

УДК 629.7.014.18

Мишарин И.В.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПИЛОТАЖНОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Национальный авиационный университет

Разработана математическая модель беспилотного летательного аппарата как тела переменной массы с твердой оболочкой. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов совместной обработки пилотажной и навигационной информации, источником которой являются автономные бортовые датчики и внешние навигационные системы. Исследовано влияние старения информации на результирующую точность оценивания координат и параметров движения летательного аппарата.

Постановка задачи

При определении координат беспилотного летательного аппарата (БПЛА) используются данные от нескольких источников. Благодаря этому, во-первых, уменьшается результирующая погрешность измерения, во-вторых, повышается надежность. Рассмотрим комплексную пилотажнонавигационную систему, в состав которой входят инерциальная навигационная система (ИНС) и корреляционно-экстремальная система навигации (КЭСН). По результатам работы КЭСН (обнаружение характерных ориентиров и оценивание их координат) осуществляется коррекция состояния ИНС [1]. Кроме того, могут использоваться дополнительные источники пилотажной и навигационной информации, например, радиотехническая система ближней навигации.

При такой совместной обработке информации важно выработать алгоритм, при котором ошибка результирующего измерения по возможности была бы минимальна. На первый взгляд, при совместной обработке сигнала от нескольких измерителей просматривается закономерность, что чем больше источников навигационной информации используется при оценке координат самолета, тем выше точность этой оценки. Однако это не всегда так. Во-первых, измерители могут иметь разные точностные характеристики. Тогда использование данных от источника с наибольшей погрешностью только ухудшает точность результирующей

оценки. Во-вторых, измерители могут иметь различные периоды обновления информации. Это означает, что если оценивание координат с использованием данных от датчика с наибольшим периодом обновления происходит в тот момент, когда эти данные уже существенно устарели, точность этой оценки также заметно ухудшится. В-третьих, источники информации могут быть синхронизированы между собой (данные от разных измерителей поступают на вход фильтра одновременно) и не синхронизированы – моменты съема данных являются случайными [2]. В этом случае выражения для ковариационной матрицы и матрицы весовых коэффициентов невозможно получить в форме конечных решений соответствующих дифференциальных уравнений. Следовательно, для обработки данных от синхронизированных и несинхронизированных источников необходимо применять разные алгоритмы оценки.

Кроме этого, играет важную роль, движется ли наблюдаемый объект равномерно и прямолинейно (неманеврирующая цель) или же, напротив, совершает какой-то маневр. Если БПЛА находится в режиме установившегося полета, его траектория более предсказуема, поэтому нет необходимости сильно усложнять алгоритм обработки координатной информации. Это особенно характерно для режима полета по маршруту в рабочую зону. В рабочей зоне БПЛА совершает маневры (чаще в горизонтальной плоскости). Со-

ответственно, алгоритм обработки динамической информации будет другим. Возникает вопрос, каким должен быть алгоритм обработки координатной информации, получаемой от нескольких источников с разными точностными характеристиками, периодами обновления, а также степенью синхронизации. Нахождение оптимальных алгоритмов для каждого конкретного случая, а также алгоритма для общего случая является задачей исследования.

Описание модели

В общем случае летательный аппарат (ЛА) представляет собой тело с твердой оболочкой и перемещающимся относительно его корпуса центром масс. Однако в большинстве задач аэромеханики влиянием кориолисовых и вариационных сил и моментов, связанных с движением масс топлива и газа внутри ЛА, особенно на дозвуковых скоростях, можно пренебречь [3]. Поэтому уравнение движения центра масс ЛА (в инерциальной системе отсчета) в упрощенном виде записывается так:

$$m \frac{d\bar{V}_0}{dt} = \bar{P} + \bar{g}_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где m - масса ЛА; \bar{V}_0 - абсолютная скорость его центра масс; \bar{P} - вектор тяги двигателей относительно центра масс; $\bar{g}_{\text{вн}}$ - вектор внешних сил, не связанных с работой двигательной установки.

На основе этого выражения моделируется наблюдаемый объект - беспилот-

ный ЛА (БПЛА), за которым производится наблюдение.

Если охарактеризовать движение объекта вектором состояния $\bar{x}(t)$, компонентами которого являются три координаты местоположения в прямоугольной системе координат и три составляющие скорости объекта, то уравнение движения наблюдаемой системы примет такой вид:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \mathbf{F}\bar{x}(t) + \bar{g}(t), \quad (2)$$

где $\bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1 & \dot{x}_1 & x_2 & \dot{x}_2 & x_3 & \dot{x}_3 \end{bmatrix}^T$ - вектор состояния; \mathbf{F} - матрица размерностью (6×6) , где помимо нулевых элементов имеется три ненулевых и равных единице; $\bar{g}_{\text{вн}}$ - вектор внешних возмущений, в результате воздействия которых наблюдаемый объект отклоняется от заданной траектории движения. Аналогом вектора внешних возмущений в выражении (1) является вектор внешних сил $\bar{g}_{\text{вн}}$. К источникам таких сил можно отнести порывы ветра, воздушные течения, различные турбулентности атмосферы. При моделировании внешние возмущения представляются случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и заданной корреляционной функцией. Реальные корреляционные функции возмущающих потоков воздуха чаще всего аппроксимируются функцией вида [4,5]

$$B(\tau) = a^2 \frac{1}{2^{v-1} \Gamma(v)} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^v K_v \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) \left[B(0) = a^2 \right], \quad (3)$$

и соответствующей ей спектральной плотностью

$$W(\omega) = A \frac{a^2 \tau_0}{(1 + \omega^2 \tau_0^2)^{v+1/2}}, \quad (4)$$

где $\Gamma(v)$ - неполная гамма-функция;

$K_v \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)$ - функция Бесселя v -го порядка от мнимого аргумента (функция Макдональда). Функция Макдональда может быть рассчитана по следующей формуле [6]:

$$K(x) = \frac{\sqrt{\pi}(x/2)^{\nu}}{\Gamma(\nu+1/2)} \int_1^x e^{-t} (t^2-1)^{\nu-1/2} dt \quad (5)$$

Корреляционная функция вида (3) была предложена Карманом для аппроксимации корреляционных функций процессов, возникающих при развитии турбулентности в атмосфере.

На рис. 1 изображены графики корреляционных функций Кармана для различных значений ν . Графики были рассчитаны с использованием выражения (3) путем численного интегрирования функции Макдональда по формуле (5).

Судя по результатам расчетов, данная корреляционная функция при малых значениях ν близка к экспоненциальной, а при больших – к Гауссовской.

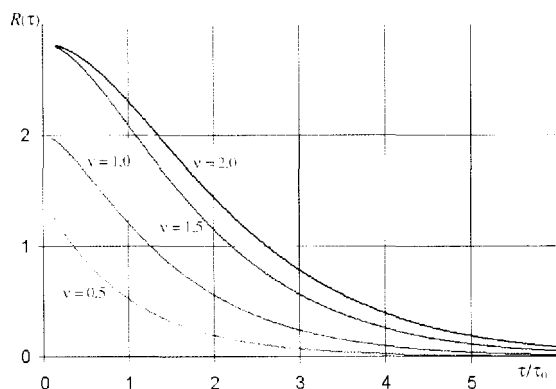


Рис. 1.

Рассмотрим полет БПЛА с маневрированием в горизонтальной плоскости. Тогда размерность вектора состояния и матрицы \mathbf{F} уменьшается до четырех. Для уравнения наблюдения (2) запишем дискретизованное уравнение для экстраполированной оценки вектора состояния:

$$\vec{x}_{k+1} = \Phi(k+1, k) \vec{x}_k + \vec{g}_{\text{вн}k}, \quad (6)$$

где переходная матрица

$$\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

T – интервал дискретизации.

Запишем уравнение (6) в матричной форме из которого можно получить выражения для каждой из координат:

$$\begin{aligned} x_{k+1,1} &= V_{xk1} T + g_{\text{вн}k1}, \\ x_{k+1,2} &= V_{xk2} T + g_{\text{вн}k2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где V_{xk1}, V_{xk2} – проекции вектора скорости БПЛА на оси координат.

Запишем соответствующее уравнение наблюдения:

$$\vec{y}_k = \mathbf{E} \vec{x}_k + \vec{\xi}_k, \quad (9)$$

где \vec{y}_k – вектор наблюдения, в котором содержатся данные измерений;

\mathbf{E} – единичная матрица;

$\vec{\xi}_k$ – вектор шумов и ошибок измерений:

$$\vec{\xi}_k = \begin{bmatrix} \xi_{k1} & \dot{\xi}_{k1} & \xi_{k2} & \dot{\xi}_{k2} \end{bmatrix}^T$$

Уравнения для координат наблюдаемого объекта по аналогии с (8) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{k1} &= y_{k1} + \xi_{k1}, \\ \tilde{y}_{k2} &= y_{k2} + \xi_{k2}, \end{aligned} \quad (10)$$

а уравнение экстраполяции наблюдаемого вектора состояния –

$$\hat{x}_{k+1}^* = \Phi(k+1, k) \hat{x}_k, \quad (11)$$

где \hat{x}_{k+1}^* – экстраполированная оценка наблюдаемого вектора состояния; \hat{x}_k – уточненная оценка вектора состояния, полученная на предыдущем шаге работы фильтра. Переходная матрица имеет тот же вид, что и матрица в уравнении (6).

Уточненная оценка наблюдаемой координаты определяется из уравнения коррекции:

$$\hat{x}_k = x_k^{**} + \mathbf{W}_k \left[\bar{y}_k - \mathbf{H}x_k^{**} \right], \quad (12)$$

где \mathbf{W}_k – весовой вектор, рассчитываемый на каждом шаге работы фильтра непосредственно перед определением уточненной оценки; $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$. Для упрощения алгоритма работы фильтра часто используют весовые векторы с постоянными коэффициентами, которые представляют собой координату, ее первую и вторую производные – так называемый α - β - γ фильтр [7,8] или даже только координату и ее первую производную (α - β

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{\dot{x}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^* \\ \dot{x}_k^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2(2k+1)}{(k+1)(k+2)} \\ \frac{6}{T(k+1)(k+2)} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \bar{y}_k \\ \dot{\bar{y}}_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^* \\ \dot{x}_k^* \end{bmatrix} \right). \quad (13)$$

Тогда окончательное выражение для уточненной оценки координаты имеет вид:

$$\hat{x}_k = x_k^* + \frac{2(2k+1)}{(k+1)(k+2)} (x_k - x_k^*). \quad (14)$$

В соответствии с поставленной задачей измерения координат и параметров движения объекта проводятся двумя измерителями, которые по определению являются независимыми. Обозначим компоненты уточненной оценки координаты на выходе измерителей через \hat{x}_{k1} и \hat{x}_{k2} . Пусть среднеквадратические ошибки измерения координаты измерителями равны σ_1 и σ_2 соответственно. Тогда взвешенное значение результирующей уточненной оценки $\hat{x}_{k\text{ш}} = c_1 \hat{x}_{k1} + c_2 \hat{x}_{k2}$,

где

$$c_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2},$$

$$c_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2}.$$

фильтр). В последнем случае.

$$\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} \frac{2(2k+1)}{(k+1)(k+2)} \\ \frac{6}{T(k+1)(k+2)} \end{bmatrix}.$$

Запишем матричное уравнение коррекции координаты и скорости ее изменения для случая применения алгоритма α - β фильтра:

Результаты моделирования

Для моделирования использовались уравнения (8 – 14), конкретизированные для рассматриваемой комплексной навигационной системы, и модель внешних возмущений, описываемая выражениями (3 – 5).

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования процессов измерений с помощью ИНС с периодической коррекцией в некоторых пунктах маршрута, и с помощью КЭСН соответственно. Совместная обработка результатов отдельных измерителей не выполняется. Считается, что средний период измерений с помощью КЭСН на порядок меньше, чем период коррекции ИНС. Период дискретизации фильтров одинаков и равен одной пятой периода коррекции ИНС.

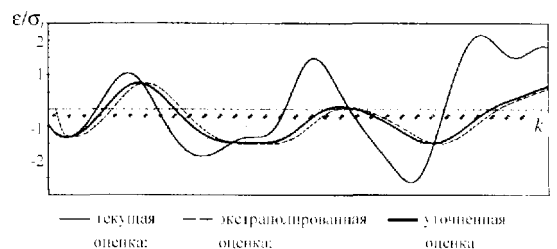


Рис. 2. Измерение с помощью ИНС. Здесь и далее σ_i – среднеквадратическая ошибка измерения; ε/σ_i – относительная текущая ошибка оценки.

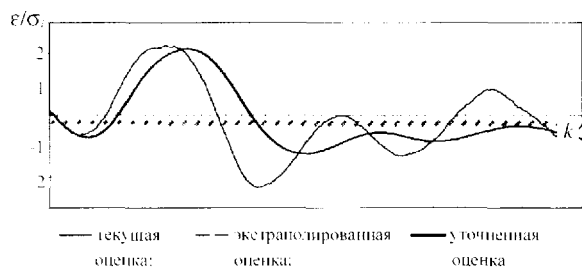


Рис. 3. Измерение с помощью КЭСН

Результаты моделирования процесса измерения координат ЛА с использованием алгоритма с непрерывным оцениванием представлены на рис.4. Здесь σ_i – среднеквадратическая ошибка измерения i -го измерителя.

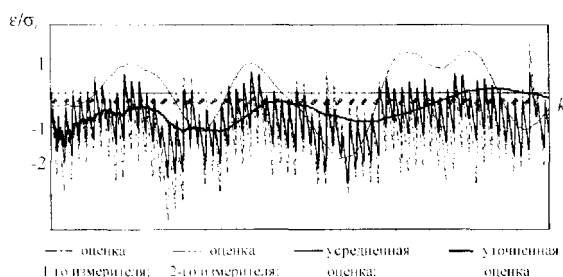


Рис. 4. Совместная обработка с непрерывным оцениванием. Если на текущем шаге измерений данные от источника не поступили, для оценки используются старые данные от этого источника

Как видно из результатов моделирования, при непрерывном оценивании данные, поступающие на вход фильтра от первого источника, а следовательно, и усредненное значение вектора измерений, подвергаются воздействию такого явления, как *старение информации*. Это обусловлено тем, что в перерывах между моментами съема данных с первого источника фильтр для нахождения усредненного значения вектора измерения использует данные предыдущего (последнего) измерения этого источника. По мере удаления от точки, в которой произошло упомянутое последнее измерение, различие между измеренным значением и реальным местоположением ЛА, т.е. ошибка измерения, с каждым шагом возрастает. Как только на вход фильтра поступают свежие данные от первого источника, уровень ошибки измерения этого источника резко падает. Вместе с этим падает уровень усредненной ошибки, поскольку уменьшается составляющая, вно-

симая первым источником. Этим объясняется пилообразная форма графиков ошибки измерения первого источника, а также усредненной ошибки измерения, представленных на рис. 4.

Тот факт, что при расчете экстраполированной и уточненной оценок фильтра используются устаревшие данные первого источника, оказывает довольно негативное влияние на работу фильтра в целом. Как свидетельствуют данные рис. 4, точность результирующей уточненной оценки фильтра оказалась хуже исходной точности первого источника измерений (рис. 2). Другими словами, дополнительный источник с более высокой частотой обновления информации, но меньшей точностью по сравнению с основным источником иногда даже ухудшает общий результат.

К достоинствам данного алгоритма относится простота реализации. Основным недостатком алгоритма является низкая точность совместного оценивания, объясняемая воздействием на данные более медленного источника измерений старения информации. Чтобы избежать нежелательного влияния на результаты оценивания старения информации, необходимо модифицировать алгоритм обработки поступающих от измерителей данных. Одним из путей, ведущих к уменьшению воздействия процесса старения информации, является более точный подбор весовых коэффициентов, определяющих вклад составляющей каждого из источников при определении итогового значения вектора измерений. Например, можно усложнить весовые коэффициенты, добавив в качестве дополнительного показателя достоверности измерения интервал между наблюдениями.

Чем больше этот показатель у источника получаемой информации, тем в большей степени его данные подвергаются влиянию процесса старения; следовательно, эти данные необходимо рассматривать как менее достоверные. Отсюда вытекает, что весовой коэффициент должен быть обратно пропорционален периоду коррекции (интервалу между наблюдениями $T_{\text{наб}i}$):

$$c_{1T} = \frac{\sigma_2 T_{\text{наб.12}}}{\sigma_1 + \sigma_2};$$

$$c_{2T} = \frac{\sigma_1 T_{\text{наб.1}}}{\sigma_1 + \sigma_2}.$$

Результаты такого усовершенствования алгоритма приведены на рис. 5. Как видно из графиков, усложнение процедуры расчета весовых коэффициентов приводит к тому, что при определении итогового значения вектора измерений предпочтение отдается источнику, обладающему большей частотой обновления информации, хотя и меньшей точностью. Благодаря этому, в сравнении с предыдущим экспериментом (рис. 4), заметно уменьшается воздействие процесса старения информации на результирующую ошибку, однако характеристики первого измерителя, обладающего относительно высокой точностью (рис. 2), при совместной обработке информации по-прежнему несколько ухудшаются.

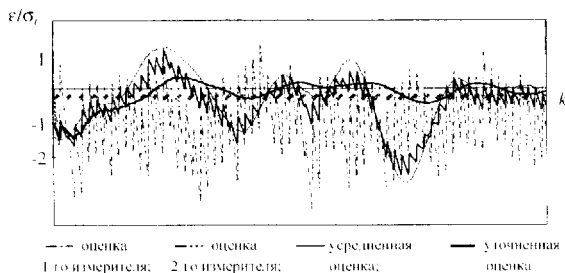


Рис. 5. Совместная обработка с непрерывным оцениванием. Если на текущем шаге измерений данные от источника не поступили, для оценки используются старые данные от этого источника, но их вес уменьшается

Чтобы полнее использовать имеющиеся в наличии измерители, внесем в алгоритм обработки некоторые изменения. Как уже отмечалось выше, старение информации возникает из-за того, что в перерывах между поступлениями данных от источника с большим периодом обзора, для определения усредненного значения вектора измерений фильтр использует данные последнего измерения, сделанного этим источником. За это время второй источник успевает сделать несколько новых измерений, при этом каждый раз в

соответствии с алгоритмом фильтр производит оценивание, как если бы на его вход поступили данные от обоих источников.

Если совместное оценивание осуществлять не на каждом шаге работы фильтра, а только на тех из них, когда на входе фильтра оказываются данные от источника, обладающего большим периодом обзора, практически полностью удастся избежать влияния процесса старения информации. Таким образом, на входе фильтра должна выполняться проверка, от каких источников информации поступили данные на текущем такте работы фильтра. В зависимости от этого фильтром либо будет производиться совместная обработка данных с взвешиванием, либо будут использованы данные только одного, более точного из источников. Если на входе фильтра оказываются данные только от второго источника измерения, обладающего заведомо меньшей точностью, то эти данные отбрасываются, и оценивание на текущем такте не производится. Фактически это приводит к увеличению длительности такта работы фильтра до периода обзора более точного источника. Результаты работы такого алгоритма приведены на рис. 6.

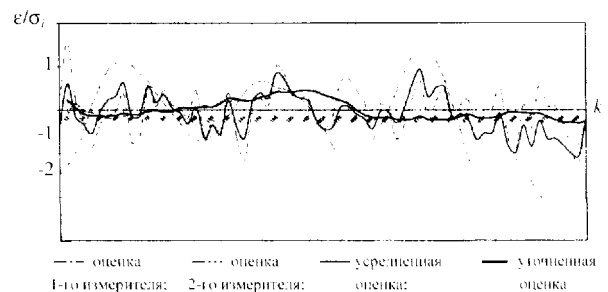


Рис. 6. Совместная обработка с непериодическим оцениванием. Для оценки используются только свежие данные от обоих источников совместно или от одного источника

Выводы

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод, что наиболее высокие результаты совместной обработки динамической информации были получены при использовании алгоритма с непериодическим оцениванием по мере поступления данных (рис. 6). Среднеквадратическая ошибка уточненной оценки в данном случае оказалось меньше анало-

гичных показателей, когда оценивалось самостоятельное функционирование каждого из источников в отдельности (рис. 1 и 2). Это достигнуто за счет того, что при определении среднего значения вектора измерений основной упор делался на данные более точного источника, второй же источник измерений, обладающий меньшей точностью, хотя и большей частотой обновления, использовался как вспомогательный. Именно использование этого дополнительного измерителя позволило повысить первоначальную точность основного источника измерений.

Следует отметить, что при использовании алгоритма с оцениванием по мере поступления данных практически полностью исключается влияние фактора старения информации. Поскольку обработка полученной информации происходит в момент поступления данных от первого источника, старение информации может распространяться только на данные второго измерителя. Максимальная величина погрешности, обусловленной старением информации, в этом случае будет ограничиваться периодом измерений второго измерителя. Этот период в несколько раз меньше, чем у первого измерителя.

Список литературы

1. *Баклицкий В.К., Юрьев А.Н.* Корреляционно-экстремальные методы навигации. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
2. *Суордер Д.Д.* Управление системами при резких изменениях условий // ТИИЭР.–Т. 64.– 1976.– № 8.– С. 117-126.
3. *Котик М.Г., Павлов А.В., Пашиковский И.М., Щитаев Н.Г.* Летные испытания самолетов. – М.: Машиностроение. – 1962. – 420 с.
4. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
5. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – Т.2. – М.: Мир. – 1981.– 317 с.
6. Справочник по специальным функциям / Под ред. *М. Абрамовица и И. Стиган* / Пер. с англ. под ред. *В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной.* – М.: Наука. – 1979. – 832 с.

7. *Wishner R.P., Larson R.E., Atans M.* – In: Proceedings Symposium on Nonlinear Estimation Theory and its Applications. – San Diego, CA.– 1970.– Sept. – P. 32 – 54.

8. *Пузырев В.А., Гостюхина М.А.* Алгоритмы оценивания параметров движения летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – №4. – С. 3 – 25.