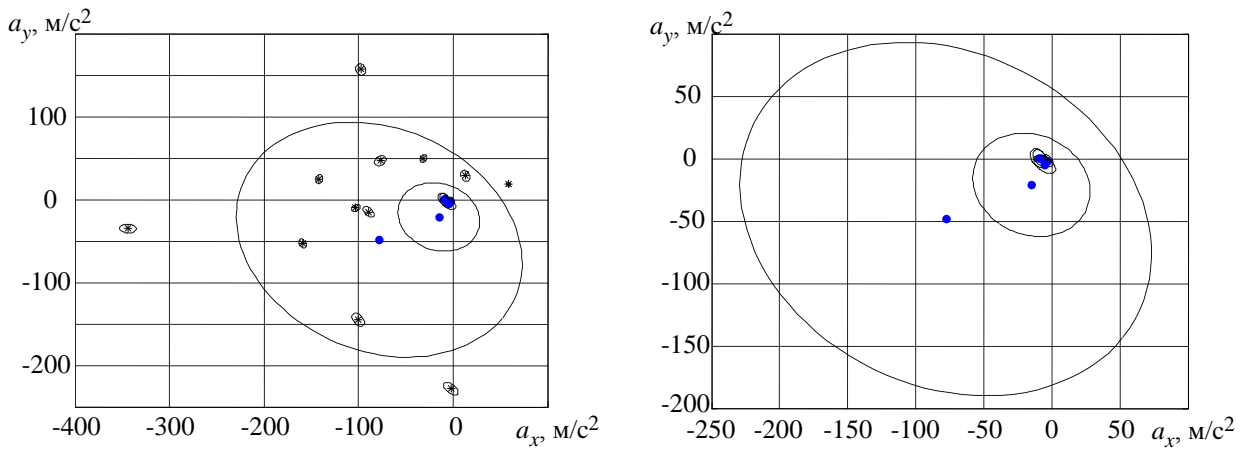


Рисунок 9 – Модель СА, канал СА, принцип «последняя с каждой», истинная опорная

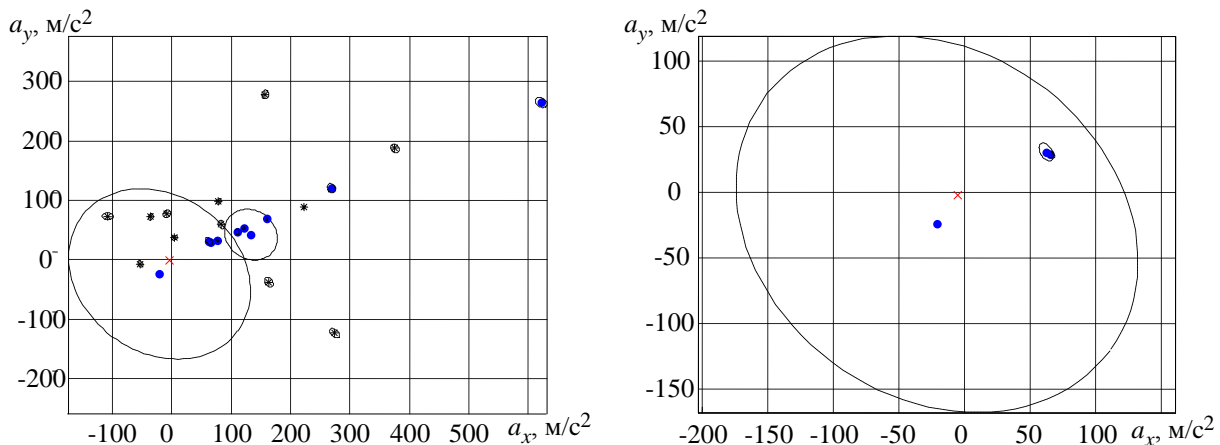


Рисунок 10 – Модель СА, канал СА, принцип «последняя с каждой», ложная опорная

Для модели СВ (рисунок 7) зафиксировано ОТ. На рисунках 8, 9 и 10 для одного набора исходных отметок показаны результаты формирования оценок ускорения по принципам «первая с каждой» (селекция ЛО отсутствует) и «последняя с каждой» по истинной (ОТ состоялось) и ложной (ОТ не состоялось) опорным оценкам скорости. В канале СТ (рисунок 11) зафиксировано ОТ.

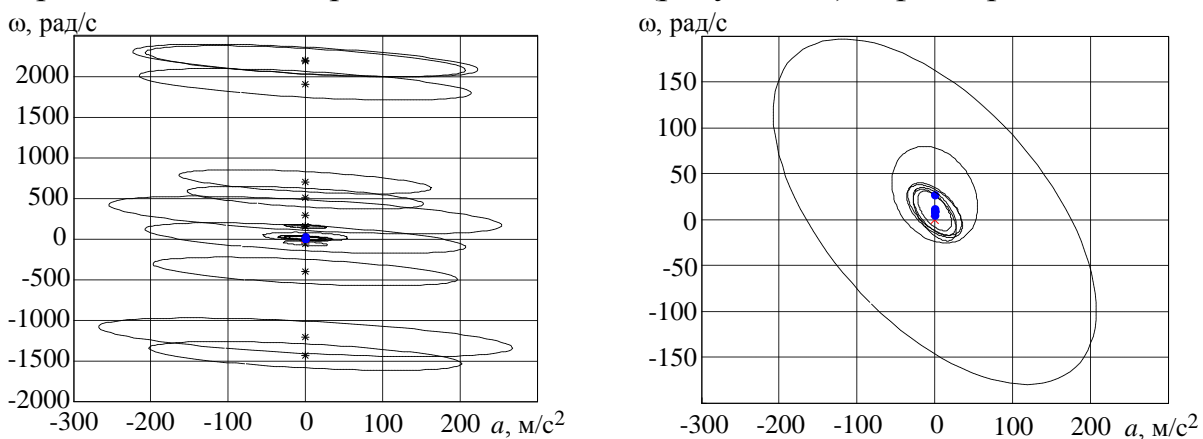


Рисунок 11 – Модель СТ, канал СТ

Проведено сравнение среднего числа ЛО, присваиваемых истинной траектории в процессе ее обнаружения алгоритмами ОКП и ППХ. За счет того, что ОКП при кластеризации использует время съема и ковариацию каждой отметки, он обеспечивает существенно меньшее число ЛО, причем выигрыш может достигать десятков раз (в данном примере 130: 0,017 против 1,702).

При помощи статистического компьютерного моделирования (1000 итераций) получены оценки параметров алгоритма ОКП для примера МП РЛК при критерии 6/18,2с (в модели СТ $F_j = 10^{-4}$, в остальных $F_j = 10^{-3}$) (таблица 2).

Таблица 2

Параметр	Модель и канал		
	CV	CA	CT
Истинное значение КП	150 м/с	20 м/с ²	-4 °/с
Вероятность обнаружения траектории	0,991	0,929	0,931
Истинных отметок в стробе	9,39	9,94	10,30
Истинных отметок в траектории	9,23	9,82	10,20
ЛО в стробе захвата	17,90	13,06	1,36
ЛО в кластере	0,127	0,183	0,19
Оценка КП	151,6 м/с	21,13	-2,76 °/с
Число процессов ОТ	1	3,82	1,19
Число обзоров до принятия решения	1	2,37	1,0091
Вероятность ОТ в ложных процессах	-	0,073	0,048

Алгоритм ОКП обладает высокими характеристиками при обнаружении цели в канале CV, поэтому его можно рекомендовать в качестве альтернативы современным алгоритмам ОТ, которые обычно обнаруживают именно такие цели. На результат выделения в каналах CA и CT оказывает влияние 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 снижения влияния этого фактора.

В четвертой главе произведена разработка методики оценки параметров траектории в условиях неопределенности характера движения цели. Исследованы классификационные свойства алгоритма выделения. Показано (в том числе на примерах его работы), что при малых погрешностях радиолокационных измерений при истинности модели CV происходит обнаружение во всех трех каналах, при истинности CA – в каналах CA и CT, при истинности CT – только в CT; при реальных значениях погрешностей в данном МП РЛК для любой модели обнаружение может состояться в каждом канале, поэтому в общем случае на уверенное их разделение рассчитывать нельзя.

Разработана методика оценки параметров траектории при отсутствии надежного разделения каналов. Опираясь на результаты, полученные в теории фильтрации параметров траекторий маневрирующих целей, принято решение использовать статический многомодельный алгоритм (СММ) с набором из трех моделей: CV – фильтр Калмана, CA – его модификация для движения с ускорением в виде белого шума, CT – модификация для движения с известной угловой скоростью (она вычисляется на этапе выделения). СММ (рисунок 9) является оптимальным в случае, когда неизвестный характер движения принадлежит одному из конечного множества моделей и не меняется на интервале оценивания, что соответствует условиям задачи.

Особенностью реализации СММ-фильтра в алгоритме ОТ является работа каждого канала со своим собственным выделенным набором отметок, поэтому

правдоподобия и вероятности фильтров вычисляются только для последнего обзора. Формирование набора моделей осуществляется по результатам выделения: в фильтре задействованы только те модели, для которых состоялось ОТ.

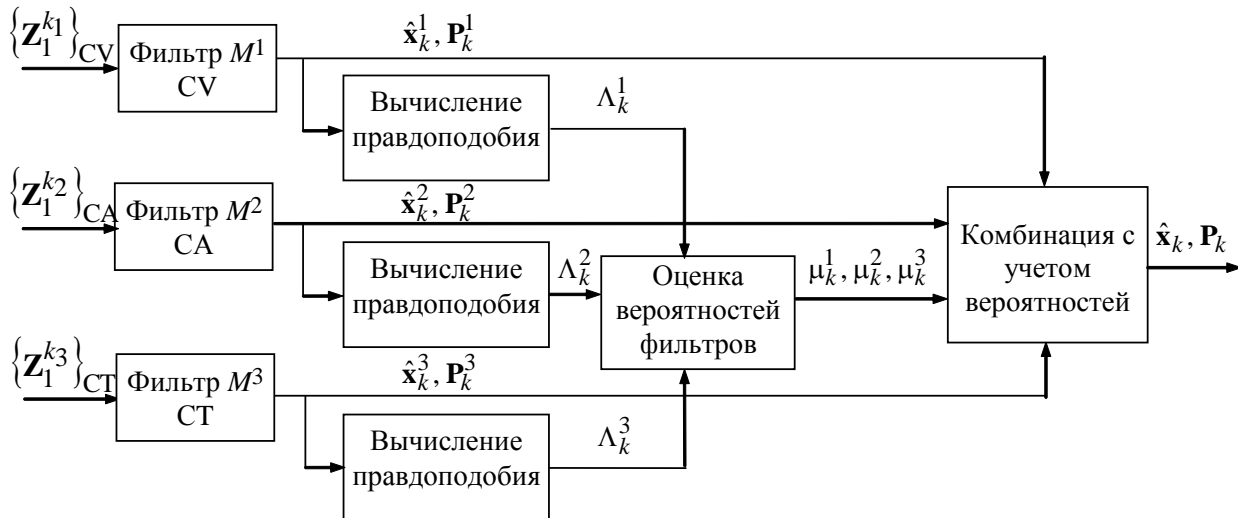


Рисунок 9

Проведено исследование качества оценивания параметров траектории алгоритмом ОТ на основе ОКП для рассматриваемого примера МП РЛК с АОО (1000 итераций). Результаты моделирования – в таблицах 4–6.

Таблица 4 – Обнаружение для модели CV

Характеристика	Канал		
	CV	CA	CT
Вероятности ОТ в каналах	0,999	0,999	0,998
Правдоподобия каналов	0,327	0,356	0,317
Оценки КП в каналах	200,9 м/с	6,41 м/с ²	0,21 °/с
Ошибка оценки положения цели в каналах, м	82,40	114,70	119,62
Общая ошибка оценки положения цели, м	100,52		
Погрешность измерения, м	169,75		

Таблица 5 – Обнаружение для модели CA

Характеристика	Канал		
	CV	CA	CT
Вероятности ОТ в каналах	0,996	0,995	0,998
Правдоподобия каналов	0,268	0,464	0,268
Оценки КП в каналах	266,5 м/с	8,75 м/с ²	0,43 °/с
Ошибка оценки положения цели в каналах, м	157,74	165,14	238,57
Общая ошибка оценки положения цели, м	162,12		
Погрешность измерения, м	270,18		

Таблица 6 – Обнаружение для модели CT

Характеристика	Канал		
	CV	CA	CT
Вероятности ОТ в каналах	0,977	0,996	0,996
Правдоподобия каналов	0,126	0,458	0,416
Оценки КП в каналах	189,3 м/с	17,8 м/с ²	-4,75 °/с
Ошибка оценки положения цели в каналах, м	529,52	144,86	136,11
Общая ошибка оценки положения цели, м	134,27		
Погрешность измерения, м	244,85		

Несмотря на то, что обнаружение траектории может происходить в нескольких каналах, и что итоговое правдоподобие не всегда однозначно указывает на истинную модель (хотя и точнее, чем результат выделения), итоговая оценка положения цели оказывается точнее, чем исходная, а значит алгоритм фильтрации справляется со своей задачей и при отсутствии разделения моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы:

1. Разработан новый принцип выделения траектории, основанный на анализе оценок параметров, постоянных для того или иного вида движения цели. Его достоинствами являются: возможность обнаружения траектории как не маневрирующей цели, так и совершающей маневр; фильтрация ложных отметок в рамках единственной гипотезы отождествления; нечувствительность к пропускам истинных отметок; уменьшение размера области, в которой ожидается появление отметки по сравнению с ПХ; в многопозиционном варианте – индивидуальный учет погрешностей измерения для каждой отметки. Этот принцип может быть использован для ОТ в любом радиотехническом средстве.

2. Для алгоритма ОТ на основе ОКП разработаны методики формирования оценок скорости, ускорения и угловой скорости (при расчете среднего и дисперсии последней использовано ансцентное преобразование) и методика кластеризации оценок в пространстве константных параметров; получены аналитические выражения для статистических характеристик алгоритма.

3. На основе предложенного принципа выделения разработан алгоритм, осуществляющий обнаружение траектории маневрирующей и не маневрирующей цели в условиях асинхронного поступления неравноточных измерений координат, производимых разными РЛС комплекса.

4. Предложен метод стробирования отметок на этапе обнаружения траектории, в котором за счет учета погрешностей радиолокационных измерений и возможного маневра цели обеспечивается вероятность стробирования истинной отметки не хуже заданной.

5. Разработана методика формирования критерия обнаружения для алгоритма ОТ в МП РЛК с АОО, в которой выбором времени накопления отметок и порогового числа отметок в кластере обеспечиваются вероятности обнаружения истинной и ложной траектории не хуже заданных значений.

6. Разработана методика оценки параметров траектории цели в условиях неопределенности модели движения цели и отсутствия разделения каналов ОТ на этапе выделения траектории, использующая принцип многомодельной фильтрации.

В качестве наиболее перспективных направлений дальнейших исследований можно рекомендовать обнаружение траекторий нескольких целей; обнаружение траектории цели, начинающей или заканчивающей маневр в процессе ОТ; учет измерений радиальной скорости цели.

Общий вывод: проведенное исследование показало, что предложенный принцип обнаружения траектории на основе анализа константных параметров движения обладает высокими характеристиками (высокой вероятностью обна-

ружения, 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 ПХ. Построенный на его основе алгоритм ОТ в МП РЛК с АОО способен успешно обнаруживать и оценивать параметры траектории цели, совершающей маневр на интервале ОТ.

Список основных публикаций по теме диссертации

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:

4. Коновалов, А. А. Формирование строга 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.

5. Коновалов, А. А. Выбор критерия завязки траектории цели в многопозиционном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок / А. А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Научно-практические и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», 12–13 ноября 2010 г., Санкт-Петербург. – С. 100–104.

6. Коновалов, А. А. Алгоритм завязки траектории при многопозиционном сопровождении радиолокационной цели / А. А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Научно-практические и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2011. – С. 83–88.

7. Коновалов, А. А. Расчет размера и формы строга 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.

8. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 1 / А. А. Коновалов. – СПб.: – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – 164 с.