

УДК 629.735.015:681.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАНОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

К.А. ГЛАГОВСКИЙ, В.В. ЛАВИНА, Л.Е. РУДЕЛЬСОН

Методическую основу вторичной обработки радиолокационной информации составляет критерий максимума апостериорной вероятности для правильного объединения измерений местоположения воздушных судов. Траектория движения строится по результатам анализа статистики их наблюдения. Рассматривается дополнение этой схемы априорными сведениями о маршруте, известными системе из плана полета.

Ключевые слова: обработка радиолокационной информации, критерий максимума апостериорной вероятности, априорные сведения о маршруте полета.

Введение

Методической основой традиционной схемы вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ) является известный [1] критерий максимума апостериорной вероятности, т.е. вероятности адекватного (правильного) объединения последовательных (в темпе обзора антенны локатора) измерений местоположения объектов, необходимого для построения наблюдаемых траекторий (моделей движения). Применение критерия состоит в следующем. На основании n измерений текущих параметров движения x_1, x_2, \dots, x_n , выполненных с погрешностью, необходимо оценить параметры траектории $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. Считается, что закон распределения вероятностей $p(x_1, x_2, \dots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ известен, но неизвестны параметры $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. Их выбирают так, чтобы при измеренных значениях x_1, x_2, \dots, x_n и при подстановке выбранных $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_k$ плотность распределения вероятностей $p(x_1, x_2, \dots, x_n, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_k)$ оказывалась максимальной. Априорные сведения, содержащиеся в планах полетов, в полной мере не используются, траектория строится на базе накапливаемой информации.

1. Постановка и формализация задачи

На этапе радиолокационного сопровождения для принятия правильного решения об истинности (достоверности) образования траектории нужно уметь оценивать качество ее прокладки. Из теории случайных процессов и математической статистики известно [1], что если случайные векторы $X^{(1)}, \dots, X^{(n)}$ имеют нормальное распределение с ковариационной матрицей Σ , то оценка S максимального правдоподобия Σ для выборки векторов $X^{(1)}, \dots, X^{(n)}$ составляет

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (X^{(m)} - \bar{X})(X^{(m)} - \bar{X})^T,$$

где \bar{X} – вектор арифметического среднего $X^{(1)}, \dots, X^{(n)}$; $(X^{(m)} - \bar{X})$ – исходный вектор; $(X^{(m)} - \bar{X})^T$ – транспонированный вектор разности между измеренными и сглаженными координатами. Считается, что случайный процесс измерений лучше всего описывается именно нормальным распределением, и задачей привязки новых точек к сглаживаемым от обзора к обзору траекториям становится их сортировка по вычисленному максимальному значению S . Каждая новая измеренная точка (текущая точка) рассматривается совместно с каждым сопровождаемым вектором и приписывается к тому из них, для которого расчетное S достигает максимума. Важно отметить, что в отличие от оценки погрешности σ единичного измерения, в данном слу-

чае анализу подвергается наложение новой ошибки на всю предысторию ошибок, и как следствие, в качестве рабочего инструмента вместо дисперсии используется ковариация.

Статистический показатель S , хорошо зарекомендовавший себя при оценке процессов, не допускающих пропусков и ложных измерений, не учитывает этой специфики радиолокационных наблюдений. В результате за показатель S_n качества привязки текущих точек к прокладываемой траектории стали принимать логарифм отношения правдоподобия двух гипотез относительно их принадлежности той или иной траектории. При этом считается, что дисперсия расстояния между измеренной и предсказанной точками в случае ложной привязки в Q раз больше, чем при истинной привязке. Этот показатель качества S_n (n – индекс обзора) имеет вид

$$S_n = \left(\frac{1}{Q} - 1 \right) \cdot \Delta Z_n^T \Sigma_n^{-1} \Delta Z_n + \ln Q,$$

где ΔZ_n , ΔZ_n^T – векторы (исходный и транспонированный) разности между экстраполяционной (упрежденной) точкой прокладываемой траектории и соответствующей текущей точкой на n -м обзоре; Σ_n – ковариационная матрица вектора ΔZ_n .

Не углубляясь в детали традиционной схемы, отметим ее принципиальную направленность на концепцию статистического накопления информации о траектории движения цели, на апостериорные вероятности правильного объединения измеренных и прогнозируемых точек. Использование этого отправного пункта заимствовано из логики процедур обработки радиолокационной информации в системах специального назначения, где оно оправдано высоким значением риска выдвижения ложной гипотезы о дальнейшем маршруте движения сопровождаемого объекта. В приложении к задачам управления полетами гражданской авиации (ГА) риск ошибки минимален, так как на каждый рейс заранее поступают формализованные заявки на использование воздушного пространства (ИВП). Они содержат описание маршрута, отклонения от которых возможны лишь в чрезвычайных ситуациях, таких как опасные явления погоды по маршруту движения, вынужденная посадка, бедствие на борту, нападение на экипаж и т.д.

2. Алгоритм обнаружения маневра

В обычных условиях выполнения полетов ГА плановая траектория может служить в роли предиктора процедуры обработки РЛИ, что позволяет привлекать имеющиеся в системе априорные сведения о маршруте. С этой целью следует выполнять в момент обнаружения цели ее отождествление с соответствующим планом полета и последовательно (в темпе обзора антенны радиолокатора) уточнять текущие плановые значения вектора скорости и координат местоположения по результатам радиолокационных измерений. Параметры движения задаются в заявке на ИВП со значительной погрешностью (скорость – десятками метров в секунду, высота – заданным эшелонем, время пролета пунктов маршрута – минутами). Отождествление плана полета с воздушным судном (ВС), наблюдаемым радаром, позволяет достичь необходимой для управления воздушным движением точности определения местоположения и прогноза траектории.

В сложной информационной обстановке – пропуски и неоднозначность измерений, ложные измерения, маневрирующие и групповые объекты, помехи – сопровождение на основе критерия максимума апостериорной вероятности характеризуется большим числом ложных траекторий, перепутыванием траекторий, срывом сопровождения и пропуском движущихся объектов [2]. Неустойчивость традиционной схемы объясняется ошибками измерений и выставления математического строга для отбора отметки измерения (около прогнозируемого положения объекта в предположении его прямолинейного движения). Классические алгоритмы создавались для компьютеров первых поколений с низким быстродействием и малым объемом памяти. При переходе к технике нового поколения, имеющей практически неограниченные вычислительные ресурсы, алгоритмы обработки попросту заимствовались у предшественников. Ситуацию можно

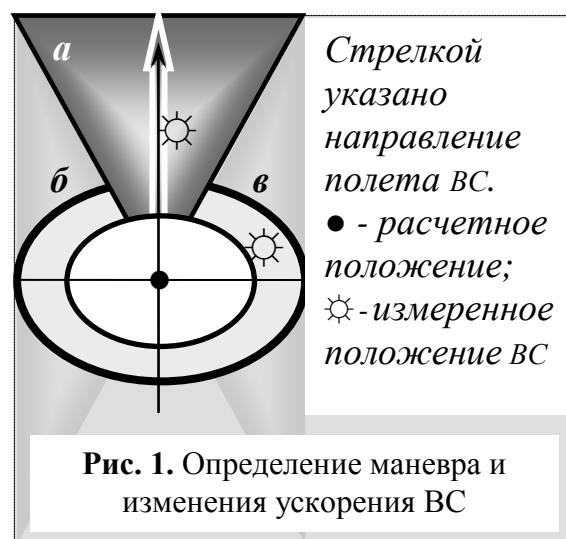
улучшить, если более полно использовать возможности современных компьютеров. Можно в любой информационной обстановке получить достаточно точное сопровождение всех наблюдаемых объектов с помощью более сложных фильтров, накопления дополнительной статистики, учета возможностей маневрирования и комплексной обработки нескольких гипотез прокладки траекторий.

Сигналом обнаружения маневра считается изменение параметров прокладываемой траектории. Прямолинейное равномерное движение преобразуется в линию с неопределенной кривизной, ускорение становится отличным от нуля. На рис. 1 около экстраполированной отметки построены два строба. Измеренное местоположение ВС должно оказаться (ождается) во внутреннем стробе с вероятностью $Conf_1 = 0,65$, а во внешнем – $Conf_2 = 0,95$. Попадание измеренной отметки во внутренний строб означает сохранение гипотезы о прямолинейности и равномерности. При обнаружении ВС в области, ограниченной треугольником a и дугой внутреннего строба, принимается решение о том, что цель движется прямолинейно с ускорением. Если точка наблюдается в заштрихованных областях b или v , тогда считается, что цель маневрирует по курсу и скорости.

При маневрах ВС нарушается соответствие между гипотезой прямолинейного равномерного движения и фактической траекторией, вследствие чего появляется динамическая ошибка сопровождения. Возрастание отклонений используется для обнаружения маневра путем сравнения результата накопления погрешности за n обзоров с установленным порогом. Геометрическая интерпретация соответствующего алгоритма приведена на рис. 2. Траектория ВС изображается в виде стрелки, проходящей через две последовательные отметки положения цели на i -м и $(i + 1)$ -м обзорах.

В момент t_i измеренные дальность R_i и азимут θ_i определяют текущее положение и дают возможность рассчитать координаты на момент t_{i+1} (точка l на рис. 2). Кроме строба автосопровождения метки l , в предположении прямолинейного движения выставляется так называемый «сторожевой» строб обнаружения маневра $Conf_3 = 0,998$, помеченный штриховкой. Попадание в сторожевой строб измеренной отметки 3 от наблюдаемого ВС свидетельствует о маневре, а относительное положение внутри строба – о направлении и величине скорости его исполнения. Для алгоритмов обработки РЛИ факт обнаружения маневра становится переключателем длины учитываемой предыстории с $10 \div 20$ точек до $2 \div 4$ либо служит основанием для перехода к уравнениям движения с использованием полиномов более высокой степени.

Однако при этом сохраняется запаздывание сопровождения маневрирующего объекта, заложенное в традиционной схеме. Для преодоления затруднения следует отвергать гипотезу прямолинейного равномерного движения не по факту обнаружения маневра, а по рассчитанным плановым данным [3]. Такой подход позволяет расширить возможности системы с помощью добавления к принципу обратной связи (нет подтверждения упрежденной расчетной точки – переход к гипотезе маневра) автоматическим прогнозированием начала маневрирования на основе плана полета. Программное обеспечение (ПО) должно строить плановую траекторию движения с учетом описаний воздушных трасс, а также известных из летно-технических характеристик типов ВС радиусов разворота, и рассчитывать экстраполяционные точки по результатам вычислений на основе заданной линии пути.



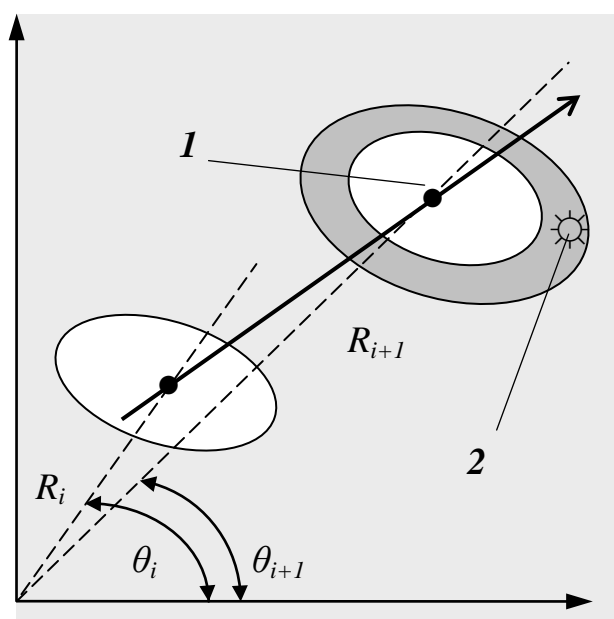


Рис. 2. Схема обнаружения маневра

кации [5]. С момента отождествления план полета пересчитывается с учетом измеренных значений скорости и координат. Далее расчет экстраполяционной точки использует априорную информацию о маршруте полета. На прямолинейных участках трасс сохраняется традиционная схема, а в окрестности каждой поворотной точки маршрута ПО, не дожидаясь обнаружения маневра по радиолокационным данным, превентивно укорачивает действующую предысторию полета и расширяет строб автосопровождения до размеров «сторожевого». При этом упрежденные точки рассчитываются на основании модели движения по окружности, описываемой радиусом разворота, соответствующим летно-техническим характеристикам, известным из плана полета сопровождаемого ВС [6].

Заключение

По результатам моделирования можно заключить, что использование априорной плановой информации улучшает показатели быстродействия и устойчивости радиолокационного сопровождения ВС в штатных ситуациях управления воздушным движением [7]. Однако при имитации чрезвычайных ситуаций (например, нападение на экипаж), приводящих к неожиданному изменению маршрута, план полета становится дезинформацией для системы и требует специальных мер блокировки.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

С момента обнаружения ВС вместо традиционного выдвижения гипотезы о равновероятном значении курса его движения следует анализировать [4], какие трассы ГА расположены в окрестности координат появившегося ВС, и какой рейс должен выполняться в текущее время.

Захват и сопровождение ВС производятся по обычным правилам вторичной обработки РЛИ. Далее ПО устанавливает связь между описаниями объекта в комплексах программ обработки плановой информации и РЛИ. Наилучшим способом отождествления является их объединение в единую запись базы данных, хотя допускается и установление взаимных ссылок.

Отождествление происходит автоматически, если борт оснащен средствами опознавания, либо выполняется диспетчером с помощью функции «Привязка формуляра», если ВС сопровождается только по данным первичной ло-

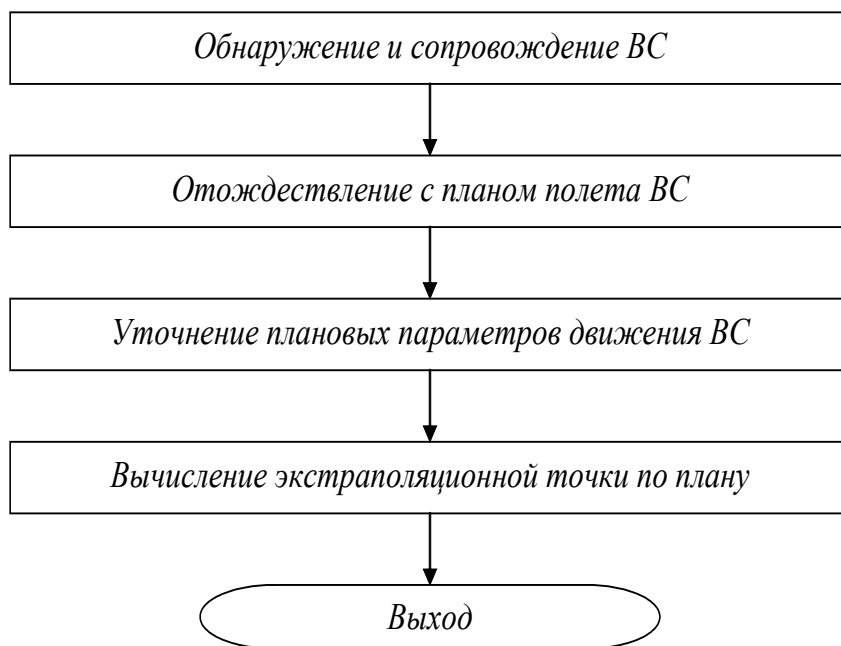


Рис. 3. Упрощенная схема алгоритма

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хазен Э.М., Паронджанов С.Д.** Исследование задачи отождествления траекторий воздушных судов // Управление воздушным движением. - М.: Воздушный транспорт, 1983.
2. **Широков Л.Е.** Комплексное гипотезное сопровождение движущихся объектов // Известия Академии наук. Теория и системы управления. - 2000. - № 6.
3. **Рудельсон Л.Е.** Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением // Функциональное программное обеспечение: учеб. пособие. - М.: МГТУ ГА, 2004. - Ч. II.
4. **Кузнецов В.Л.** Кинетический подход к описанию эволюции неопределенности состояния воздушного судна в задаче расчета риска катастроф // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2006. - № 105.
5. Документ Евроконтроля DLM-0607-001-02-00, 2007. Этап определения проекта SESAR (Исследование организации воздушного движения в едином Европейском небе).
6. **Глаговский К.А., Лавина В.В., Преображенская Е.В.** Организация сетевого доступа к распределенной базе аэронавигационной информации // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации – 2012: сб. докладов междунар. науч.-технич. конф. - Иркутск: ИФ МГТУ ГА, 2012.
7. **Омородион Р.О., Рудельсон Л.Е.** Функция и предикат поиска аэронавигационных данных для оценки загрузки воздушного пространства // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 195.

USING OF FLIGHT-PLAN INFORMATION FOR QUALITY
IMPROVEMENT OF RADAR DATA PROCESSING

Glagovskiy K.A., Lavina V.V., Rudelson L.E.

Criterion of a posteriori probability maximum is the methodological basis of the secondary processing of radar data in order to receive proper aircraft trajectory gasket. It is proposed to add to this scheme a priori information about the route which is known from the flight plan.

Key words: processing of radar data, criterion of a posteriori probability maximum, a priori information about the route of flight.

Сведения об авторах

Глаговский Кирилл Андреевич, 1989 г.р., окончил МГТУ ГА (2011), аспирант МГТУ ГА, автор 8 научных работ, область научных интересов – вычислительные системы и методы, распределенные системы, организация вычислений.

Лавина Виктория Валерьевна, окончила МГТУ ГА (2012), аспирантка МГТУ ГА, автор 7 научных работ, область научных интересов – программная обработка радиолокационной информации в автоматизированных системах организации воздушного движения.

Рудельсон Лев Ефимович, 1944 г.р., окончил МЭИ (1968), доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, автор более 170 научных работ, область научных интересов – программное обеспечение автоматизированных систем организации воздушного движения.