

УДК 621.396

Алгоритм комплексирования следящей системы за разностью фаз навигационных сигналов с инерциальной навигационной системой

© Авторы, 2014

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

А.И. Перов – д.т.н., профессор,
зав. кафедрой радиотехнических систем, «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Проведен синтез комплексного алгоритма фильтрации разности фаз навигационных сигналов, принимаемых в пространственно разнесенных точках, при наличии измерений инерциальной навигационной системы. Приведены структурные схемы комплексной системы фильтрации.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, аппаратура потребителей

Synthesis of an integrated filtering algorithm of phase difference of two space radio navigation signals received at spatial allocated points and the presence of inertial sensors measurements is executed. There is given block diagrams of the integrated filtering system.

Keywords: space radio navigation systems, user apparatus, angular attitude, one-stage algorithm, phase difference, inertial sensors, integrated filtering algorithm

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) в настоящее время широко используются для решения различных технических задач, в том числе с использованием фазовых измерений [1]. В ряде приложений, например, при определении угловой ориентации объекта по сигналам СРНС необходимо формировать оценки разностей фаз сигналов, принятых в пространственно разнесенных точках. Для решения данной задачи «классическим» методом сначала измеряются фазы принятых сигналов в каждой точке, затем формируются соответствующие разности, которые далее подвергаются той или иной обработке в соответствии с решаемой задачей. Такой подход не является оптимальным с точки зрения теории оптимального приема сигналов. В [1] синтезирован алгоритм слежения непосредственно за разностью фаз навигационных сигналов, обусловленной вращением базовой линии. При использовании такого алгоритма на объекте, на котором кроме аппаратуры спутниковой навигации имеется инерциальная система навигации, возникает дополнительная возможность использования инерциальных измерений в комплексной системе фильтрации, что позволяет повысить точность и помехоустойчивость определения угловой ориентации объекта. Цель работы – синтез такого комплексного алгоритма фильтрации.

Для синтеза комплексного алгоритма фильтрации разности фаз двух сигналов, принимаемых в пространственно разнесенных точках, будем использовать подход, описанный в [1] и основанный на разложении фазы принимаемых сигналов на две составляющие, одна из которых обусловлена поступательным движением объекта относительно спутника, а вторая – вращательным движением объекта относительно центра масс. При этом слежение за разностью фаз сигналов, принятых в двух точках, отслеживает изменение этой разности, обусловленное вращательным движением.

Рассмотрим подвижную систему координат (СК) $X_3 Y_3 Z_3$ (ЕCEF в англоязычной литературе), связанную с Землей, и подвижную СК $X_c Y_c Z_c$ (гру в англоязычной литературе), связанную с объектом (рис. 1).

Пусть в СК $X_c Y_c Z_c$ задан вектор AB постоянной длины l , который обозначим $x_{AB,c}$. В СК $X_3 Y_3 Z_3$ он имеет координаты $\{x_{c,b} - x_{c,a}, y_{c,b} - y_{c,a}, z_{c,b} - z_{c,a}\}$. Учи-

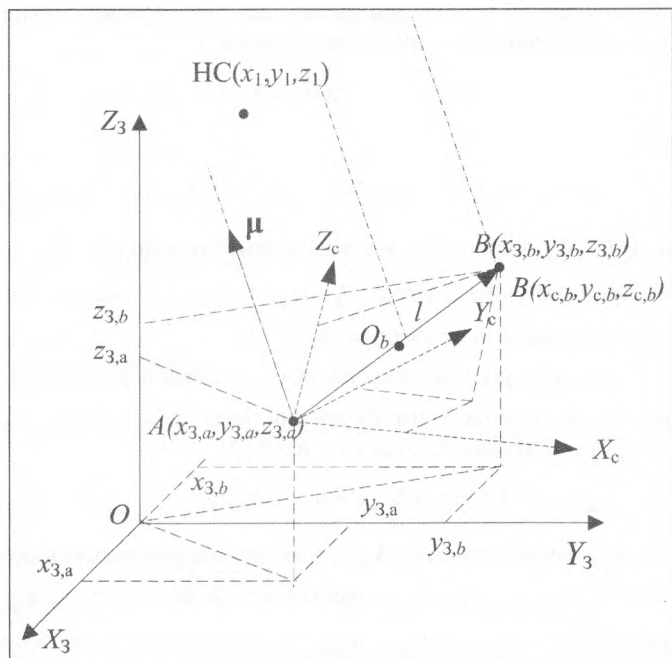


Рис. 1

тывая, что $\{x_{c,a}, y_{c,a}, z_{c,a}\} = 0$, получаем, что вектор $\mathbf{x}_{B,c}$ в СК $X_c Y_c Z_c$ имеет координаты $\mathbf{x}_{AB,c} = \mathbf{x}_{B,c} = \{x_{c,b}, y_{c,b}, z_{c,b}\}$. В СК $X_3 Y_3 Z_3$ точка A имеет координаты $\mathbf{x}_{A,3} = \{x_{3,a}, y_{3,a}, z_{3,a}\}$, а точка B – координаты

$$\mathbf{x}_{B,3} = \mathbf{x}_{A,3} + \mathbf{C}_c^3 \mathbf{x}_{B,c}, \quad (1)$$

где \mathbf{C}_c^3 – матрица преобразования координат из СК $X_c Y_c Z_c$ в СК $X_3 Y_3 Z_3$.

Следовательно, вектор AB в СК $X_3 Y_3 Z_3$ имеет координаты

$$\mathbf{x}_{AB,3} = \mathbf{x}_{B,3} - \mathbf{x}_{A,3} = \mathbf{C}_c^3 \mathbf{x}_{AB,c} = \mathbf{C}_c^3 \mathbf{x}_{B,c}. \quad (2)$$

Полагаем, что вектор AB жестко фиксирован в СК $X_c Y_c Z_c$.

Рассмотрим описание взаимного движения навигационной (НС) и объекта, с которым связана СК $X_c Y_c Z_c$, в СК $X_3 Y_3 Z_3$.

В СК $X_3 Y_3 Z_3$ введем вектора координат и скорости НС $\mathbf{x}_{НС}$, $\mathbf{V}_{НС}$.

Движение объекта (потребителя) также будем описывать в СК $X_3 Y_3 Z_3$. Обозначим векторы координат, скорости и ускорения потребителя в данной СК как $\mathbf{x}_{п,3}$, $\mathbf{V}_{п,3}$, $\mathbf{a}_{п,3}$.

Разложим движение объекта $X_3 Y_3 Z_3$ на два движения: поступательное с невращающейся СК $X_c Y_c Z_c$ относительно $X_3 Y_3 Z_3$, и вращательное, обусловленное вращением СК $X_c Y_c Z_c$ относительно СК $X_3 Y_3 Z_3$.

Рассмотрим прием навигационных сигналов в точках A и B на рис. 1.

Поступательное движение объекта будем характеризовать поступательным движением точки O_b – центра линии AB .

В точках A и B принимаемые сигналы сдвинуты по фазе на угол $\pm\psi_\varphi$:

$$\psi_\varphi = \frac{\pi \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{L}_{ab}}{\lambda}, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\mu}$ – вектор (в СК $X_3 Y_3 Z_3$) направляющих косинусов НС относительно объекта (точки O_b) (рис. 1); \mathbf{L}_{ab} – вектор, определяющий положение линии AB в СК $X_3 Y_3 Z_3$.

Пусть \mathbf{L}_{ab}^c – вектор линии в СК $X_c Y_c Z_c$, а \mathbf{C}_{rpy}^{ECEP} – матрица преобразования из СК $X_c Y_c Z_c$ в СК $X_3 Y_3 Z_3$ [1].

В приведенной постановке задачи в [1] синтезирован оптимальный алгоритм фильтрации разности фаз ψ_φ , обусловленной вращением линии AB , при приеме спутниковых навигационных сигналов в точках A и B . Запишем наблюдения спутниковых сигналов

$$y_A(t) = S_A(t) + n_A(t), \quad y_B(t) = S_B(t) + n_B(t), \quad (4)$$

где

$$s_A(t) = Ah_{дк}(t - \tau_A) \cos((\omega_c + \omega_d)t + \pi \vartheta_{НС} + \varphi_0 + \psi_\varphi), \quad s_B(t) = Ah_{дк}(t - \tau_B) \cos((\omega_c + \omega_d)t + \pi \vartheta_{НС} + \varphi_0 - \psi_\varphi), \quad (5)$$

$h_{дк}(t)$ – функция модуляции дальномерным кодом; $\vartheta_{НС}$ – навигационное сообщение; φ_0 – начальная фаза сигнала, принимаемого в точке O_b ; $n_A(t)$, $n_B(t)$ – независимые белые гауссовские шумы с равными двусторонними спектральными плотностями $N_0/2$.

В статье рассматривается комплексный алгоритм фильтрации разности фаз ψ_φ при приеме тех же спутниковых сигналов и наличии измерений бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которые в дискретном времени запишем в виде [2]

$$\mathbf{y}_{a,гpy,k} = (\mathbf{I} + \mathbf{m}_{a,k}) \mathbf{A}_{гpy,k} + \mathbf{b}_{a,k} + \mathbf{n}_{a,k}, \quad \mathbf{y}_{\omega,гpy,k} = (\mathbf{I} + \mathbf{m}_{g,k}) \boldsymbol{\Omega}_{гpy,k} + \mathbf{b}_{g,k} + \mathbf{n}_{g,k}, \quad (6)$$

где k – номер отсчета; $\mathbf{A}_{гpy,k}$ – истинное ускорение в собственной системе координат (ССК) БИНС; $\boldsymbol{\Omega}_{гpy,k}$ – истинный вектор угловых скоростей в ССК БИНС; $\mathbf{b}_{a,k}$, $\mathbf{b}_{g,k}$ – векторы смещения нулей акселерометров и гироскопов соответственно; $\mathbf{m}_{a,k}$, $\mathbf{m}_{g,k}$ – матрицы перекоса осей и погрешностей масштабных коэффициентов; $\mathbf{n}_{a,k}$, $\mathbf{n}_{g,k}$ – векторы шумовых ошибок, которые полагаются независимыми белыми гауссовскими шумами.

Элементы $\mathbf{m}_{a,k}$, $\mathbf{m}_{g,k}$, $\mathbf{b}_{a,k}$, $\mathbf{b}_{g,k}$ полагаются винеровскими процессами.

При синтезе комплексных алгоритмов фильтрации угловую ориентацию объекта удобно описывать кватернионом вращения $\mathbf{q}_{\text{гpy}}^{\text{ecef}}$ ССК БИНС в СК ЕСЕФ. Динамика кватерниона $\mathbf{q}_{\text{гpy}}^{\text{ecef}}$ может быть представлена в дискретном виде как [1]

$$\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}} = \Delta_E^* \otimes \mathbf{q}_{\text{гpy},k-1}^{\text{ecef}} \otimes \Delta_{\text{RPY},k}, \quad (7)$$

где \otimes – операция перемножения кватернионов; Δ_E^* – сопряженный малый кватернион поворота Земли за время $t_{k-1} \dots t_k$:

$$\Delta_E^* = \begin{bmatrix} \cos(\omega_E T / 2) & 0 & 0 & -\sin(\omega_E T / 2) \\ 0 & \cos(\omega_E T / 2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_E T / 2) & 0 \\ \sin(\omega_E T / 2) & 0 & 0 & \cos(\omega_E T / 2) \end{bmatrix}^T, \quad (8)$$

$\omega_E = 7,292115 \text{E-}5$ рад/с – угловая скорость вращения Земли; $\Delta_{\text{RPY},k}$ – малый кватернион поворота потребителя в инерциальном пространстве за время $t_{k-1} \dots t_k$:

$$\Delta_{\text{RPY},k} = \mathbf{Q}(\boldsymbol{\rho}_k), \quad \boldsymbol{\rho}_k \approx \frac{T}{2} (\boldsymbol{\Omega}_{\text{гpy},k} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{гpy},k-1}), \quad (9)$$

$\mathbf{Q}(\boldsymbol{\rho}_k)$ – функция преобразования вектора вращения $\boldsymbol{\rho}_k$ в кватернион [1].

При использовании кватерниона для описания углов ориентации матрица преобразований $\mathbf{C}_{\text{гpy}}^{\text{ECEF}}$ является функцией кватерниона $\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}$ [1], т.е. $\mathbf{C}_{\text{гpy}}^{\text{ECEF}}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \equiv \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}})$. Тогда (3) можно записать в виде

$$\psi_\varphi = \frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{L}_{ab}^{\text{ECEF}} = \frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \left(\mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \mathbf{L}_{ab}^{\text{гpy}} \right). \quad (10)$$

Продифференцируем (10) по времени, учитывая, что $\mathbf{L}_{ab}^{\text{гpy}} = \text{const}$

$$\frac{d\psi_\varphi}{dt} = \frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \left(\frac{d\mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}})}{dt} \mathbf{L}_{ab}^{\text{гpy}} \right) = \frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \left(\left(\mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{гpy}/\text{ин}} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{3/\text{ин}} \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \right) \mathbf{L}_{ab}^{\text{гpy}} \right), \quad (11)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{гpy}/\text{ин}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$ – матрица угловых скоростей вращения СК $X_c Y_c Z_c$ относительно инерциального

пространства, измеряемых гироскопами; $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{3/\text{ин}} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & 0 \\ \Omega_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица угловых скоростей вращения Земли относительно инерциального пространства.

При постановке задачи синтеза комплексной системы фильтрации разности фаз, меняющейся во времени, обобщим описание (11) в виде

$$\frac{d\psi_\varphi}{dt} = \frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \left(\left(\mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{гpy}/\text{ин}} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{3/\text{ин}} \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{гpy},k}^{\text{ecef}}) \right) \mathbf{L}_{ab}^{\text{гpy}} \right) + v_\psi, \quad \frac{dv_\psi}{dt} = a_\psi(t), \quad \frac{da_\psi}{dt} = \xi_\psi(t), \quad (12)$$

где v_ψ – случайная составляющая скорости изменения разности фаз; a_ψ – случайная составляющая производной скорости изменения разности фаз.

Разобьем задачу синтеза комплексного алгоритма фильтрации разности фаз ψ_φ на две подзадачи: формирование оценок кватерниона $\mathbf{q}_{\text{гpy}}^{\text{ecef}}$ и синтез комплексного алгоритма фильтрации разности фаз ψ_φ при сформированном (известном) значении оценки $\tilde{\mathbf{q}}_{\text{гpy}}^{\text{ecef}}$. В качестве решения первой подзадачи воспользуемся алгоритмом, полученным в [3], описание которого для краткости не будем приводить в данной статье, а структурная схема, реализующая данный алгоритм, приведена на рис. 2.

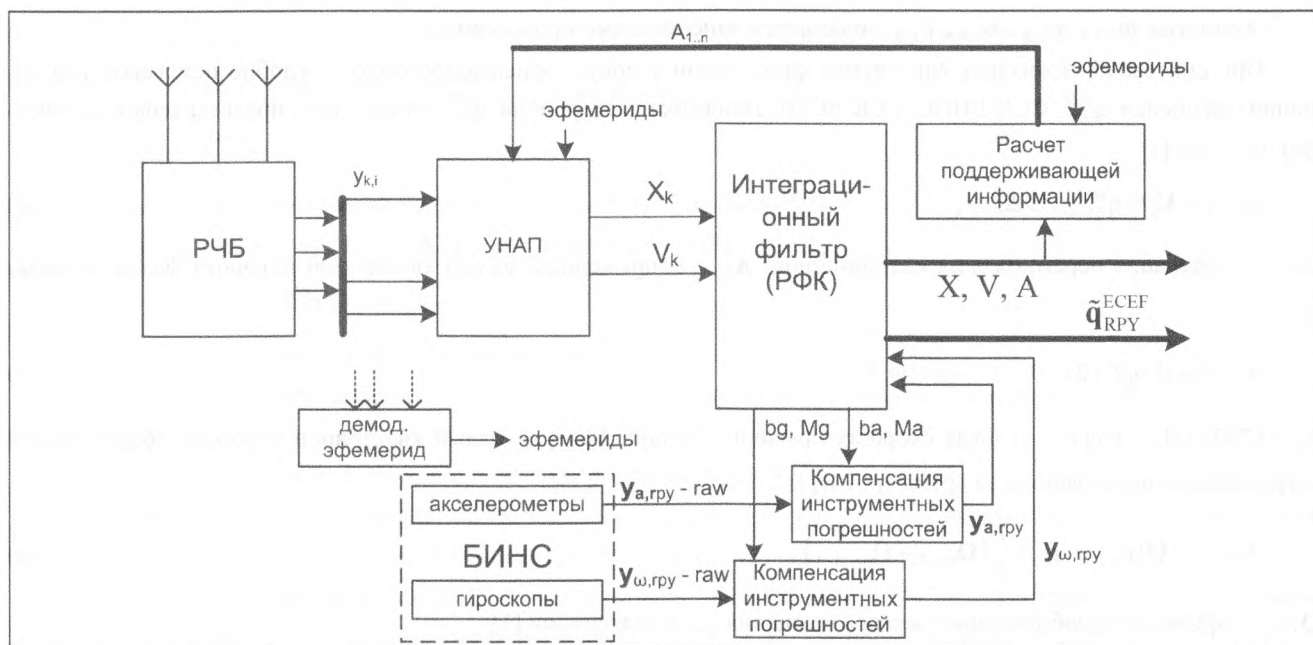


Рис. 2

Проведем синтез комплексного алгоритма фильтрации разности фаз ψ_ϕ при сформированном (известном) значении оценки $\tilde{\mathbf{q}}_{гpy}^{ecef}$.

Введем вектор $\mathbf{x}_\psi = [\psi_\phi \quad v_\psi \quad a_\psi]^T$, для которого запишем разностное уравнение

$$\mathbf{x}_{\psi,k} = \mathbf{B} + \mathbf{F}_\psi \mathbf{x}_{\psi,k-1} + \mathbf{G}_\psi \tilde{\xi}_{\psi,k-1}, \quad (13)$$

где $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\frac{\pi}{\lambda} \boldsymbol{\mu}^T \left(\mathbf{C}(\tilde{\mathbf{q}}_{гpy,k}^{ecef}) \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{гpy/ин} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{3/ин} \mathbf{C}(\tilde{\mathbf{q}}_{гpy,k}^{ecef}) \right) \mathbf{L}_{ab}^{гpy} \right]$, $\mathbf{F}_\psi = \begin{bmatrix} 1 & T_k & 0 \\ 0 & 1 & T_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{G}_\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\tilde{\xi}_{\psi,k-1}$ – ДБГШ с дисперсией

$D_{\tilde{\xi}_\psi}$.

Полагаем, что на вход системы обработки поступают наблюдения (4), соответствующие двум точкам приема: A и B .

При синтезе комплексной системы фильтрации разности фаз будем полагать \mathbf{B} известной функцией, в которой в качестве $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{гpy/ин}$ используется оценка

$$\hat{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{гpy/ин} = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\Omega}_{z,гpy,k-1} & \hat{\Omega}_{y,гpy,k-1} \\ \hat{\Omega}_{z,гpy,k-1} & 0 & -\hat{\Omega}_{x,гpy,k-1} \\ -\hat{\Omega}_{y,гpy,k-1} & \hat{\Omega}_{x,гpy,k-1} & 0 \end{bmatrix},$$

где (см. [2]) $\hat{\Omega}_{гpy,k} = \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_{x,гpy,k} & \hat{\Omega}_{y,гpy,k} & \hat{\Omega}_{z,гpy,k} \end{bmatrix}^T \approx (\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{m}}_{g,k}) (\mathbf{y}_{\omega,гpy,k} - \tilde{\mathbf{b}}_{g,k})$.

Для сформулированной постановки задачи, используя результаты [1, 3], запишем уравнения комплексной фильтрации вектора состояния $\mathbf{x}_{\psi,k}$:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\psi,k} = \tilde{\mathbf{x}}_{\psi,k} + \mathbf{K}_k u_{д,\psi,k}, \quad \tilde{\mathbf{x}}_{\psi,k} = \mathbf{B} + \mathbf{F}_\psi \hat{\mathbf{x}}_{\psi,k-1}, \quad (14)$$

где $u_{д,\psi,k}$ – процесс на выходе дискриминатора разности фаз, описываемый соотношением

$$u_{д,\psi,k} = \frac{\gamma}{X(T, \hat{\lambda})} \left[-\sin(2\tilde{\psi}_\phi) (I_{1,k} I_{2,k} + Q_{1,k} Q_{2,k}) + \cos(2\tilde{\psi}_\phi) (I_{1,k} Q_{2,k} - I_{2,k} Q_{1,k}) \right],$$

где

$$\begin{aligned}
 X^2(T, \tilde{\lambda}) &= X_c^2(\tilde{\lambda}_{k-1}) + X_s^2(\tilde{\lambda}_{k-1}), \\
 X_c(\lambda_{k-1}) &= (I_{1,k} + I_{2,k}) \cos(\psi_{k-1}) - (Q_{1,k} - Q_{2,k}) \sin(\psi_{k-1}), \\
 X_s(\lambda_{k-1}) &= (I_{1,k} - I_{2,k}) \sin(\psi_{k-1}) + (Q_{1,k} + Q_{2,k}) \cos(\psi_{k-1}), \\
 I_{1,k} &= \sum_{l=1}^M y_A(t_{k-1,l}) h_{\text{ДК}}(t - \tau_A) \cos(\omega_c t_{k-1,l} + (\omega_{\text{Д},k-1} + \omega_{\psi,k-1})(l-1)T_d), \\
 I_{2,k} &= \sum_{l=1}^M y_B(t_{k-1,l}) h_{\text{ДК}}(t - \tau_B) \cos(\omega_c t_{k-1,l} + (\omega_{\text{Д},k-1} + \omega_{\psi,k-1})(l-1)T_d), \\
 Q_{1,k} &= \sum_{l=1}^M y_A(t_{k-1,l}) h_{\text{ДК}}(t - \tau_A) \sin(\omega_c t_{k-1,l} + (\omega_{\text{Д},k-1} + \omega_{\psi,k-1})(l-1)T_d), \\
 Q_{2,k} &= \sum_{l=1}^M y_B(t_{k-1,l}) h_{\text{ДК}}(t - \tau_B) \sin(\omega_c t_{k-1,l} + (\omega_{\text{Д},k-1} + \omega_{\psi,k-1})(l-1)T_d),
 \end{aligned}$$

\mathbf{K}_i – вектор весовых коэффициентов, описываемый стандартными дисперсионными уравнениями Риккати [3]

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{D}_{\mathbf{x},k} \mathbf{c}^T, \quad \mathbf{D}_{\mathbf{x},k}^{-1} = \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},k}^{-1} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(\frac{\partial \ln L_k(\mathbf{c}\tilde{\mathbf{x}}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right)^T,$$

$L_k(\mathbf{c}\tilde{\mathbf{x}}_k)$ описан в [1]; $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ 0]$.

Схема комплексной системы фильтрации разности фаз (ССРФ) приведена на рис. 3.

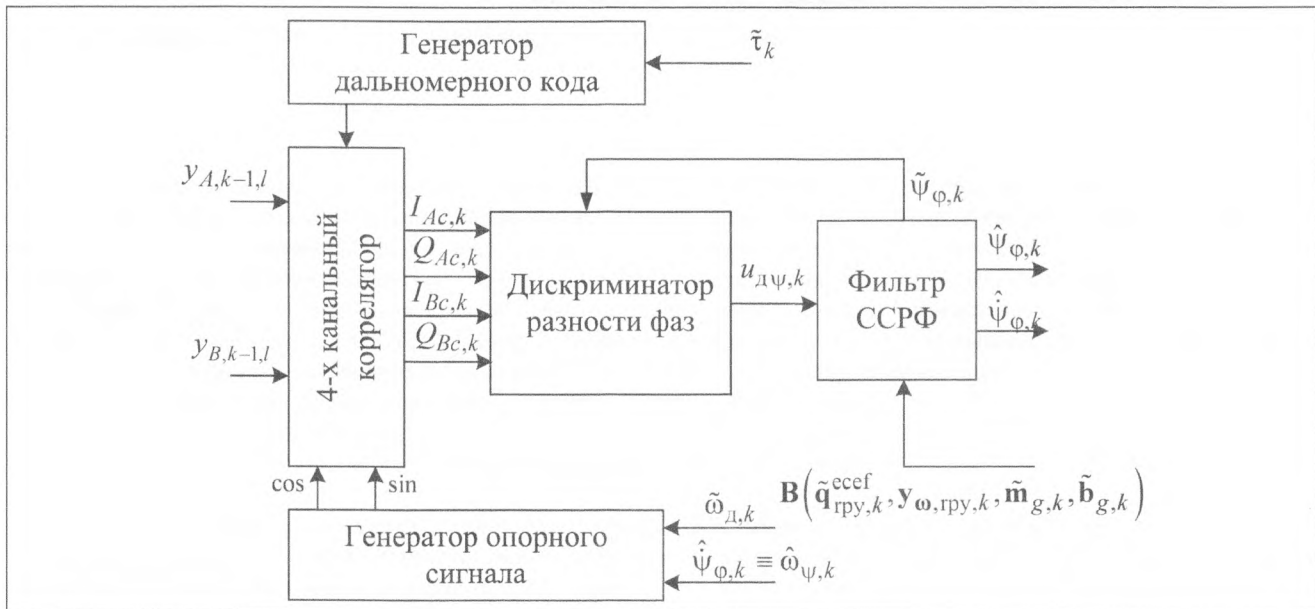


Рис. 3

В комплексной системе фильтрации разности фаз компенсируется динамическая составляющая вращения линии базы AB , что позволяет сузить полосу пропускания системы (до значений 0,1 Гц), а это приводит к существенному повышению помехоустойчивости системы фильтрации (на 8...12 дБ).

- Проведен синтез комплексного алгоритма фильтрации разности фаз навигационных сигналов, принимаемых в пространственно разнесенных точках, при наличии измерений инерциальной навигационной системы. Приведены структурные схемы комплексной системы фильтрации. Эта система фильтрации обеспечивает повышение точности определения углов ориентации и повышение помехоустойчивости на 8...12 дБ.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Издание 4-е. / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
2. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесносвязанный алгоритм комплексирования НАП СРНС и многоцелевой ИНС // Радиотехника. 2012. № 6. С. 118-125.
3. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника. 2003. 400 с.

Поступила 3 июля 2014 г.

Integrated filtering algorithm of phase difference of two space radio navigation signals with using of inertial sensors measurements

© Authors, 2014
© Radiotekhnika, 2014

A.I. PEROV – Dr.Sc. (Eng.), professor, Chief of Radio System Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Synthesis of an integrated filtering algorithm of phase difference of two space radio navigation signals received at spatial allocated points with using of inertial sensors measurements is performed. There is given block diagrams of the integrated filtering system. Integrated filtering algorithm provides with accuracy and noise resistance (by 8–12 dB) increase.

References

1. GLONASS. Principy' postroeniya i funkczionirovaniya. Izdanie 4-e. / pod red. A.I. Perova, V.N. Xarisova. M.: Radiotexnika. 2010. 800 s.
2. Shatilov A.Ju., Nagin I.A. Tesnosvyazannyj algoritm kompleksirovaniya NAP SRNS i mnogoczelevoj INS // Radiotexnika. 2012. № 6. S. 118-125.
3. Perov A.I. Statisticheskaya teoriya radiotexnicheskix sistem. M.: Radiotexnika. 2003. 400 s.