

УДК 629.056.8

В.Г. НАЙДЕНОВ, доктор технических наук, старший научный сотрудник
К.А. ТАРАСЕНКО

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ВТОРИЧНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В статье авторов разработан усовершенствованный алгоритм математической обработки измерительной информации в аппаратуре потребителей спутниковой навигационной системы, реализующий вторичную обработку первичных радионавигационных параметров, полученных от большого количества навигационных спутников. Предлагается использовать в алгоритмах решения навигационных задач дискретный многоканальный модифицированный обобщенный фильтр Калмана, представляющий собой устройство для оптимальной фильтрации многомерных случайных процессов. Принципы, положенные в основу приведенного алгоритма, могут быть с успехом использованы при проектировании современной аппаратуры траекторных измерений, используемой при испытаниях сложных технических систем.

Ключевые слова: *аппаратура потребителей; спутниковая навигационная система; математическая обработка измерительной информации; фильтр Калмана; погрешности оценок координат.*

Спутниковая радионавигация является одним из перспективных направлений прикладной космонавтики. Она определяет качественно новый уровень координатно-временного обеспечения наземных, морских, воздушных и космических потребителей. Это подтверждается такими важными преимуществами современных спутниковых радионавигационных систем, как глобальность рабочей зоны, неограниченная пропускная способность, скрытность, живучесть, беспрецедентно высокая точность и непрерывность измерений пространственных координат потребителей, их скорости движения, пространственной ориентации и текущего времени [1].

В настоящее время при испытаниях сложных технических комплексов для получения траекторных измерений все в большем объеме применяется аппаратура потребителей (АП), использующая навигационные поля, создаваемые спутниковыми навигационными системами (СНС).

В отечественных СНС в основе математической обработки измерительной информации лежат псевдодальномерный и псевдоскоростной методы измерения местоположения и составляющих вектора скорости потребителей координатной информации. Применение этих методов в алгоритмах вторичной обработки позволяет устранять дополнительные погрешности в оценке псевдодальностей до навигационных спутников (НС) и псевдоскоростей летательных аппаратов (ЛА), возникающие в связи с ограниченной стабильностью опорных генераторов аппаратуры потребителей, которые приводят к расхождению шкал времени между единой бортовой шкалой времени спутниковой навигационной системы и шкалой времени аппаратуры потребителей, а также из-за отклонений несущих частот сигналов, передаваемых со спутников, от номинальных значений. Это в конечном счете приводит к снижению точности определения параметров движения летательных аппаратов [2; 3].

Для реализации псевдодальномерного и псевдоскоростного методов измерений в алгоритмах навигационных определений решается как минимум четыре нелинейных уравнения, в которые входят измеренные значения псевдодальностей и псевдоскоростей. При этом кроме координат местоположения потребителя и составляющих вектора скорости полета ЛА оцениваются временная невязка в расхождении шкал времени навигационной системы и аппаратуры потребителей, а также отклонения несущих частот сигналов, передаваемых со спутников, от номинальных значений, что позволяет корректировать измеренные значения псевдодальностей до НС и псевдоскоростей взаимного движения ЛА и навигационных спутников и, в конечном счете, повысить точность оценки параметров движения летательных аппаратов [4].

Однако использование в СНС псевдодальномерного и псевдоскоростного методов определения параметров движения ЛА накладывает не только ограничения на структуру и параметры орбитальной группировки навигационных космических аппаратов, но и на возможность повышения точности измерения координат и составляющих вектора скорости ЛА за счет совместной обработки измерений псевдодальностей и псевдоскоростей более, чем от четырех НС. В последнем случае серьезно усложняется алгоритм решения переопределенной системы нелинейных уравнений, что требует применения численных методов решения и серьезных программно-вычислительных ресурсов аппаратуры потребителей.

Для решения такой проблемной задачи предлагается использовать в алгоритмах решения навигационных задач дискретный многоканальный модифицированный обобщенный фильтр Калмана, что позволит одновременно решать следующие частные задачи:

повышения точности оценки координат и составляющих вектора скорости испытываемых ЛА за счет использования оптимального фильтра Калмана, минимизирующего в среднеквадратическом смысле погрешности оценок координат и составляющих вектора скорости летательных аппаратов;

компенсации дополнительных погрешностей в оценке координат объектов и их составляющих вектора скорости, возникающих за счет расхождения шкалы времени спутниковой навигационной системы со шкалой времени АП, а также за счет отклонения несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений;

повышения канальности аппаратуры потребителей по обработке сигналов от большого количества навигационных спутников.

Синтез алгоритма вторичной обработки навигационной информации в аппаратуре потребителей проведем с использованием линейного дискретного модифицированного фильтра Калмана. При этом в таком фильтре предусмотрена возможность не только компенсации рассматриваемых дополнительных погрешностей, но и получения оценок значений времени расхождения шкал времени между НС и АП, а также отклонений несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений.

На рисунке 1 приведена структура входных и выходных данных разработанного алгоритма.

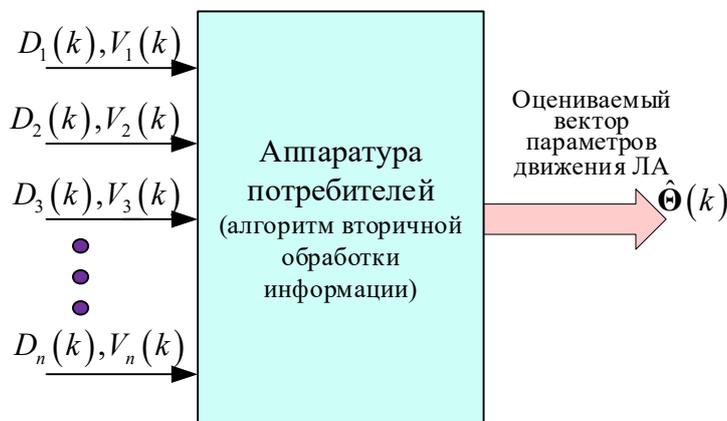


Рисунок 1 – Структура входных и выходных данных алгоритма вторичной обработки информации в аппаратуре потребителей

Входными данными в алгоритме вторичной обработки являются значения псевдодальностей и псевдоскоростей, полученные в результате первичной обработки, а выходными данными – вектор оценки параметров движения ЛА.

При синтезе алгоритма вторичной обработки навигационной информации также, как и при реализации псевдодальномерного и псевдоскоростного методов измерения координат ЛА и составляющих вектора их скорости, рассмотрено наличие четырех НС [1], хотя общность рассуждений для большего количества навигационных спутников сохраняется.

В рассматриваемом фильтре модель случайного наблюдаемого процесса измерений $\xi(k)$ может быть представлена в следующем виде:

$$\xi(k) = \mathbf{H}(k) \cdot \theta(k) + \Delta\xi(k) + \eta(k), \tag{1}$$

где $\theta(k)$ – вектор состояния динамической модели, описывающей случайный процесс перемещения ЛА с аппаратурой потребителей на борту в пространстве состояний;
 $\mathbf{H}(k)$ – матрица частных производных от измеряемых радионавигационных параметров (псевдодальностей и псевдоскоростей) по оцениваемым навигационным параметрам;
 $\Delta\xi(k)$ – вектор погрешностей, вносимых в наблюдаемый процесс за счет времени расхождения шкал времени между навигационными спутниками и аппаратурой потребителей, которое считается постоянным для всех НС, а также за счет отклонений несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений;
 $\eta(k)$ – векторный процесс погрешностей измерения радионавигационных параметров (псевдодальностей и псевдоскоростей).

Вектор состояния динамической модели, описывающей случайный процесс перемещения аппаратуры потребителей по отношению к выбранному «созвездию» навигационных спутников, запишем в следующем виде:

$$\theta(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k) \quad \delta\dot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y}(k) \quad \ddot{y}(k) \quad \delta\dot{y}(k) \quad z(k) \quad \dot{z}(k) \quad \ddot{z}(k) \quad \delta\dot{z}(k)]^T,$$

где $\dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)$ – составляющие вектора скорости летательного аппарата;
 $\ddot{x}(k), \ddot{y}(k), \ddot{z}(k)$ – составляющие вектора ускорения ЛА;
 $\delta\dot{x}(k), \delta\dot{y}(k), \delta\dot{z}(k)$ – стационарные случайные процессы погрешностей определения составляющих вектора ускорения ЛА, которые могут быть описаны следующими рекуррентными стохастическими уравнениями с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned} \delta\ddot{x}(k) &= s_1 \cdot \delta\ddot{x}(k-1) + w_1 \cdot e_{\delta\dot{x}}(k); \\ \delta\ddot{y}(k) &= s_2 \cdot \delta\ddot{y}(k-1) + w_2 \cdot e_{\delta\dot{y}}(k); \\ \delta\ddot{z}(k) &= s_3 \cdot \delta\ddot{z}(k-1) + w_3 \cdot e_{\delta\dot{z}}(k). \end{aligned}$$

В последних выражениях постоянные коэффициенты могут быть определены из следующих выражений [5]:

$$s_i = e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}; \quad w_i = \sigma_i \cdot \sqrt{1 - s_i^2}, \quad i = \dot{x}, \dot{y}, \dot{z},$$

где σ_i и T_i – соответственно среднеквадратические погрешности и времена корреляции случайных процессов $\delta\ddot{x}(k), \delta\ddot{y}(k)$ и $\delta\ddot{z}(k)$;

Δt – период поступления информации о радионавигационных параметрах.

Динамическая модель, описывающая случайный процесс перемещения аппаратуры потребителей, установленной на ЛА, по отношению к выбранному «созвездию» навигационных спутников, может быть описана следующим рекуррентным стохастическим уравнением вида:

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(1)}(k), \quad (2)$$

где матрицы \mathbf{a} и \mathbf{b} имеют следующие структуры:

$$\mathbf{a} = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & \vdots & 1 & \Delta t & 0 & 0 & \vdots & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & \vdots & 0 & 1 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & \vdots & 0 & 1 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \vdots & 0 & 0 & 1 & 1 & \vdots & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & s_1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & s_2 & \vdots & 0 & 0 & 0 & s_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{b} = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & w_2 & \vdots & 0 & 0 & 0 & w_3 \end{bmatrix},$$

а $\boldsymbol{\varepsilon}_{(1)}(k)$ – векторный процесс белого шума.

В выражении (1) слагаемое $\Delta\xi(k)$ определяет дополнительные погрешности, вносимые в наблюдаемый процесс за счет расхождения шкалы времени аппаратуры потребителей и единой шкалой времени навигационной системы, а также из-за отклонений несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений, которые можно описать следующим соотношением:

$$\Delta\xi(k) = \mathbf{C}_\lambda \cdot \Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k), \quad (3)$$

где $\Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k)$ – случайный вектор временных невязок между единой шкалой времени навигационной системы и аппаратурой потребителей, а также отклонений несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений, который для случая наличия четырех НС и одинаковых значениях расхождения шкал времени аппаратуры потребителей со шкалой времени навигационной системы имеет следующую структуру:

$$\Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k) = [\delta\tau(k) \quad \delta f_1(k) \quad \delta\tau(k) \quad \delta f_2(k) \quad \delta\tau(k) \quad \delta f_3(k) \quad \delta\tau(k) \quad \delta f_3(k)]^T,$$

где $\delta\tau(k)$ – погрешность расхождения шкал времени между единой шкалой времени навигационной системы и аппаратурой потребителей;
 $\delta f_i(k)$ – погрешность отклонения несущей частоты сигнала, передаваемого с i -го навигационного спутника, от номинального значения.

Компоненты вектора $\Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k)$ могут быть описаны рекуррентными стохастическими уравнениями с постоянными коэффициентами вида:

$$\delta\tau(k) = \alpha \cdot \delta\tau(k-1) + \beta \cdot e_{\delta\tau}(k) \text{ и } \delta f_i(k) = \tilde{\alpha}_i \cdot \delta f_i(k-1) + \tilde{\beta}_i \cdot e_{\delta f_i}(k),$$

где $i = 1, \dots, 4$.

Коэффициенты этих уравнений могут быть определены из следующих соотношений:

$$\alpha = e^{\frac{\Delta t}{T_\tau}}; \beta = \sigma_\tau \cdot \sqrt{1 - \alpha^2}; \tilde{\alpha}_i = e^{\frac{\Delta t}{T_{\delta f_i}}}; \tilde{\beta}_i = \sigma_{\delta f_i} \cdot \sqrt{1 - \alpha_i^2},$$

где σ_τ и T_τ – соответственно среднеквадратическая погрешность и время корреляции случайного процесса временных невязок $\delta\tau(k)$.

Матрица \mathbf{C}_λ скоростей распространения радиоволн и номиналов несущих частот сигналов НС имеет следующую структуру:

$$\mathbf{C}_\lambda = \text{diag}[c \quad \lambda_1 \quad c \quad \lambda_2 \quad c \quad \lambda_3 \quad c \quad \lambda_4].$$

В матричном виде случайный вектор $\Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k)$ запишем выражением вида:

$$\Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k) = \boldsymbol{\alpha} \cdot \Delta\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k-1) + \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(2)}(k). \quad (4)$$

Стационарный векторный случайный процесс погрешностей измерения радионавигационных параметров $\boldsymbol{\eta}(k)$ может быть описан стохастическим рекуррентным уравнением с постоянными коэффициентами вида:

$$\boldsymbol{\eta}(k) = \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\eta}(k-1) + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(3)}(k), \quad (5)$$

где матрицы $\boldsymbol{\rho}$ и \mathbf{r} имеют следующую структуру:

$$\boldsymbol{\rho} = \text{diag}[\rho_1 \quad \rho_2 \quad \rho_3 \quad \rho_4 \quad \rho_5 \quad \rho_6 \quad \rho_7 \quad \rho_8];$$

$$\mathbf{r} = \text{diag}[r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4 \quad r_5 \quad r_6 \quad r_7 \quad r_8],$$

а $\boldsymbol{\varepsilon}_{(3)}(k)$ – векторный процесс белого шума.

Коэффициенты ρ_i и r_i ($i = 1, \dots, 8$) такого уравнения могут быть определены следующим образом:

$$\rho_i = e^{\frac{\Delta t}{T_\eta}}; r_i = \sigma_\eta \cdot \sqrt{1 - \rho_i^2},$$

где σ_η и T_η – соответственно среднеквадратическая погрешность и время корреляции случайного процесса погрешности оценки конкретного радионавигационного параметра.

Матрица частных производных $\mathbf{H}(k)$ в блочном виде для случая наличия четырех навигационных спутников будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{H}(k) = \left[\frac{\partial \mathbf{D}, \mathbf{V}}{\partial (x, y, z)} \right] = [\mathbf{H}_1(k) : \mathbf{Q} : \mathbf{H}_2(k) : \mathbf{Q} : \mathbf{H}_3(k) : \mathbf{Q}],$$

где матрицы $\mathbf{H}_1(k), \mathbf{H}_2(k), \mathbf{H}_3(k)$ и \mathbf{Q} имеют следующие структуры:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1(k) &= \left[\frac{\partial D_1(k)}{\partial x} \frac{\partial V_1(k)}{\partial \dot{x}} \frac{\partial D_2(k)}{\partial x} \frac{\partial V_2(k)}{\partial \dot{x}} \frac{\partial D_3(k)}{\partial x} \frac{\partial V_3(k)}{\partial \dot{x}} \frac{\partial D_4(k)}{\partial x} \frac{\partial V_4(k)}{\partial \dot{x}} \right]^T, \\ \mathbf{H}_2(k) &= \left[\frac{\partial D_1(k)}{\partial y} \frac{\partial V_1(k)}{\partial \dot{y}} \frac{\partial D_2(k)}{\partial y} \frac{\partial V_2(k)}{\partial \dot{y}} \frac{\partial D_3(k)}{\partial y} \frac{\partial V_3(k)}{\partial \dot{y}} \frac{\partial D_4(k)}{\partial y} \frac{\partial V_4(k)}{\partial \dot{y}} \right]^T, \\ \mathbf{H}_3(k) &= \left[\frac{\partial D_1(k)}{\partial z} \frac{\partial V_1(k)}{\partial \dot{z}} \frac{\partial D_2(k)}{\partial z} \frac{\partial V_2(k)}{\partial \dot{z}} \frac{\partial D_3(k)}{\partial z} \frac{\partial V_3(k)}{\partial \dot{z}} \frac{\partial D_4(k)}{\partial z} \frac{\partial V_4(k)}{\partial \dot{z}} \right]^T, \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \end{aligned}$$

где $D_1(k), D_2(k), D_3(k), D_4(k)$ – псевдодальности от аппаратуры потребителей до четырех НС; $V_1(k), V_2(k), V_3(k), V_4(k)$ – радиальные псевдоскорости перемещения аппаратуры потребителей, находящейся на борту ЛА, по отношению к четырем НС.

Тогда с учетом выражений (4, 5) и, делая подстановку уравнений (2) и (3) в выражение (1), получим следующий вид векторного случайного процесса измерений:

$$\begin{aligned} \xi(k) &= \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(3)} + \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\alpha} \cdot \Delta\mathbf{T}(k-1) + \\ &+ \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(2)}(k-1) + \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\eta}(k-1) + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(1)}(k-1). \end{aligned} \quad (6)$$

Используя выражения (1) и (3) для дискретного момента времени $t = k - 1$, определим шумовую составляющую $\boldsymbol{\eta}(k - 1)$ измерения псевдодальностей и псевдоскоростей в виде:

$$\boldsymbol{\eta}(k-1) = \xi(k-1) - \mathbf{H}(k-1) \cdot \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{C} \cdot \Delta\mathbf{T}(k-1). \quad (7)$$

Подставим выражение (7) в формулу (6) и получим следующий вид наблюдаемого процесса:

$$\begin{aligned} \xi(k) &= \boldsymbol{\rho} \cdot \xi(k-1) + [\mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{a} - \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{H}(k-1)] \cdot \boldsymbol{\theta}(k-1) + \\ &+ [\mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{C}] \cdot \Delta\mathbf{T}(k-1) + \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(1)} + \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(2)}(k) + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{(3)}(k-1). \end{aligned}$$

Введем два расширенных случайных процесса вида:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Theta}(k) &= [\boldsymbol{\theta}(k) : \Delta\mathbf{T}(k)]; \\ \mathbf{E}(k) &= [[\boldsymbol{\varepsilon}_1(k) : \boldsymbol{\varepsilon}_2(k)] : \boldsymbol{\varepsilon}_3(k)]. \end{aligned}$$

Тогда выражение для наблюдаемого процесса запишется в следующем виде:

$$\xi(k) = \mathbf{A}_0(k, \xi) + \mathbf{A}_1(k) \cdot \boldsymbol{\Theta}(k-1) + \mathbf{B}_1(k) \cdot \mathbf{E}(k),$$

где $\mathbf{A}_0(k, \xi) = \boldsymbol{\rho} \cdot \xi(k-1)$;

$\mathbf{A}_1(k) = [\mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{a} - \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{H}(k-1) : \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{C}]$;

$\mathbf{B}_1(k) = [[\mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{b} : \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\beta}] : \mathbf{r}]$.

С учетом введенного расширенного вектора запишем выражения для частично-наблюдаемого процесса вида:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Theta}(k) &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}(k) \\ \dots \\ \Delta\mathbf{T}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} : 0 \\ \dots \\ 0 : \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}(k-1) \\ \dots \\ \Delta\mathbf{T}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b} : 0 \\ \dots \\ 0 : \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{(1)}(k) \\ \dots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{(2)}(k) \end{bmatrix}; \\ \xi(k) &= \mathbf{A}_0(k, \xi) + \mathbf{A}_1(k) \cdot \boldsymbol{\Theta}(k-1) + \mathbf{B}_1(k) \cdot \mathbf{E}(k). \end{aligned}$$

В более компактном виде выражения для частично-наблюдаемого процесса примут вид:

$$\Theta(k) = \mathbf{a}_1 \cdot \Theta(k - 1) + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{E}(k); \quad (8)$$

$$\xi(k) = \mathbf{A}_0(k, \xi) + \mathbf{A}_1(k) \cdot \Theta(k - 1) + \mathbf{B}_1(k) \cdot \mathbf{E}(k). \quad (9)$$

Основываясь на теории оптимальной фильтрации [5-7], уравнение для обобщенного дискретного фильтра Калмана с учетом выражений (8) и (9) в части оптимальной оценки навигационных параметров запишется в виде:

$$\hat{\Theta}(k) = \begin{bmatrix} \hat{\theta}(k) \\ \dots\dots\dots \\ \hat{\Delta}\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{a}_1 \cdot \hat{\Theta}(k - 1) + K(k) \cdot \{\xi(k) - \mathbf{A}_0(k, \xi) - \mathbf{A}_1(k) \cdot \hat{\Theta}(k - 1)\}. \quad (10)$$

Коэффициент усиления фильтра определяется соотношением вида:

$$K(k) = [\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{B}_1^T(k) + \mathbf{a}_1 \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k) \cdot \mathbf{A}_1^T(k)] \times [\mathbf{B}_1(k) \cdot \mathbf{B}_1^T(k) + \mathbf{A}_1(k) \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k) \cdot \mathbf{A}_1^T(k)]^{-1}. \quad (11)$$

В выражении (11) ковариационная матрица $\boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k)$ оцениваемого вектора $\hat{\Theta}(k)$ определяется следующим рекуррентным выражением:

$$\boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k) = [\mathbf{a}_1 \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k - 1) \cdot \mathbf{a}_1^T + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{b}_1^T] - [\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{B}_1^T(k) + \mathbf{a}_1 \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k - 1) \cdot \mathbf{A}_1^T(k)] \times [\mathbf{B}_1(k) \cdot \mathbf{B}_1^T(k) + \mathbf{A}_1(k) \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k - 1) \cdot \mathbf{A}_1^T(k)]^{-1} \times [\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{B}_1^T(k) + \mathbf{a}_1 \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\Theta}}(k - 1) \cdot \mathbf{A}_1^T(k)]^T.$$

Из выражения (10) видно, что наряду с оценками вектора параметров движения ЛА, на котором установлена АП, оценивается и вектор $\hat{\Delta}\{\mathbf{T}, \mathbf{f}\}(k)$ временных невязок между шкалами времени навигационной спутниковой системы и аппаратурой потребителей, а также вектор невязок в отклонении частот сигналов, излучаемых НС, от номинальных значений. Это стало возможным благодаря учету в параметрах модифицированного фильтра Калмана априорных значений вероятностных характеристик таких невязок. Оцененные значения невязок могут быть использованы для корректировки поступающих с бортовой аппаратуры ЛА значений псевдодальноностей до навигационных спутников, а также значений псевдоскоростей перемещения аппаратуры потребителей относительно навигационных спутников.

Кроме того, проведенные ранее исследования показали [8], что такой модифицированный фильтр Калмана позволяет компенсировать до 40 процентов погрешностей в оценке параметров движения ЛА, возникающих за счет временных невязок между шкалами времени НС и аппаратурой потребителей, а также невязок в отклонении сигналов, излучаемых с НС, от номинальных значений. Подтверждением факта возможности компенсации таких невязок может служить модифицированный непрерывный фильтр Калмана, на который автором статьи было получен патент на изобретение «Устройство для оптимальной фильтрации многомерных случайных процессов». Схема такого устройства приведена на рисунке 2. Это устройство позволяет проводить оптимальную фильтрацию многомерных случайных процессов с несинхронными во времени компонентами этих процессов. Устройство работает следующим образом [9].

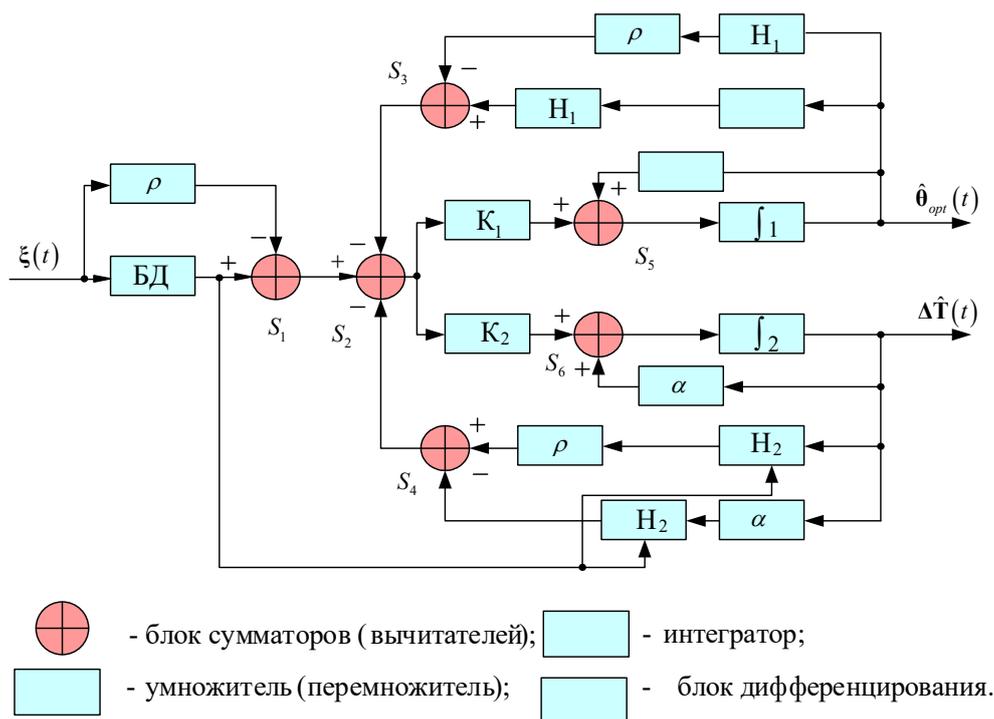


Рисунок 2 – Структурная схема модифицированного фильтра Калмана для фильтрации многомерных случайных процессов измерений с несинхронными во времени компонентами

Информационный N -мерный случайный процесс измерений $\xi(t)$ поступает на вход матричного множителя ρ , а также на вход блока дифференцирования (БД).

С выхода матричного множителя ρ N -мерный сигнал поступает на вход «уменьшаемое» первого блока вычитателей S_1 , а на его второй вход «вычитаемое» поступает с блока дифференцирования процесс $d\xi(t)$, являющийся дифференциалом случайного процесса измерений $\xi(t)$.

С выхода блока вычитателей S_1 сигнал поступает на вход «вычитаемое» вычитателей S_2 , а на его второй и третий входы «уменьшаемое» – соответствующие прогнозируемые измерения $Q_1(t, \hat{\theta}(t))$ и $Q_2(t, \Delta \hat{T}(t))$, где $\hat{\theta}(t)$ и $\Delta \hat{T}(t)$ являются соответственно оценками вектора параметров движения ЛА и вектора временных погрешностей между моментами времени привязки компонент случайного процесса измерений $\xi(t)$ к единой шкале времени.

На выходе блока вычитателей S_2 образуется невязка («обновляющий» процесс) $\varepsilon(t)$, которая определяется выражением:

$$\varepsilon(t) = d\xi(t) - \rho \cdot \xi(t) - Q_1(t, \hat{\theta}(t)) - Q_2(t, \Delta \hat{T}(t)).$$

«Обновляющий» процесс $\varepsilon(t)$ поступает параллельно на вход матричных множителей K_1 и K_2 , где он взвешивается соответственно с весами коэффициентов усиления фильтра $K_1(t)$ и $K_2(t)$.

На блоке сумматоров S_5 происходит сложение предсказанной оценки, поступающей с выхода матричного множителя A , с поправкой $R_1(t, \hat{\theta}(t))$, поступающей с выхода матричного множителя K_1 , которая определяется выражением:

$$R_1(t, \hat{\theta}(t)) = K_1(t) \cdot \varepsilon(t).$$

Оценка полезного сигнала $\hat{\theta}(t)$ формируется интегрированием в первом блоке интеграторов сигнала, поступающего с выхода блока сумматоров S_5 .

Прогнозируемое измерение $Q_1(t, \hat{\theta}(t))$ формируется из сигнала $\hat{\theta}(t)$ с использованием двух матричных множителей H_1 , матричных множителей A , ρ и блока вычитателей S_3 , а прогнозируемое измерение $Q_2(t, \Delta\hat{T}(t))$ формируется из сигнала $\Delta\hat{T}(t)$ с помощью двух матричных переумножителей H_2 , матричных множителей α , ρ и блока вычитателей S_4 .

Для формирования вектора оценки временных погрешностей $\Delta\hat{T}(t)$ между моментами привязки компонент многомерного процесса измерений $\xi(t)$ к единой шкале времени используется сигнал с выхода матричного множителя α , который суммируется на втором блоке сумматоров S_4 с предсказанной оценкой $\alpha \cdot \Delta\hat{T}(t)$, поступающей с выхода матричного множителя K_2 , а затем интегрируется во втором блоке интеграторов.

Именно наличие прогнозируемого измерения $Q_2(t, \Delta\hat{T}(t))$, наряду с прогнозируемым измерением $Q_1(t, \hat{\theta}(t))$, позволяет получить скорректированное значение «обновляющего» процесса $\varepsilon(t)$ и тем самым повысить точность фильтрации многомерного случайного процесса измерений $\xi(t)$ при наличии временных невязок между моментами времени привязки его компонент к единой шкале времени.

В итоге на выходе первого блока интеграторов образуется оптимальная в среднем квадратическом смысле оценка полезного сигнала $\hat{\theta}(t)$ при наличии временных невязок между моментами привязки компонент входного многомерного сигнала измерений к единой шкале времени.

Таким образом, разработанный в статье усовершенствованный алгоритм вторичной математической обработки измерительной информации в аппаратуре потребителей спутниковой навигационной системы позволит повысить точность оценки координат местоположения испытываемых ЛА и составляющих вектора их скорости за счет применения оптимальной калмановской фильтрации, минимизирующей в среднеквадратическом смысле погрешности оценок координат и составляющих вектора скорости ЛА, и, кроме того, компенсировать дополнительные погрешности в оценке координат ЛА и составляющих вектора их скорости, возникающих за счет расхождения шкал времени спутниковой навигационной системы и аппаратуры потребителей, а также за счет отклонения несущих частот сигналов, передаваемых с навигационных спутников, от номинальных значений.

Принципы, положенные в основу приведенного алгоритма, могут быть с успехом использованы при проектировании современной рассматриваемой в статье аппаратуры траекторных измерений, используемой при испытаниях сложных технических систем.

Список использованных источников

1. Поваляев А.А. Спутниковые радиотехнические системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
2. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: СФУ, 2012. – 259 с.
3. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. – 270 с.
4. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
5. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. Нелинейная фильтрация и смежные вопросы. М.: Наука, 1974. – 696 с.
6. Синицын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева. М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.
7. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. – 496 с.
8. Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. М.: Машиностроение, 2011. – 336 с.
9. Найденов В.Г. Оптимальная фильтрация многомерных случайных процессов траекторных измерений с несинхронными во времени компонентами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т.5. №9. – С. 3-9.