

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕДУЦИРОВАННЫХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНОВСКОГО ТИПА С ГАРАНТИРОВАННЫМ КАЧЕСТВОМ ОЦЕНИВАНИЯ

Проводится сравнение двух методов построения редуцированного фильтра калмановского типа с гарантированным качеством оценивания. Их отличительная особенность заключается в том, что матрица, рассчитываемая в ковариационном канале синтезированного субоптимального фильтра, больше либо равна действительной ковариационной матрице. В первом методе гарантированное оценивание достигается за счет увеличения шумов возмущений, а во втором – за счет двух факторов: увеличения шумов возмущений и изменения матрицы динамики, что позволяет повысить действительную точность фильтрации при решении ряда практических задач.

Введение

Для высокоточных систем навигации подвижных объектов, в частности надводных кораблей и подводных лодок, важнейшее значение имеет проблема совершенствования методов определения навигационных параметров: координат, скорости, курса, углов ориентации. Наиболее подходящая основа для разработки таких методов – это методы оптимальной калмановской фильтрации. Их несомненное преимущество – в возможности получения навигационных параметров с высокой точностью, а также простота реализации рекуррентных процедур, используемых при их выработке. Кроме того, крайне важно для навигационных приложений то, что наряду с оценками навигационных параметров в ковариационном канале фильтра Калмана (ФК) рассчитывается ковариационная матрица ошибок оценок, рассматриваемая как мера их точности. Следует, однако, отметить, что при выработке навигационных параметров с использованием средств инерциальной навигации размерность таких фильтров становится весь-

Тупысев Виктор Авенирович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Литвиненко Юлия Александровна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ма высокой из-за естественного желания максимально точно описать ошибки инерциальных навигационных систем. Это, в свою очередь, приводит к тому, что такие фильтры становятся чувствительными к вычислительным ошибкам и их реализация и отладка оказываются весьма затруднительными, особенно при ограниченных возможностях вычислительных средств, включенных в состав навигационных комплексов.

В связи с этим альтернативой методам оптимальной калмановской фильтрации является использование субоптимальных редуцированных фильтров калмановского типа (РФКТ). Вектор состояния оцениваемых сигналов для этих фильтров меньше вектора состояния оптимального фильтра Калмана, в частности, за счет исключения части составляющих, которые описывают действующие на систему небелозумные возмущения.

При этом исходя из требований навигационной практики желательно настроить редуцированные фильтры таким образом, чтобы матрица, рассчитываемая в ковариационном канале этого фильтра, была больше либо равна действительной ковариационной матрице ошибок оценок навигационных параметров для любого момента времени. Это позволяет рассматривать такую матрицу как гарантированную меру точности оценки навигационных параметров. Очевидно, что при выборе типа и структуры редуцированного фильтра кроме определения гарантирующей оценки точности полезна минимизация этой гарантирующей оценки.

Заметим, что синтез редуцированных фильтров – весьма актуальная задача, что подтверждается большим количеством публикаций [1–13].

Среди известных авторов данной статьи можно выделить два метода синтеза редуцированных фильтров. В первом методе для выбора параметров редуцированного фильтра используется расчетная модель с вектором состояния меньшей размерности, являющаяся аппроксимацией реального поведения динамической системы. Такой подход приводит, как правило, к абстрактным системам дифференциальных уравнений, что затрудняет их использование в замкнутых схемах коррекции [1].

Второй метод сводится к синтезу редуцированного фильтра с использованием полной модели, описывающей поведение динамической системы. При этом параметры редуцированного фильтра определяются в результате, например, решения задачи минимизации следа действительной ковариационной матрицы [3–7]. Следует также отметить, что при использовании первого метода синтеза редуцированного фильтра возникает проблема оценки качества оценивания.

В рамках второго метода предложены различные вычислительные процедуры для решения задачи минимизации следа действительной ковариационной матрицы ошибки оценки [8–10]. Однако реализация этих процедур связана со значительным объемом вычислений, который, как правило, превышает объем вычислений, необходимых для реализации оптимального фильтра Калмана. Последнее обстоятельство существенно снижает практическую ценность такого метода.

В [1] предложен алгоритм синтеза дискретного редуцированного фильтра, в котором на каждом шаге рассчитывается действительная ковариационная матрица субоптимальной оценки, однако расчет этой матрицы также требует проведения большого объема вычислений.

В [11, 12] рассмотрен синтез редуцированного фильтра, настройка которого проводится таким образом, чтобы действительная ковариационная матрица ошибки субоптимальной оценки была меньше либо равна матрице, рассчитан-

ной в ковариационном канале фильтра. Такой фильтр в этих работах назван фильтром с гарантированным качеством оценивания. Отметим, что подход к синтезу фильтров, обладающих аналогичным свойством, используется и при решении других задач субоптимального оценивания. Так, в [13] рассматривается синтез фильтра Калмана в условиях неопределенности параметров модели, при этом в качестве гарантирующего фильтра предлагается минимаксный фильтр.

В настоящей статье проводится сравнение метода синтеза редуцированных фильтров, предложенного в [11,12], где гарантированное оценивание достигается только за счет увеличения матрицы шумов возмущений, с методом, в котором гарантированное качество оценивания обеспечивается за счет как увеличения матрицы шумов возмущений, так и изменения матрицы динамики в уравнении Риккати.

1. Постановка задачи синтеза редуцированного фильтра

Решение проблемы синтеза редуцированного фильтра, обеспечивающего гарантированное качество оценивания, будем рассматривать в постановке, используемой в [12]. Предполагается, что вектор состояния, включающий два подвектора $X(t) = [X_0^T(t), X_1^T(t)]^T$, и процесс измерений описываются уравнениями:

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \dot{X}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 & F_2 \\ 0 & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_0 \\ \xi_1 \end{bmatrix} = F(t)X(t) + \xi(t), \quad (1)$$

$$Y(t) = H_0(t)X_0(t) + v(t) = H(t)X(t) + v(t), \quad (2)$$

в которых подвектор $X_0(t)$ описывает поведение подлежащих оцениванию компонент вектора состояния динамической системы, а $X_1(t)$ – вектор состояния формирующих фильтров, используемых для описания небелозумных возмущений (при синтезе редуцированного фильтра он исключается из вектора состояния X).

Также предполагается, что $\xi_0(t)$, $\xi_1(t)$ – векторы центрированных гауссовских белых шумов с матрицами интенсивностей Q_0 и Q_1 соответственно; v – вектор ошибок измерений, описываемых центрированными гауссовскими белыми шумами, с матрицей интенсивностей R . Векторы $\xi_0(t)$ и $\xi_1(t)$ не коррелированы с вектором v . Матрицы F и H могут быть нестационарными.

В задаче (1), (2) интерес представляет оценка $X_0(t)$.

В рамках рассматриваемой работы задача синтеза фильтра с гарантированным качеством оценивания формулируется как задача синтеза фильтра вида:

$$\dot{\hat{X}}_0^* = F_0^* \hat{X}_0^* + K_0^*(Z - H_0^* \hat{X}_0^*); \quad (3)$$

$$K_0^* = P^* H_0^{*T} R^{-1}; \quad (4)$$

$$\dot{P}^* = F^* P^* + F^{*T} P^{*T} - P^* H_0^{*T} R^{-1} H_0^* P^* + Q_0^* + S_0^*, \quad (5)$$

в котором требуется найти такие параметры $F^*, S_0^*, P^*(0)$, при которых для любого t выполняется неравенство $P^*(t) \geq D_0(t)$, где $D_0(t)$ – ковариационная

матрица ошибки $e_0(t) = X_0(t) - \hat{X}_0(t)$ субоптимальной оценки $\hat{X}_0(t)$, называемая далее действительной ковариационной матрицей.

Особенность сформулированной постановки по сравнению с приведенной в [12] заключается в возможности использования в уравнении (5) матрицы $F^*(t) \neq F_0(t)$, которая ранее принималась равной $F_0(t)$.

Следует отметить, что рассматриваемая в настоящей работе постановка задачи носит частный характер и не позволяет указать общие правила выбора структуры редуцированного фильтра, основанного на использовании соответствующей редукции полной модели и имеющего многовариантный характер. Разработка соответствующего метода редуцирования представляет собой возможное направление дальнейших исследований, предусматривающих в том числе, решение задачи обеспечения минимизации гарантированной точности редуцированного фильтра.

2. Особенности рассматриваемых методов синтеза редуцированных фильтров с гарантированным качеством оценивания

Чтобы провести сравнительный анализ двух методов построения фильтров, напомним, что суть метода, рассмотренного в [12], заключалась во введении вспомогательного уравнения

$$\begin{vmatrix} \dot{D}_0^* & \dot{D}_2^* \\ \dot{D}_2^{*T} & \dot{D}_1^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tilde{F}_0 & F_2 \\ 0 & F_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} D_0^* & D_2^* \\ D_2^{*T} & D_1^* \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_0^* & D_2^* \\ D_2^{*T} & D_1^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tilde{F}_0^T & 0 \\ F_2^T & F_1^T \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_0 R K_0^T & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} Q_0 & 0 \\ 0 & Q_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} S_0 & S_2 \\ S_2^T & S_1 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $\tilde{F}_0 = F_0 - K_0 H_0$. Решение этого уравнения являлось оценкой сверху для действительной ковариационной матрицы $D(t)$ вектора состояния $X_p = [e_0^T, X_1^T]^T$, описываемой уравнением

$$\begin{vmatrix} \dot{D}_0 & \dot{D}_2 \\ \dot{D}_2^T & \dot{D}_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tilde{F}_0 & F_2 \\ 0 & F_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} D_0 & D_2 \\ D_2^T & D_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_0 & D_2 \\ D_2^T & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tilde{F}_0^T & 0 \\ F_2^T & F_1^T \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_0 R K_0^T & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} Q_0 & 0 \\ 0 & Q_1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

в котором блок $D_0(t)$ соответствует вектору $X_0(t)$.

Из этого уравнения могут быть получены следующие выражения для блоков $D_0(t), D_1(t), D_2(t)$, действительной ковариационной матрицы $D(t)$:

$$\dot{D}_0 = \tilde{F}_0 D_0 + D_0 \tilde{F}_0^T + F_2 D_2^T + D_2 F_2^T + K_0 R K_0^T + Q_0; \quad (8)$$

$$\dot{D}_2 = \tilde{F}_0 D_2 + D_2 F_1^T + F_2 D_1; \quad (9)$$

$$\dot{D}_1 = F_1 D_1 + D_1 F_1^T + Q_1. \quad (10)$$

Выполнение неравенства $D^*(t) \geq D(t)$ и, как следствие, неравенства $D_0^*(t) \geq D_0(t)$ для ошибки оценки $e_0(t) = X_0 - \hat{X}_0$ обеспечивалось в [12] наличием в правой части (6) положительно полуопределенной матрицы $S(t)$ и начальными условиями $D^*(0) \geq D(0)$. При этом блок матрицы $S_2(t)$ выбирался таким образом, чтобы обеспечить равенство нулю блока $D_2^*(t)$. В рамках такого варианта синтеза было показано, что гарантированное оценивание вектора состояния $X_0(t)$ может быть обеспечено использованием редуцированного фильтра

(3)–(5) с параметрами $F^*(t) = F_0(t)$ $S_0 = F_2 D_1^* S_1^{-1} D_1^* F_2^T$. Заметим, что равенство $D_2^*(t) = 0$ фактически означает аппроксимацию действительной ковариационной матрицы ошибки оценки $D(t)$ с ненулевыми блоками $D_2(t)$ блочно-диагональной матрицей $D^*(t)$. Подчеркнем, что при значениях $D_2(t)$, существенно отличных от нуля (а это имеет место, если возмущения описываются корреляционными функциями с большими интервалами корреляции), такая аппроксимация достаточно грубая и приводит к загроблению гарантированной точности фильтра.

Для устранения этого недостатка в рамках настоящей статьи рассматривается метод синтеза РФКТ с выбором вспомогательного уравнения, учитывающего, что блоки действительной ковариационной матрицы $D_2(t)$ не равны нулю.

Суть этого метода заключается в представлении ковариационного уравнения (7) для блока $D_0(t)$ в виде

$$\begin{aligned} \dot{D}_0 = & (\tilde{F}_0 + \frac{\varepsilon}{2} E) D_0 + D_0 (\tilde{F}_0 + \frac{\varepsilon}{2} E)^T - \left(\left| \sqrt{\varepsilon} E \right| - \frac{F_2}{\sqrt{\varepsilon}} \left| \begin{array}{c|c} D_0 & D_2 \\ \hline D_2^T & D_1 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \sqrt{\varepsilon} E \\ -\frac{F_2^T}{\sqrt{\varepsilon}} \end{array} \right| \right) + \\ & + \frac{F_2 D_1 F_2^T}{\varepsilon} + K_0 R K_0^T + Q_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где E – единичная матрица, $\varepsilon > 0$ – скалярный параметр. Нетрудно показать, что правая часть (11) будет совпадать с правой частью (8) после выполнения соответствующих алгебраических преобразований. Отметим, что размерность параметра ε – [1/с], которая совпадает с размерностью диагональных элементов матрицы F .

Так как ковариационная матрица $D(t) = \begin{vmatrix} D_0 & D_2 \\ D_2 & D_1 \end{vmatrix}$ является положительно определенной, то очевидно, что в качестве вспомогательного уравнения, используемого для синтеза редуцированного фильтра с гарантированным качеством оценивания может быть выбрано уравнение

$$\dot{D}_0^* = (\tilde{F}_0 + \frac{\varepsilon}{2} E) D_0^* + D_0^* (\tilde{F}_0 + \frac{\varepsilon}{2} E)^T + \frac{1}{\varepsilon} F_2 D_1 F_2^T + K_0 R K_0^T + Q_0, \quad (12)$$

так как при этом будет выполняться неравенство $D_0^*(t) \geq D_0(t)$.

Использование вспомогательного уравнения (12) приводит, в свою очередь, к синтезу РФКТ с гарантированным качеством оценивания, где для расчета коэффициента фильтра (4) используется уравнение Риккати (5) с параметрами

$$F^*(t) = F_0(t) + \frac{\varepsilon}{2} E \text{ и } S_0(t) = \frac{1}{\varepsilon} F_2 D_1 F_2^T.$$

Отметим, что гарантированное оценивание обеспечивается при любом $\varepsilon > 0$. В отличие от первого варианта, где гарантированная точность достигается только за счет введения матрицы дополнительных шумов S_0 возмущений, в данном случае такое оценивание обеспечивается как за счет матрицы дополнительных шумов возмущений, имеющих вид $S_0 = \frac{F_2 D_1 F_2^T}{\varepsilon}$, так и за счет применения в

уравнении (5) матрицы динамики $F^*(t) = F_0(t) + \frac{\varepsilon}{2} E$.

При использовании обоих методов целесообразно принять меры по минимизации гарантированной точности редуцированных фильтров, как показано далее при рассмотрении конкретных примеров.

3. Результаты моделирования

С учетом того что редуцированные фильтры являются по своей сути субоптимальными, проведем сравнительный анализ этих фильтров и оптимального ФК для двух примеров.

Пример 1.

В качестве методического примера рассмотрим вначале оценивание скалярной величины x_0 , поведение которой описывается уравнением:

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= x_1, \\ \dot{x}_1 &= -\alpha x_1 + \sqrt{2\sigma^2\alpha}\xi\end{aligned}\quad (13)$$

по измерениям $z = x_0 + v$, где $x_0(0) \in N\{0, \sigma_0^2\}$, $x_1(0) \in N\{0, \sigma_1^2\}$, $v(t) \in N\{0, r^2\}$, $\sigma_0 = 300$ м, $\sigma_1 = 0,36$ м/с, $\alpha = 1/1200$ с и $\alpha = 1/60$ с, $r = 900$ м²/с, ξ – белый шум единичной интенсивности.

Можно показать, что для рассматриваемого примера в рамках первого метода уравнение Риккати примет вид

$$\dot{P}^* = -\frac{(P^*)}{r} + S_0.$$

Это фактически означает использование для настройки фильтра следующей расчетной модели:

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= \sqrt{S_0}\xi, \\ z &= x_0 + v,\end{aligned}$$

где S_0 может быть получено, в частности, как результат решения задачи минимизации гарантирующей точности оценивания[12]

$$S_0 = \arg \min_{S_1} \left(\frac{D_1^{*2}(S_1)}{S_1} \right) = \frac{2\sigma_1^2}{\alpha}. \quad (14)$$

В соответствии с методом, предложенным в данной работе, при синтезе фильтра используется уравнение Риккати

$$\dot{P}^* = \varepsilon P^* - \frac{(P^*)^2}{r} + \frac{1}{\varepsilon} \sigma_1^2,$$

при этом значение параметра $\varepsilon(t)$ для простоты реализации может быть выбрано кусочно-постоянным на интервале дискретизации при переходе от непрерывной формы фильтра к его дискретному аналогу.

При моделировании в качестве $\varepsilon(t)$ использовалось значение $\varepsilon_0(t)$, полученное как

$$\varepsilon_0(t_N) = \arg \min_{\varepsilon(t_N)} \left(\varepsilon(t_N) P^*(t_{N-1}) + \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon(t_N)} \right) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{P^*(t_{N-1})}}. \quad (15)$$

Обоснованием выбора такого значения $\varepsilon(t)$ является представление уравнения (15) в интегральном виде

$$P^*(t_N) = P^*(t_{N-1}) + \int_{t_{n-1}}^t \left(-\frac{(P^{*2}(\tau))}{r} + \varepsilon(\tau)P^*(\tau) + \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon(\tau)} \right) d\tau$$

с последующей его заменой приближенным уравнением

$$P^*(t_N) \approx P^*(t_{N-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_N} \left(-\frac{P^{*2}(t_{N-1})}{r} + \varepsilon(t_N)P^*(t_{N-1}) + \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon(t_N)} \right) d\tau.$$

Учитывая, что $P^*(t_{N-1})$ не зависит от ε_N и проводя минимизацию значения $P^*(t_N)$ по ε_N , получим

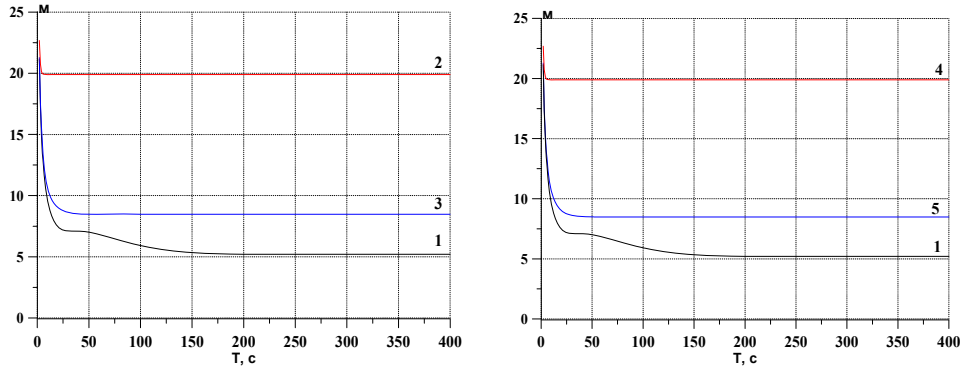
$$\varepsilon_0(t_N) = \arg \min_{\varepsilon(t_N)} \left(\varepsilon(t_N)P^*(t_{N-1}) + \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon(t_N)} \right) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{P^*(t_{N-1})}}.$$

Заметим, что в этом случае не удастся записать расчетную модель, используемую для настройки фильтра, так как в рамках рассматриваемого метода матрицы динамики, используемые в уравнении для оценки (3) и в уравнении Риккати (5), различны. В частности, в рассматриваемом примере в уравнении для оценки используется $F_0 = 0$, в то время как в уравнении Риккати используется

$$F^* = \frac{\varepsilon}{2}.$$

Результаты моделирования методического примера для двух значений интервала корреляции α процесса X_1 приведены на рис. 1.

а) $\alpha=1/1200$ с



б) $\alpha=1/1200$ с

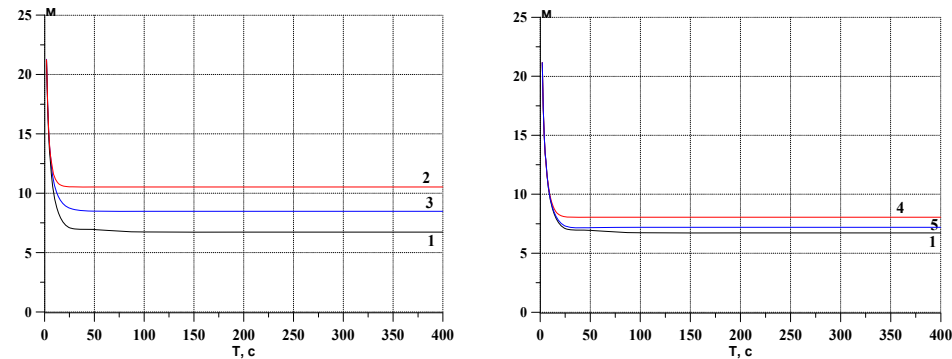


Рис. 1. Результаты моделирования: 1-средняя квадратическая ошибка (СКО) оценки параметра x_0 в оптимальном ФК; 2 и 3 – расчетная СКО оценки x_0 при первом и втором методах;

4 и 5 – действительная СКО оценки x_0 при первом и втором методах

Результаты моделирования подтверждают, что рассматриваемые редуцированные фильтры обладают гарантирующими свойствами, так как в обоих примерах расчетная погрешность фильтрации больше или равна действительной. Сравнение действительной погрешности фильтрации при использовании второго метода (кривая 5) и первого метода (кривая 4), показывает, что использование второго метода для рассматриваемого примера является более эффективным.

Пример 2.

В качестве другого примера рассмотрена задача коррекции инерциальной навигационной системы (ИНС) полуаналитического типа [14] по скоростным и позиционным измерениям. В ИНС используются три двухстепенных гироскопа, уходы которых описываются суммой двух составляющих: постоянным уходом и марковским процессом с интервалом корреляции $1/\alpha_i$ около 8 ч:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\omega}}_i &= 0; \\ \dot{\tilde{\omega}}_i &= -\alpha_i \tilde{\omega}_i + \xi_i, \quad i = x, y, z.\end{aligned}\quad (16)$$

В целях сокращения размерности ФК, используемого в рассматриваемой ИНС в замкнутой схеме коррекции, в вектор состояния редуцированного фильтра была включена только одна составляющая для описания ухода каждого гироскопа. При этом в соответствии с первым методом расчетная модель ухода гироскопа описывается уравнением $\dot{\omega}_i = \xi_i, i = x, y, z$. В этом уравнении для компенсации с избытком влияния уходов гироскопов, описываемых марковскими процессами, введены дополнительные шумы ξ_i , интенсивность которых рассчитана следующим образом:

$$S_{0i} = F_{2K} \text{diag} \left\{ \frac{2\sigma_i^2}{\alpha_i} \right\} F_{2K}^T, \quad i = x, y, z,$$

где F_{2K} – матрица, определяющая влияние уходов гироскопов на погрешности построения вертикали и выработки курса; σ_i^2 – действительная дисперсия уходов гироскопов, описываемых марковскими процессами (16).

В соответствии со вторым методом для расчета коэффициентов усиления ФК используется уравнение Риккати вида (5) с параметрами $F^* = F_0 + \frac{\varepsilon}{2}$,

$S_0 = \frac{1}{\varepsilon} F_2 D_1 F_2^T$, где значение ε определялось из условия:

$$\varepsilon(t_N) = \arg \min_{\varepsilon} \left\{ Sp \varepsilon P_K^*(t_{N-1}) + \frac{1}{\varepsilon(t_N)} Sp F_{2i} D_{1K} F_{2i}^T \right\}, \quad D_{1K} = \text{diag} \{ \sigma_i^2 \}, \quad i = x, y, z.$$

Здесь P_K^* – блок ковариационной матрицы, соответствующий параметрам, непосредственно возмущаемым уходами гироскопов. Для данного примера P_K^* – блок, соответствующий погрешностям построения вертикали и погрешности выработки курса.

Результаты моделирования погрешности выработки курса для двух методов приведены на рис. 2.

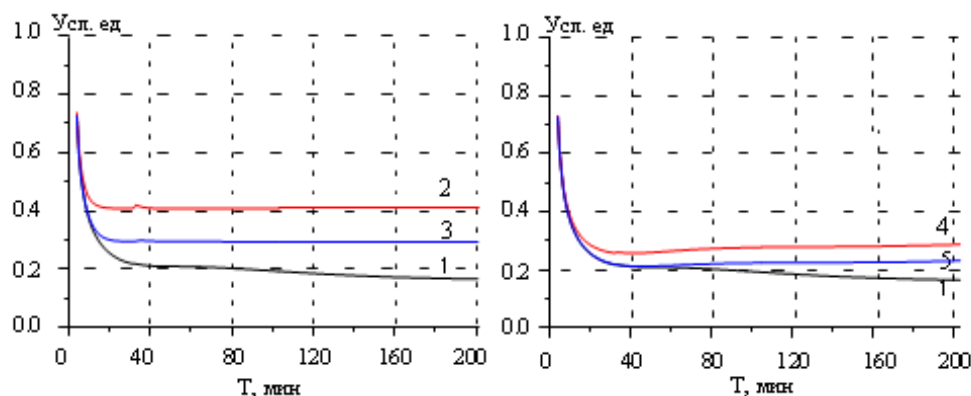


Рис. 2. Результаты моделирования: 1 – СКО оценки курса для оптимального ФК, 2 и 3 – расчетная СКО оценки курса при первом и втором методе, 4 и 5 – действительная СКО ошибки курса при первом и втором методах

Отметим, что соотношения между расчетными и действительными погрешностями для других параметров, вырабатываемых ИНС, аналогичны.

Следует указать, что решение задачи оптимизации выбора параметра ε представляется актуальным и является предметом дальнейших исследований.

Заключение

Проведено сравнение двух методов синтеза редуцированного фильтра с гарантированным качеством оценивания. В рамках первого метода гарантированное качество оценивания обеспечивается за счет увеличения интенсивности шумов возмущений, а во втором – дополнительно к этому предполагается изменение матрицы динамики.

Первый метод целесообразно применять в том случае, если действующие на систему возмущения имеют малый интервал корреляции, тогда погрешность аппроксимации действительной ковариационной матрицы диагональной матрицей незначительна. Достоинство этого метода заключается в простоте его реализации.

При использовании второго метода для обеспечения гарантированной точности фильтрации используется скалярный параметр $\varepsilon(t)$, зависящий от элементов матрицы, рассчитанной в ковариационном канале фильтра. Применение этого метода при описании возмущений с большим интервалом корреляции предпочтительно по сравнению с первым методом, так как в его основе лежит аппроксимация действительной ковариационной матрицы недиагональной матрицей, т. е. матрицей общего вида.

Сравнительный анализ показал большую эффективность предлагаемого второго метода при синтезе редуцированных фильтров, в том числе при решении задачи коррекции инерциальной системы, из модели погрешностей которой исключены составляющие уходов гироскопов, описываемые марковскими процессами первого порядка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 11-08-00372.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ривкин, С.С.** Статистическая оптимизация навигационных систем / С.С. Ривкин, Р.И. Ивановский, А.В. Костров. - Л.: Судостроение, 1976.
2. **Тупышев, В.А.** Использование винеровских моделей для описания уходов гироскопов и ошибок измерения в задаче оценивания состояния инерциальных навигационных систем // Гироскопия и навигация. - 2002. - № 3 (38).
3. **Soto, Mendes E. and Razek A.** Reduced order observers for rotor flux, rotor resistance and speed estimation for vector controlled induction motor drives using the extended Kalman filter technique // IEE Proc. Electric Power Application. 1999. № 146(3).
4. **Aranda J., De La Cruz J., Dorminto S. et al.** Reduced order Kalman filter for alignment // Cybernetics and Systems. 1994. № 25.
5. **Sims C.** Reduced order modeling and filtering // Control and Dynamic Systems. 1982. V. 18.
6. **Bernstein D., Hyland D.** The optimal projection equations for reduced order state estimation // IEEE Trans on Automatic Control. 1985. AC30(6).
7. Nagpal K., Helmick R., Sims C. Reduced order estimation: Part I. Filtering // Intern. J. Control. 1987. № 45.
8. **Keller J. and Darouach M.** Reduced order Kalman filter with unknown inputs // Automatica. 1998. № 34(11).
9. **Tuan H.D., Apcarian P., Nguyen Q.** Robust and reduced order filtering: new LMI based characterizations and methods // IEEE Trans. on Signal Processing. 2001. V. 40. № 12.
10. **Simon D.** Reduced-Order Kalman Filtering without Model Reduction // Control and Intelligent Systems, 2007, Vol. 35, No.2.
11. **Лопарев, А.В.** Синтез алгоритмов обработки навигационной информации с гарантированным качеством оценивания / А.В. Лопарев [и др.] // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
12. **Тупышев, В.А.** Синтез редуцированного фильтра калмановского типа с гарантированным качеством оценивания состояния динамической системы / Известия РАН. Теория и системы управления. - 2010. - № 2. - С. 33-39.
13. **Дмитриев, С.П.** Гарантирующая настройка фильтра Калмана при неопределенности параметров модели погрешности навигационных систем / С.П.Дмитриев, Ю.А.Литвиненко // Гироскопия и навигация. - 2005. - №1. - С.57-68.
14. **Вайсгант, И.Б.** Погрешности выработки навигационных параметров платформенными инерциальными системами среднего класса точности в зависимости от широты места / И.Б.Вайсгант, Ю.А.Литвиненко // Изв. вузов. Приборостроение. - 2002. - №9.

Abstract. Two approaches to synthesis of reduced Kalman filter with the guaranteed estimation quality are compared. Characteristics of the offered approaches is the choice of parameters of the filter so that the covariance matrix calculated in covariance channel of the synthesized suboptimal filter be not smaller than the actual covariance matrix for any time point. The first approach reaches the guaranteed estimation at the expense of increasing the disturbance noise. The second approach ensures it due to two factors: changing the dynamics matrix eigenvalues and introducing additional disturbance noise that makes it possible to increase filtration accuracy in solving a number of practical tasks.

Key words : Kalman filter, reduced filter, guaranteed estimation

Материал поступил 28.12.11