

Высокоточные алгоритмы оценивания координат и параметров движения воздушных судов гражданской авиации по информации от радиолокационных источников наблюдения

М.И. СЫЧЕВ,
д-р техн. наук
(МАИ, Москва)
sychev@mai.ru

Рассматривается задача траекторной обработки радиолокационной информации в системе организации воздушного движения гражданской авиации на основе много-модельной фильтрации. Дано описание трех вариантов построения структурных схем многомодельных фильтров. Представлены различные варианты алгоритма объединения гипотез, влияющего на характеристики траекторной обработки по точности. Приводятся результаты моделирования.

Радиолокация, траекторная обработка, многомодельная фильтрация

Оценивание координат и параметров движения воздушных судов (ВС) по информации на выходе радиолокационных источников наблюдения является основой для решения важных задач в системе организации воздушного движения гражданской авиации. Повышение безопасности полетов зависит от своевременного обнаружения потенциально конфликтных ситуаций, связанных с нарушениями правил горизонтального и вертикального эшелонирования. Обнаружение потенциально конфликтных ситуаций с коротким временем наступления (в пределах двух минут) основано на результатах траекторной обработки информации от средств наблюдения за ВС, что предъявляет значительно более жесткие требования к техническим характеристикам средств наблюдения ВС и качеству траекторной обработки. В работе [1] сформулированы данные требования и определены основные типы движения ВС и их параметры.

Определены три основных типа горизонтального движения. Первый – основной тип – прямолинейное равномерное движение, второй – стандартный поворот, третий – прямолинейное движение с изменением скорости. В работе [1] заданы требования по точности сопровождения ВС не только по координатам, но и по вектору скорости. Сделано это не только для основных типов движения, но и для переходных режимов при смене одного типа движения другим.

В результате приходим к необходимости использования и исследования многомодельных фильтров, основанных на описании возможного движения ВС при помощи нескольких моделей. Общий подход к синтезу таких фильтров, основанный на общем алгоритме фильтрации марковского процесса, представлен в работах [2–7]. Добавив в вектор состояния, описывающий текущие координаты и параметры движения ВС, дискретный параметр, интерпретируемый как индекс текущей модели движения, можно получить общий алгоритм многомодельной фильтрации [3, 5]. Данный алгоритм описывает, как меняется плотность распределения вероятностей вектора состояния, включая дискретную компоненту, с течением времени и при обновлении новыми результатами наблюдений.

Целью работы является исследование трех модельных алгоритмов траекторной обработки. Выбор моделей движения ВС, особенностей реализации, настройка параметров и их взаимное влияние для конкретных случаев практически не рассматривались. В частности, влияние выбора различных путей объединения параметров отдельных гипотез относительно модели движения ВС в текущий момент времени на характеристики алгоритма в целом не исследовалось.

Технически реализуемые алгоритмы фильтрации получаются при аппроксимации плотности распределения вероятностей вектора состояния нормальным законом распределения. В этих условиях каждая из гипотез, соответствующая одному из возможных типов движения, в любой момент времени характеризуется математическим ожиданием вектора состояния, его корреляционной матрицей и вероятностью. В работах [4–7] эта совокупность параметров, соответствующая n -й гипотезе в k -й момент времени, обозначена как $\lambda_n(k)$:

$$\lambda_n(k) = \left\{ \hat{\alpha}(k | k, \theta(k) = n), R(k | k, \theta(k) = n), P(\theta(k) = n | k) \right\},$$

$$n = \overline{1, N},$$
(1)

где $\theta(k)$ – индекс модели движения ВС в k -й момент времени; N – общее число моделей движения ВС; $\hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n)$, $R(k|k, \theta(k) = n)$ – математическое ожидание и корреляционная матрица вектора состояния координат и параметров движения ВС в k -й момент времени по информации от наблюдаемой выборки при условии справедливости гипотезы с индексом « n » относительно модели движения ВС в текущий k -й момент времени; $P(\theta(k) = n|k)$ – оценка вероятности гипотезы с индексом « n » в k -й момент времени, которая может рассматриваться как априорная для следующего момента времени или как апостериорная для текущего.

Аппроксимация плотностей распределения вероятностей векторов состояния и наблюдения нормальным законом фактически эквивалентна линеаризации задачи. В этих условиях уравнение изменения вектора состояния непрерывных параметров $\alpha(k)$ можно представить в виде

$$\alpha(k+1) = F(\theta(k+1) = n)\alpha(k) + N_\alpha(k+1, \theta(k+1) = n),$$

$$n = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Матрица $F(\theta(k+1) = n)$ и параметры вектора возмущающих шумов $N_\alpha(k+1, \theta(k+1) = n)$ зависят от индекса текущей модели движения. Отсчеты вектора возмущающих шумов имеют нормальное распределение с параметрами $M[N_\alpha(k, \theta(k) = n)] = 0, M[N_\alpha(k_1, \theta(k) = n)N_\alpha^T(k_2, \theta(k) = n)] = R_\alpha(\theta(k) = n)\delta_{k_1, k_2}$, где δ_{k_1, k_2} – символ Кронекера.

Линеаризованное уравнение наблюдения представим в виде

$$Y(k) = H\alpha(k) + N_Y(k), \quad (3)$$

где $Y(k)$ – вектор наблюдаемой выборки в k -й момент времени; H – матрица наблюдения; $N_Y(k)$ – вектор шумов наблюдения. Отсчеты вектора $N_Y(k)$ имеют нормальное распределение с характеристиками: $M[N_Y(k)] = 0, M[N_Y(k_1)N_Y^T(k_2)] = R_Y\delta_{k_1, k_2}$.

Алгоритм многомодельной фильтрации можно разбить на три элементарные операции: объединение гипотез, экстраполяция гипотезы на следующий момент времени и обновление гипотезы при получении нового наблюдения.

В зависимости от того, в какой момент проводится объединение отдельных гипотез и как используется его результат, возможно построение многомодельных алгоритмов трех типов – ММА1, ММА2 и ММА3 [4, 5].

В первом алгоритме (ММА1) для продолжения работы при переходе к следующему моменту времени используется объединенная информация от всех гипотез. Фактически при переходе от k -го момента времени к $(k+1)$ -му фильтр можно рассматривать как N параллельно работающих фильтров Калмана с последующим объединением их информации. Во втором алгоритме (ММА2) экстраполяция вектора состояния на следующий момент времени происходит для каждой из гипотез в отдельности, после чего следует их частичное объединение. В результате в ММА2 присутствует N^2 блоков экстраполяции и N блоков обновления. Полное объединение гипотез после обновления проводится исключительно для выдачи информации на выход фильтра, но на следующем шаге внутри фильтра не используется. Третий алгоритм (ММА3) представляет собой N^2 параллельно работающих фильтров Калмана с частичным объединением информации для отдельных гипотез после их обновления. Полное объединение гипотез, как и в ММА2, проводится только для выдачи информации на выход фильтра.

Один из способов объединения гипотез $\lambda_n(k), n = \overline{1, N}$ основан на гауссовой аппроксимации результирующей плотности распределения вероятностей непрерывных параметров вектора состояния $\alpha(k)$. Результирующий вектор состояния непрерывных параметров и его корреляционная матрица и вероятность гипотезы могут быть получены следующим образом:

$$\hat{\alpha}_\Sigma(k|k) = \sum_{n=1}^N \frac{P(\theta(k) = n|k)}{P_\Sigma(k|k)} \hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n); \quad (4)$$

$$R_{\Sigma}(k|k) = \sum_{n=1}^N \frac{P(\theta(k) = n|k)}{P_{\Sigma}(k|k)} \times \\ \times \left\{ R(k|k, \theta(k) = n) + [\hat{\alpha}(k|k) - \hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n)] [\hat{\alpha}(k|k) - \hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n)]^T \right\}; \quad (4)$$

$$P_{\Sigma}(k|k) = \sum_{n=1}^N P(\theta(k) = n|k).$$

Если объединяемые гипотезы не образуют полной группы и сумма их вероятностей не равна единице (частичное объединение гипотез), например, как в ММА2 при объединении экстраполированных гипотез, то в алгоритме (4) необходимо провести их нормировку. При этом вероятность объединенной гипотезы равна сумме объединяемых.

Другой способ объединения гипотез может быть основан на выборе гипотезы с наибольшей вероятностью:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{\Sigma}(k|k) &= \hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n); \\ R_{\Sigma}(k|k) &= R(k|k, \theta(k) = n); \\ P_{\Sigma}(k|k) &= \sum_{n=1}^N P(\theta(k) = n|k); \\ n &= \arg \max_n P(\theta(k) = n|k). \end{aligned} \quad (5)$$

Одна из задач данной работы – влияние выбора способа объединения гипотез на характеристики алгоритмов траекторной обработки по точности.

Экстраполяция гипотез проводится следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n_2, \theta(k) = n_1) &= F(\theta(k+1) = n_2) \hat{\alpha}(k|k, \theta(k) = n_1), \\ R(k+1|k, \theta(k+1) = n_2, \theta(k) = n_1) &= F(\theta(k+1) = n_2) \times \\ \times R(k|k, \theta(k) = n_1) F^T(\theta(k+1) = n_2) &+ R_{\alpha}(\theta(k+1) = n_2), \\ P(\theta(k+1) = n_2|k, \theta(k) = n_1) &= P(\theta(k+1) = n_2|\theta(k) = n_1) P(\theta(k) = n_1|k), \\ n_1 &= \overline{1, N}, n_2 = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $P(\theta(k+1) = n_2|\theta(k) = n_1)$ – вероятность смены типа движения в k -й момент времени. Совокупность этих вероятностей образует матрицу переходных вероятностей.

Обновление гипотезы следующим наблюдением осуществляется по формулам

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n) &= \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n) + \\ + R(k+1|k+1, \theta(k+1) = n) H^T R_Y^{-1} \{ &Y(k+1) - H \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n) \}; \\ R^{-1}(k+1|k+1, \theta(k+1) = n) &= R^{-1}(k+1|k, \theta(k+1) = n) + H^T R_Y^{-1} H; \\ P(\theta(k+1) = n|k+1) &= \frac{1}{c} P(\theta(k+1) = n|k) \omega(Y(k+1)|\theta(k+1) = n); \\ \omega(Y(k+1)|\theta(k+1) = n) &= \left((2\pi)^M \det(R_Y + H R(k+1|k, \theta(k+1) = n) H^T) \right)^{-1/2} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} [Y(k+1) - H \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n)]^T \times \right. \\ \times [R_Y + H R(k+1|k, \theta(k+1) = n) H^T]^{-1} &\left. [Y(k+1) - H \hat{\alpha}(k+1|k, \theta(k+1) = n)] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где M – размер вектора наблюдения; $1/c$ – нормирующий множитель, обеспечивающий равенство единице суммы вероятностей всех гипотез.

Для определения матриц, используемых в алгоритмах (5) – (7), необходимо не только задаться моделями возможного движения ВС и наблюдения, но и способами их описания. Необходимо определиться со структурой вектора состояния, который описывает текущие координаты и параметры движения ВС. В данной работе исследуются трехмодельные алгоритмы. Для описания горизонтального движения ВС используются три модели движения ВС – прямолинейного равномерного движения, стандартного поворота и прямолинейного движения с изменением скорости. Рассматривается два подхода для описания вектора состояния [7]. В первом используется вектор состояния следующего вида:

$$\alpha(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y}(k)]^T, \quad (8)$$

где $x(k)$, $y(k)$ – координаты ВС в k -й момент времени; $\dot{x}(k)$, $\dot{y}(k)$ – проекции вектора скорости. В качестве системы координат используется локальная прямоугольная система, связанная с радиолокационной станцией (РЛС), ось Y направлена на север, ось X на восток, азимут ВС отсчитывается относительно направления на север (оси Y). Дополнительные параметры (скорость поворота ВС $\omega(k)$ при выполнении стандартного поворота и продольное ускорение ВС $a_L(k)$ для прямолинейного движения с изменением скорости) оцениваются отдельно. При втором подходе используется расширенный вектор состояния

$$\alpha(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y}(k) \quad \omega(k) \quad a_L(k)]^T. \quad (9)$$

При использовании вектора состояния (8) матрицы, входящие в уравнения (2) и (3) для трех используемых моделей движения ВС, можно найти в работах [4, 5, 7, 8]. Матрицы, входящие в уравнения (2), (3) для вектора состояния (9), представлены в работе [7].

Анализ результатов моделирования [4–7] показал, что в многомодельных алгоритмах наблюдается сильное взаимное влияние параметров фильтров, настроенных на разные типы движения ВС. При рассмотрении тестов Евроконтроля [1] наиболее жесткие требования по точности оценивания координат и параметров горизонтального движения ВС предъявляются к оценкам вектора скорости для прямолинейного равномерного движения, которое можно рассматривать как основное. Для обеспечения этих требований для данного типа движения должна использоваться модель со слабыми возмущениями. Для двух других типов движения (с учетом требований по точности оценивания при смене одного типа движения другим) модели должны иметь большие возмущения. При движении ВС прямолинейно равномерно отклонение первичной отметки ВС, полученной от РЛС, от ее экстраполированного положения будет приводить к перераспределению вероятностей гипотез в пользу моделей с большими возмущениями. Объединение гипотез по формулам (4) не только смещает оценку вектора состояния, но и существенно увеличивает значения элементов ее корреляционной матрицы. В связи с этим алгоритм объединения гипотез (5) может оказаться более предпочтительным.

В качестве дополнительной защиты основной гипотезы, основанной на модели прямолинейного равномерного движения ВС с малыми возмущениями, можно использовать минимальные пороговые значения $\omega_{\min}$ и $a_{L\min}$ для оценок $\omega(k)$ и $a_L(k)$. В случае если оценки этих параметров оказываются ниже порогов $\omega_{\min}$ и $a_{L\min}$, соответствующие им гипотезы фактически соответствуют модели прямолинейного равномерного движения. Однако в отличие от основной гипотезы, их модели движения имеют большие возмущения. В этом случае вероятность соответствующей гипотезы добавляется к вероятности основной, после чего обнуляется.

На рис. 1–8 приведены результаты моделирования трех алгоритмов, построенных по схеме ММА2. Результаты аналогичных алгоритмов, построенных по схеме ММА3, практически совпали с приведенными для ММА2, но при этом сами алгоритмы более трудоемки в вычислительном плане. Алгоритмы типа ММА1 проигрывают им по точности (не менее 10–15 %). Проверяемые алгоритмы отличаются друг от друга способом объединения гипотез на разных этапах (4) или (5). Алгоритмы ММА2-4 построены на основе вектора состояния (8) размерностью 4. В алгоритме ММА2-4-1 объединение гипотез на всех этапах проводится по алгоритму (4). В алгоритме ММА2-4-2 объединение гипотез после их экстраполяции проводится по алгоритму (4), а при формировании выходной оценки вектора состояния – по алгоритму (5). В алгоритме ММА2-4-3 при объединении гипотез после их экстраполяции (если наибольшую вероят-

ность имеет гипотеза, соответствующая сохранению типа движения) объединение происходит по алгоритму (5). В противном случае большую вероятность имеет гипотеза, соответствующая смене типа движения, и объединение гипотез проводится по алгоритму (4). При формировании выходной оценки вектора состояния объединение гипотез проводится по алгоритму (5).

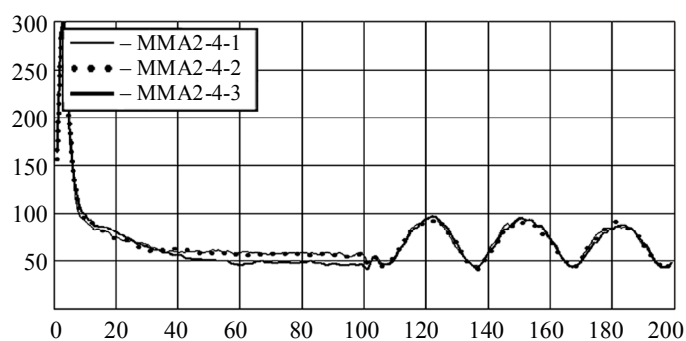


Рис. 1

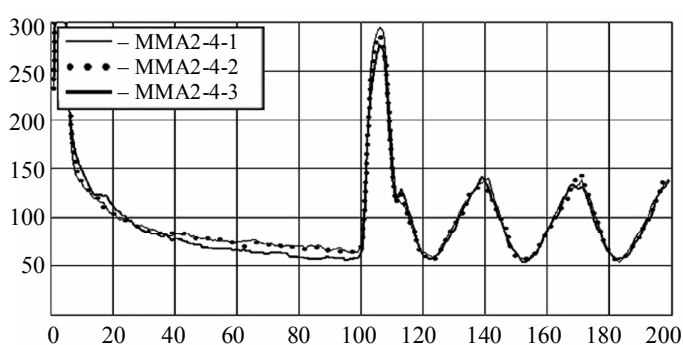


Рис. 2

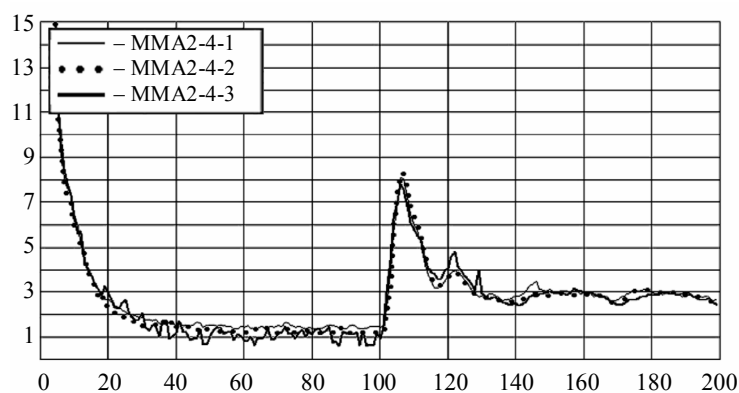


Рис. 3

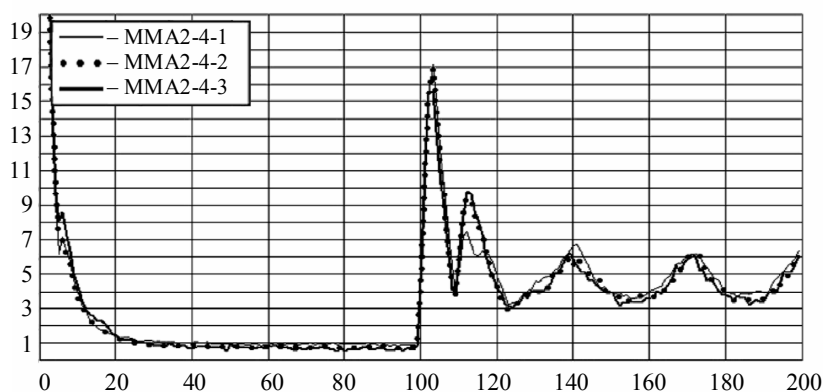


Рис. 4

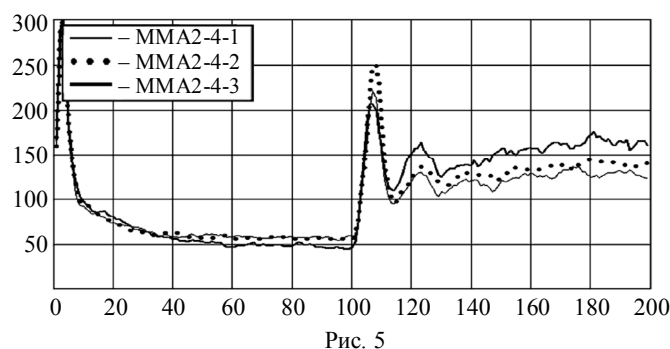


Рис. 5

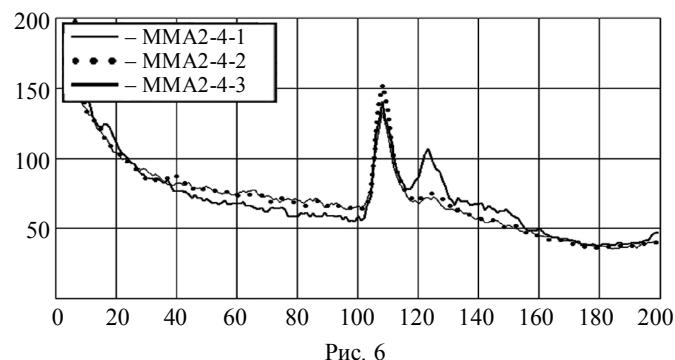


Рис. 6

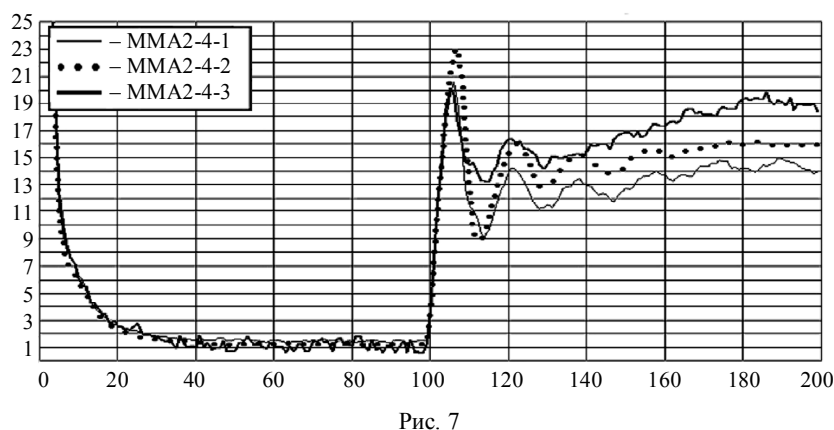


Рис. 7

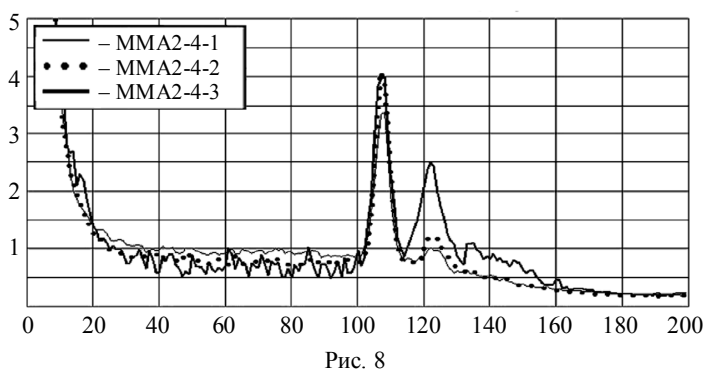


Рис. 8

Параметры настройки алгоритмов были одинаковыми. Для модели прямолинейного равномерного движения было выбрано: $\sigma_L = 0,075 \text{ м/с}^2$, $\sigma_T = 0,2 \text{ м/с}^2$; для модели стандартного поворота $\sigma_L = 0,5 \text{ м/с}^2$, $\sigma_T = 2 \text{ м/с}^2$, $\alpha_\omega = 0,3$, $\omega_{\min} = 0,05 \text{ град/с}$; для модели прямолинейного движения с изменением скорости $\sigma_L = 2 \text{ м/с}^2$, $\sigma_T = 0,5 \text{ м/с}^2$, $\alpha_{mL} = 0,3$, $a_{L\min} = 0,2 \text{ м/с}^2$. Здесь обозначено: σ_L , σ_T – средняя квадратическая ошибка (СКО) возмущений вдоль и поперек движения ВС; α_ω , α_{mL} – коэффициенты сглаживающего α -фильтра по скорости поворота и продольному ускорению; $\omega_{\min}$, $a_{L\min}$ – минимальная скорость поворота ВС и минимальное продольное ускорение.

Матрица вероятностей перехода $P(\theta(k+1)|\theta(k))$ была выбрана следующей:

$$P(\theta(k+1)|\theta(k)) = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,1 & 0,1 \\ 0,05 & 0,9 & 0 \\ 0,05 & 0 & 0,9 \end{bmatrix}.$$

Моделирование проведено для сценариев из стандарта Евроконтроля (Приложение Е, таблица 4Б) [1]. ВС наблюдается при помощи одной аэродромной вторичной РЛС кругового обзора. Период обзора – 4 с, СКО по дальности – 70 м, по азимуту – 0,08°. ВС движется со скоростью 155 м/с, первые 400 с (100 периодов обзора) движение происходит прямолинейно и равномерно, вторые 400 с – по окружности с тангенциальным ускорением 4 м/с² или прямолинейно с продольным ускорением 1 м/с². Смена типа движения происходит на расстоянии 150000 м относительно РЛС. При этом курс ВС относительно линии визирования равен 45°, поэтому радиальная и тангенциальная составляющие вектора скорости при прямолинейном движении приблизительно равны. Проверяются характеристики исследуемых алгоритмов для всех трех типов движения и при переходах между ними.

На рис. 1–4 приведены результаты моделирования для первого сценария, прямолинейное равномерное движение переходит в стандартный поворот. На рис. 5–8 даны результаты для второго сценария, прямолинейное равномерное движение переходит в прямолинейное движение с изменением скорости. Рис. 1, 5 демонстрируют зависимость СКО от числа обзоров по координате вдоль движения ВС (м), рис. 2, 6 – по координате поперек движения ВС (м), рис. 3, 7 – по скорости движения ВС (м/с), рис. 4, 8 – по курсу движения ВС (град).

СКО включает как динамическую, так и случайную составляющие. Оценки СКО получены в результате усреднения по 1000 реализаций.

Анализ результатов моделирования показывает, что при движении ВС прямолинейно равномерно наилучшие результаты в установившемся режиме показал фильтр ММА2-4-3, далее следуют ММА2-4-2, ММА2-4-1. Таким образом, переход на алгоритм объединения гипотез (5) позволяет уменьшить влияние гипотез, настроенных на типы движения (связанные с маневрированием ВС), на параметры основной гипотезы, соответствующей прямолинейному равномерному движению. Аналогичные результаты наблюдаются при движении ВС по кругу (стандартный поворот).

При движении ВС прямолинейно с изменением скорости наилучшие результаты в установившемся режиме у фильтра ММА2-4-1, далее следуют ММА2-4-2, ММА2-4-3. При этом типе маневра ВС алгоритм объединения гипотез (4) оказывается более предпочтительным.

Таким образом, на примере задачи оценивания координат и параметров движения ВС по информации на выходе радиолокационных средств наблюдения системы организации воздушного движения гражданской авиации рассмотрено применение многомодельного подхода к построению алгоритмов траекторной обработки. Проведено сравнение характеристик ряда многомодельных алгоритмов проведения моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas [Electronical Resource]. URL: <http://www.intersoft-electronics.com/Downloads/EUROCONTROL/SURVSTD.pdf> (дата обращения: 20.02.2017).
2. Yaakov Bar-Shalom, X. Rong Li, Thiagalingam Kirubarajan. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. N.Y: John Wiley&Sons Inc., 2001. 584 p.
3. Бакулев П.А., Сычев М.И., Нгуен Чонг Лыу. Многомодельный алгоритм сопровождения траектории маневрирующей цели по данным обзорной РЛС // Радиотехника. 2004. № 1. С. 26–32.
4. Сычев М.И., Фесенко С.В. Исследование многомодельных алгоритмов сопровождения воздушных судов по информации от радиолокационных средств наблюдения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14. № 2. С. 10–18.
5. Сычев М.И., Фесенко С.В. Оценивание координат и параметров движения воздушных судов по информации от радиолокационных средств наблюдения [Электронный ресурс] // Тр. МАИ. 2015. № 83. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62280>, 05.10.2015 (дата обращения: 20.02.2017).

6. Сычев М.И. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе упрощенных много-модельных фильтров // Электросвязь. 2016. № 10. С. 32–37.
7. Сычев М.И. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельной фильтрации [Электронный ресурс] // Тр. МАИ. 2016. № 90. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=74830> (дата обращения: 18.11.2016).
8. Моисеев В.С., Абсалямов М.Н., Хакимуллина А.Р. Оптимизация траекторий летательного аппарата, выполняющего контроль наземной обстановки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2001. № 1. С. 16–21.

Поступила в редакцию 28.02.17

Precision Tracking Algorithms of Civil Aircraft by Radar Information

M.I. SYCHEV

The problem of radar tracking of air traffic management by multiple model algorithms is discussed. Three types of multiple model algorithms are described. The various types of hypotheses combining algorithms are discussed. The simulation results are presented.

Radar, tracking, multiple model filter