

УДК 621.396.96 : 681.3.01

В. А. Иванов

*(Новосибирск).***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ
И ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРИЙ**

Обсуждаются и выявляются практические особенности алгоритмов и программной реализации обработки траекторий по отметкам обзоров, получаемых, например, системой обработки временной последовательности изображений. Основное внимание уделено оцениванию параметров траекторий, формированию стробов и отбору отметок в них, рассмотрены вопросы реализации алгоритмов.

Задачи обнаружения и сопровождения объектов являются традиционными и длительное время разрабатываются в системах цифровой обработки радиолокационной [1—4] и гидролокационной [5] информации. Также известна задача обнаружения и сопровождения объектов по отметкам, получаемым из обработки временной последовательности изображений [6].

Алгоритмическое обеспечение систем наблюдения и/или автоматического сопровождения по своему содержанию состоит в обнаружении объекта с оцениванием координат. Получаемые в процессе слежения координаты могут быть использованы для определения траектории объекта, предсказания его движения и распознавания. Приложения рассматриваемой задачи многочисленны [1, 5, 7].

Постановка задачи. Одним из элементов обнаружения и последующего сопровождения объектов является обработка траекторий. Задачу обработки траекторий решают в различных постановках, которые, как правило, определяются исходными данными и методом решения. Так, например, в условиях практически «полной определенности» (т. е. известно число траекторий, задана модель описания движения и в обзорах присутствуют все отметки, принадлежащие только траекториям) в [8, 9] рассмотрены решения на основе методов последовательного перебора, которые используют аддитивные функционалы и элементы динамического программирования. Несколько иначе формулируются задачи выделения траекторий в физическом эксперименте [10—12]. Когда в обзорах присутствуют в основном только ложные отметки и обработка ведется в реальном времени, упомянутые выше подходы применить практически невозможно. Поэтому для реальных задач более приемлемым является подход из [1], который использует эвристические идеи с возможно полным их математическим обоснованием. Эвристические элементы алгоритмов в принципе дают возможность учесть практически любую априорную информацию, тем самым увеличивая вероятность обнаружения траектории и уменьшая вероятность ложной тревоги, хотя теоретический анализ необходимых вероятностей таких алгоритмов не всегда возможен или точен.

В работе обсуждаются и выявляются практические особенности алгоритмов и программной реализации обработки траекторий по отметкам обзоров, которые могут быть получены, например, системой обработки временной последовательности изображений [6], а также от обнаружителей отметок радиолокационных (РЛС) или гидролокационных (ГЛС) систем.

Алгоритмы, используемые для решения задач траекторий (радиолокационное обнаружение и сопровождение целей [1—4], выделение треков в физи-

ческих экспериментах [10—12]), условно содержат два этапа: завязки траектории и ее сопровождения. Первый этап обработки заключается в формировании групп отметок, которые передаются на сопровождение или сбрасываются. Сбросом траектории назовем ситуацию, при которой для некоторого выделенного множества точек m предположение о принадлежности этого множества к траектории не подтверждается. Если для заданного m сброса траектории не происходит, то выделенная группа отметок передается на сопровождение траектории. Второй этап обработки сопровождает завязанные траектории с проверкой (подтверждением) их истинности, с последующей передачей выделенных траекторий на распознавание.

Оценивание параметров траекторий. Задачи обнаружения и сопровождения, в том числе и алгоритмы селекции траекторий, содержат этап оценивания параметров траекторий объектов, что необходимо, прежде всего, для формирования стробов сопровождения, а также для целей распознавания, наведения, принятия решений.

Одним из важных вопросов в задаче обработки траекторий является экстраполяция параметров (прогноз координат) траекторий, необходимая для формирования стробов, в которых производится селекция поступающих отметок с целью завязки или продолжения траектории. Анализ литературы и моделирование показали, что траектории (в том числе и баллистические) могут быть описаны полиномом или линейным дифференциальным уравнением только на некотором интервале наблюдения. Исключение составляют, видимо, только стационарные орбиты.

Принято считать, что координаты X , Y , Z и яркости отметок траекторий независимы, т. е. можно рассматривать одномерный случай. С дифференциальными моделями связаны (α, β) - и (α, β, γ) -фильтры, фильтр Калмана, настраиваемые модели, используемые для оценивания как параметров, так и состояния. Регрессионные модели (в частности, полиномиальная регрессия) для оценивания используют МНК, ММП, рекуррентный МНК и другие методы.

Выбор метода оценивания определяется решаемой задачей, типом цели, спектральным диапазоном, приемником. Калмановские фильтры обычно используют в случаях объектов, описываемых известными (чаще всего, линейными) дифференциальными уравнениями (ДУ). К таким объектам относятся орбитальные и объекты с баллистическими траекториями [2]. В [3] отмечалось, что при соответствующем выборе описания и интервала наблюдения фильтр Калмана может удовлетворительно работать с маневрирующими самолетами.

В [3, 4] указывается на широкое применение (α, β) - и (α, β, γ) -фильтров в связи с простой реализацией и возможностью адаптации в различных ситуациях путем уменьшения интервала дискретизации и изменения постоянных времени. Методы оценивания параметров по МНК и экстраполяции положения объектов, использующие регрессионные модели (полиномиальный фильтр), дают хорошие результаты во многих случаях, особенно если подстраивать порядок полинома и размер окна в зависимости от изменения динамического состояния объекта. Для полиномиальной модели затраты на вычисления могут быть больше, чем при реализации (α, β) - и (α, β, γ) -фильтров и фильтра Калмана, но при меньшем объеме памяти. Если в полиномиальной модели перейти к марковским оценкам и рекуррентному МНК, то в линейном случае оценки для дискретного времени будут эквивалентны фильтру Калмана [13, 14].

Были проведены анализ и сравнение некоторых упомянутых выше методов по точности прогноза координат траекторий баллистических объектов с активными участками. Сравнивались фильтр Калмана, настраиваемая модель [14, 15], полиномиальная регрессия и авторегрессия [17]. Предварительно были оптимизированы параметры методов экстраполяции по дисперсии отклонений прогноза от истинных значений. Так, для полиномиальной модели получены следующие значения параметров: число измерений $K = 7 - 9$, степень полинома $N = 2$. Так как был реализован статический фильтр Калмана

третьего порядка, то подобрались его параметры. Аналогично оптимизированы параметры настраиваемой модели второго порядка.

Сравнение методов предсказания проводилось на наборе траекторий с использованием критериев

$$J = \sum_{i=1}^M (X_i - X_{ip})^2, \quad DX = \max_{i=1, M} \{ |X_i - X_{ip}| \},$$

где X_i, X_{ip} — истинное и прогнозируемое значения координаты; M — число прогнозируемых точек. Настраиваемая модель и авторегрессионная модель ($K = 7 - 9$) дали худшие результаты. У настраиваемой модели был недостаточен порядок ДУ и один настраиваемый параметр, а авторегрессионная модель плохо описывала моделируемые траектории. Анализ результатов сравнения показал, что полиномиальная модель и фильтр Калмана близки по точности предсказания. В случае полиномиальной регрессии моделирование показало, что для «неблагоприятных» траекторий дисперсия экстраполяции $J/(M - 1)$ меньше одного дискрета, а величина DX не превышает трех дискрет при размере обзора 512×512 точек.

Вычислительные затраты могут увеличиться при неравномерном по времени поступлении обзоров, например, при сбое происходит пропадание обзора отметок. Для систем с «качающейся» механической разверткой зависимость времени получения отметки от координаты становится неизбежной, что приходится учитывать при оценивании положения объекта. В таких системах моменты времени между обзорами можно считать равноотстоящими, если время сканирования много меньше времени паузы T_p между кадрами (обзорами). При экстраполяции центра очередного строба обрабатываемой траектории для системы с «качающейся» разверткой времени получения отметки T_o вычисляются следующим образом:

$$T_o = T + X/v \text{ — прямой ход,}$$

$$T_o = T + (L - X)/v \text{ — обратный ход,}$$

где L — размер кадра; X — координата отметки; T — момент времени начала сканирования кадра; $v = L/T_k$ — скорость движения сканирующей линейки по кадру вдоль координаты X (T_k — время сканирования кадра). При этом считается, что T_p между прямым и обратным ходом линейки, а также возможные пропуски кадров учтены в T . Очевидно, что коррекция T важна для траекторий, удаленных от середины кадра.

В связи с вышеизложенным во многих случаях для экстраполяции координат объектов можно рекомендовать полиномиальный фильтр с переменной степенью, ограниченным окном, работающий с неравноотстоящими отсчетами. Размер строба выбирается из условий, заданных вероятностями пропуска и ложной селекции отметок [1].

Особенности алгоритмов обработки. Во введении указывалось, что алгоритм обработки траекторий условно содержит два этапа: завязки траектории и сопровождения траектории с ее подтверждением. Исходными (входными) данными для алгоритма обработки будут обзоры отметок O_i в i моменты времени, которые представляют массив из N_i отметок, описываемых тремя числами: X_{ij}, Y_{ij}, D_{ij} — координаты и яркость j -й отметки i -го обзора ($j = 1, N_i$). Величины $N_{i\max}$ и число хранимых обзоров N_o определяются объемом оперативной памяти, а главное, содержанием задачи.

Все отметки первого обзора O_1 объявляются начальными отметками траекторий. В последующих обзорах начальными объявляются отметки, не присоединенные к имеющимся траекториям. Около начальных отметок формируются стробы завязки (область или зона предполагаемого нахождения отметки, принадлежащей начальной точке или траектории), размер которых определяется максимально допустимой скоростью движения объекта V_{\max} на начальном участке траектории. При поступлении на вход системы второго и

последующего обзоров производится отбор отметок в стробах завязки и сопровождение траекторий.

При завязке траектории j в первоначальный строб i -го обзора может попасть несколько отметок, поэтому возможны два варианта: 1) каждая точка $i + 1$ -го обзора, попавшая в строб захвата, порождает траекторию с начальной точкой в центре строба S_{ij} (начальный строб j -й точки i -го обзора), т. е. одна начальная точка может порождать несколько траекторий; 2) одна из точек $i + 1$ -го обзора продолжает траекторию j -й точки i -го обзора, а оставшиеся точки $i + 1$ -го обзора становятся начальными для точек последующих обзоров. Точка $i + 1$ -го обзора для присоединения к точке j выбирается согласно принятому критерию (минимальное расстояние, максимальная яркость, минимум взвешенной суммы отклонений), который должен минимизировать соответствующие вероятности ошибок (пропуск, ложные тревоги).

Если скорости объектов в начале траектории невелики и могут быть приняты за стационарные, то положение первых стробов и их размер меняются слабо. Для таких объектов, с одной стороны, предпочтительнее вариант 1, что связано с более короткими сбрасываемыми ложными траекториями и с несколько меньшей вероятностью ложной тревоги и размножения траекторий. С другой стороны, выбор варианта завязки траектории необходимо связать с конкретным содержанием задачи. Так, например, в физических экспериментах при размножении частицы необходимо отслеживать все появившиеся треки [10—12].

Для уменьшения числа анализируемых траекторий при обработке временных последовательностей целесообразно удалять начальные точки, если в строб захвата не попадет ни одной точки из очередного обзора. Такой сброс начальных точек оправдан в случае подавляющего количества ложных отметок, так как потеря одной или двух отметок в начале траектории может иметь несущественное значение при заданном малом значении вероятности ложной тревоги.

После отбора отметок в стробах рассчитываются параметры предполагаемой траектории (согласно принятому описанию) и формируется строб прогноза для следующего обзора. При вычислениях координат стробов прогноза можно рекомендовать использование линейной функции для первых 4—5 отметок и квадратичной — для большего числа отметок.

Отметим также, что при расчете величины строба прогноза использовать текущую выборочную дисперсию параметров нужно с определенной осторожностью, так как может возникать эффект возрастания значения (иногда резкого) выборочной дисперсии, который увеличивает вероятность селекции ложных траекторий.

Важным моментом в работе алгоритма является отсутствие отметки в стробе прогноза. Одной из причин отсутствия отметки в стробе может оказаться недостаточный его размер, связанный с близкой к нулю оценкой дисперсии параметров траектории или динамикой объекта. Поэтому необходимо выбирать минимально допустимый размер строба, который зависит от ускорения объекта, маневрирования и предыдущих оценок дисперсии.

Обычно вместо отсутствующей отметки берут экстраполированное значение, а так как размер следующего строба увеличивается, то увеличивается вероятность выбора ложной следующей отметки. В то же время в ряде систем слежения за объектами предусматривается как бы повторная проверка наличия объекта в стробе «предсказания». Так, например, в системах обнаружения во временных последовательностях изображений по внутрикадровой обзорной обработке [6] в случае отсутствия отметки проводится более сложная межкадровая обработка в стробе сопровождения по текущему и предшествующему изображениям, что повышает вероятность обнаружения отметок и траекторий в целом. Аналогично поступают при слежении за объектами РЛС с электронным сканированием. Если в обзорном режиме отметка не найдена, то формируется диаграмма направленности антенны в строб сопровождения, и если возможно, то излучатель работает с повышенной мощностью. Очевидно,

что повторное обнаружение требует дополнительных ресурсов (например, памяти для хранения дополнительных кадров) и временных затрат.

В случае пропуска нескольких обзоров подряд (при сбоях системы обнаружения отметок) возможны несколько исходов.

Сброс системы в нулевое состояние (т. е. сброс всех траекторий) целесообразен в случае, если количество пропущенных обзоров сравнимо с числом текущих хранимых обзоров.

Замена отсутствующих отметок на экстраполированные значения для всех траекторий возможна в случаях редких пропусков обзоров отметок, когда вероятность обнаружения является более важной характеристикой, чем вероятность ложной тревоги. Эти отметки могут не учитываться как необнаруженные при проверке траекторий на сброс.

Если интервалы времени между обзорами предполагаются неравными, то при пропуске одного или нескольких обзоров продолжать можно траектории, находящиеся на сопровождении, и вычислять стробы прогноза обычным порядком. Траектории, находящиеся на стадии завязки, в этом случае могут сбрасываться в зависимости от числа пропущенных обзоров.

Часть алгоритма, которая осуществляет сопровождение, содержит операции, аналогичные части алгоритма завязки траектории, а также подтверждения траектории, разрешения конфликтных ситуаций. Критерии завязки, сброса и подтверждения траекторий являются центральными в алгоритмах обработки траекторий, основаны на подсчете пропущенных отметок или методе последовательного анализа [1, 18] и определяют вероятностные характеристики алгоритма. Кроме того, эти критерии должны быть адаптированы к имеющимся особенностям движения (например, нелинейное нарастание скорости) и обработки исходных изображений. Также от конкретных условий задачи зависят минимальный и максимальный размеры строба вдоль траектории. При моделировании алгоритма основным был критерий сброса траектории по пропускам n из m отметок подряд.

Если в алгоритме селекции траекторий важно уменьшить вероятность ложной тревоги (на всех этапах обработки), то можно расширить число признаков отметок для сброса траекторий. Если известна зависимость яркости объекта от времени, то в случае несоответствия оценок и описания это может служить основанием непередачи траектории на сопровождение. Основанием для сброса траектории на любом участке может стать резкое увеличение выборочной дисперсии координат при их оценивании, что может быть важным, например, для баллистических объектов.

Характеристика для оценки качества моделируемых вариантов алгоритмов обработки траекторий и расчета параметров программы предложена в виде выборочного распределения числа траекторий (сброшенных и переданных на распознавание) в зависимости от числа отметок в траектории. Для обзоров со случайными отметками выборочное распределение числа сбрасываемых траекторий можно описывать геометрическим распределением

$$P(k) = p(1 - p)^{(k-1)}, \quad (1)$$

что согласуется с представлениями [1]. Первый $M1$ и второй $M2$ моменты связаны с p соотношениями $M1 = 1/p$, $M2 = (1 - p)/p^2$. Для примера ниже приведены две строки, которые содержат: первая — выборочное распределение сброшенных траекторий размером k отметок, полученное для пуассоновского поля отметок, вторая — теоретическое распределение, рассчитанное по (1) с $p = 0,5397$ для $k = 1, 10$ и общего числа траекторий, равного 2317:

1222	598	227	120	60	23	12	3	2	0
1250	575	264	121	56	25	11	5	2	1

Сброс траекторий осуществлялся по двум пропускам отметок подряд в последовательности обзоров. Вероятность ложной селекции траектории с $k = 15$ для

$p = 0,5397$, рассчитанная по (1), равна $8,8 \times 10^{-6}$. Предыдущие выводы о некоторых свойствах алгоритма были основаны на анализе выборочных распределений.

До этого момента предполагалось, что исходные данные удовлетворяют условиям, при которых анализируемый алгоритм работает без осложнений. Таким условиям удовлетворяют обзоры с небольшой плотностью отметок помех и объектов, причем пропуски отметок от объектов редки. При увеличении плотности ложных отметок, кроме увеличения вероятностей ложной селекции траекторий, возможно возникновение «конфликтных ситуаций». К таким ситуациям отнесем следующие: одна отметка присоединяется к нескольким траекториям (случай пересечения траекторий, повторение части траектории); перепутывание траекторий (случай двух близких траекторий); две отметки на одну траекторию (размножение траекторий). В моделирующей программе реализовано исключение траекторий с совпадающими участками.

Вопросы реализации. Поиск минимального расстояния является наиболее трудоемкой операцией при реализации алгоритма и дает наибольший вклад в общее время счета. Поэтому уменьшение этих затрат — важная задача, которая может решаться различными путями. Одним из них является предварительная сортировка отметок по выбранным областям обзора, что может уменьшить перебор при нахождении минимального расстояния. В случае введения третьей координаты (например, яркости) эффективность такого подхода становится неочевидной. Другой вариант уменьшения затрат поиска отметки с минимальным расстоянием до центра строба связан с выделением отметок по строкам (углу), что приводит к автоматическому упорядочению их в порядке возрастания координаты по строкам. Если положить, что отметки обзора представляют пуассоновское поле, то в списке отметок можно найти отметку, близкую по упорядоченной координате к центру строба, и осуществлять поиск в списке от этой отметки. Используя упорядоченность по одной из координат (для определенности Y), можно реализовать просмотр списка отметок обзора, вычисляя разность между упорядочиваемой координатой отметки и центром строба, и сравнить с порогом. Если разность больше порога, то проверяется следующая отметка. Если разность меньше порога, то сравнивается модуль разности по другой координате, и если разность меньше порога, то вычисляется расстояние в нужной метрике. Если разность отрицательна, а ее модуль больше порога, то просмотр списка прекращается. Такой подход дает выигрыш до 30—40 % в сравнении с вычислением расстояния по всему списку отметок обзора.

Объем памяти V_m , необходимый для исходных (обзоры отметок) и промежуточных данных, представим выражением

$$V_m = P_a(K_o + C)N_{io}B + S_lN_{it}B,$$

где P_a — число параметров, описывающих отметку; K_o — число хранимых обзоров; N_{io} — среднее число отметок в обзоре; C — некоторая постоянная; N_{it} — среднее число траекторий; S_l — среднее значение числа отметок в траектории; B — количество байтов на один параметр отметки. Общий объем памяти, требуемый для программы, равен $V_o = V_m + V_p$, где V_p — объем памяти, необходимый для реализации вычислений, который зависит от алгоритма и используемого языка. Число операций алгоритма O_p в установленном режиме работы можно представить выражением

$$O_p = C_1N_{it} + C_2N_{it}N_{io} + C_3N_{io},$$

где C_1, C_2, C_3 — постоянные; C_1N_{it} — операции, связанные с вычислением экстраполированных координат и стробов прогноза; $C_2N_{it}N_{io}$ определяются селекцией отметок в стробе; C_3N_{io} — дополнительные проверки, поиск адресов отметок, восстановление отсутствующих отметок в стробах прогноза. Из формулы следует, что время работы квадратично растет от числа отметок в обзоре, что подтверждается результатами моделирования для случайных полей отме-

Таблица 1

Число отметок в обзоре	Радиус начального строба	Время выполнения по формуле, с	Максимальное число траекторий
25	20	1,077 1,074	88
50	15	2,129 1,94	170
100	10	5,681 5,43	372
200	7	19,235 19,4	738
300	5	42,682 42,7	1141

ток в обзорах, приведенными в табл. 1 для ПЭВМ IBM PC/AT. Отметки моделировались на квадратной решетке размером 512×512 точек в виде пуассоновского поля. Радиус строба изменялся с целью сохранения постоянной величины приведенной плотности точек на этом поле. Время работы в таблице указано для обработанных 100 обзоров. Время выполнения можно аппроксимировать формулой

$$T_{\text{вып}} = 0,78 + 0,0466(N_i/10)^2,$$

расчетные значения которой также приведены в таблице.

Число траекторий (включая траектории, состоящие из одной точки) в среднем линейно зависит от числа отметок в обзорах при условии, что плотность точек (отметок) в обзоре постоянна.

Таблица 2

Номер обзора	Ход	Коды отметки	Координаты		Номер обзора	Ход	Коды отметки	Координаты	
			X	Y				X	Y
4	1	1	327	41	32	1	1	297	77
5	2	1	327	41	33	2	1	295	80
6	1	1	325	41	34	1	1	292	82
7	2	1	327	42	36	1	1	286	87
8	1	1	326	42	37	2	1	282	89
16	1	1	325	48	38	1	1	278	91
17	2	1	324	49	39	2	2	276	94
18	1	1	323	51	40	1	1	267	96
19	2	1	322	52	41	2	1	266	99
20	1	1	324	52	42	1	1	262	101
22	1	1	321	55	44	1	1	254	106
23	2	1	318	58	45	2	1	251	108
24	1	1	320	59	46	1	3	247	111
25	2	2	317	62	47	2	1	242	113
26	1	1	317	62	48	1	1	239	115
27	2	2	312	66	49	2	2	233	118
29	2	1	307	70	51	2	2	223	123
30	1	1	306	72	52	1	2	216	124
31	2	1	300	75	53	2	2	213	128

Пример. В табл. 2 приведены координаты траектории объекта, обнаруженной алгоритмом по серии обзоров, полученных системой обработки последовательности ИК-изображений, содержащей реальный объект (программа В. П. Косых). В столбце ход 1 соответствует прямому ходу линейки, 2 — обратному. Если код отметки 1, то отметка получена внутрикадровой обзорной обработкой. Если код отметки 2, то отметка получена «повторным» обнаружением по межкадровой разности в стробе. Если код отметки 3, то отметка прогнозная. Из таблицы видно, что «повторное» обнаружение осуществлялось в семи случаях и только в одном объект был не найден (отметка с параметрами 46 1 3 247 111). В обзорах 1—3 отметки, принадлежащие траектории, не обнаружены, обзоры 9—15, 21, 28, 35, 43, 50 отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974.
2. Зверев А. И., Красильщиков М. Н., Кудряшов С. В. Распознавание типов объектов и прогнозирование их движения по результатам малоинформационных измерений, реализуемых автономными средствами наблюдения // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1993. № 6; 1994. № 1.
3. Рабинович С. Дж., Гейджер Ч. Х., Брукнес Э., Мюз Ч. Э., Джонсон Ч. М. Цифровые методы в радиолокации // ТИИЭР. 1985. 73, № 2.
4. Этингтон А., Карилас П. Дж., Райт Дж. Д. Многофункциональные вращающиеся РЛС с электронным сканированием для обзора воздушного пространства // Там же.
5. Найт У. С., Придэм Р. Г., Кэй С. М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. 1981. 69, № 11.
6. Ефимов В. М., Киричук В. С., Пустовских А. И., Резник А. Л. Методики обработки серий изображений // Автометрия. 1989. № 2.
7. Иванов В. А. Моделирование корреляционного сопровождения объектов в реальном времени // Автометрия. 1991. № 3.
8. Хазен Э. М. Методы оптимальных статистических решений и задачи оптимального управления. М.: Сов. радио, 1969.
9. Анисимов Б. А., Кудрявцев В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высш. шк., 1983.
10. Автоматическая обработка данных с пузырьковых и искровых камер: Сб. статей: Пер. с англ. /Под ред. Б. С. Розова. М.: Атомиздат, 1971.
11. Материалы II Всесоюзного семинара по обработке физической информации, Ереван, сентябрь 1977. Ереван: Ереванский физ. ин-т, 1978.
12. Бок Р., Грот Х., Ноц Д., Реглер М. Методы анализа данных в физическом эксперименте: Пер. с англ. /Под ред. М. Реглера. М.: Мир, 1993.
13. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бьюси. М.: Наука, 1982.
14. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975.
15. Иванов В. А. К вопросу о введении адаптации в методе настраиваемой модели при идентификации нестационарных объектов // Системы автоматизации научных исследований. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1976.
16. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.
17. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967.
18. Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин. М.: Наука, 1971.

Поступила в редакцию 2 октября 1995 г.