
УДК 629.7.054.07

Сильносвязанная многоантенная интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система

Б. С. Алешин, Д. А. Антонов, К. К. Веремеенко, М. В. Жарков

Аннотация

В статье приводятся результаты первого этапа исследования возможностей построения и основных свойств сильносвязанных инерциально-спутниковых навигационных систем, проводимого при поддержке РФФИ. Основной задачей первого этапа исследования являлась разработка теоретических основ построения интегрированной системы. Особенностью исследования является включение в состав системы многоантенного приемника ГНСС, позволяющего определять углы ориентации объекта.

Ключевые слова:

интегрированная навигационная система, инерциальная навигационная система, многоантенная спутниковая навигационная система, оптимальная обработка информации.

Постановка задачи

Интегрированные инерциально-спутниковые системы на сегодняшний день являются одним из наиболее перспективных средств навигации для широкого класса подвижных объектов. При этом интегрированные системы могут быть построены с использованием различных схем комплексирования, отличающихся глубиной интеграции спутниковой и инерциальной частей. По сложившейся классификации существуют следующие схемы комплексирования:

- раздельная схема;
- слабосвязанная схема;
- сильносвязанная схема;
- глубоко интегрированная схема.

Наиболее эффективным вариантом интеграции на сегодняшний день можно считать использование сильносвязанной схемы (рисунок 1).

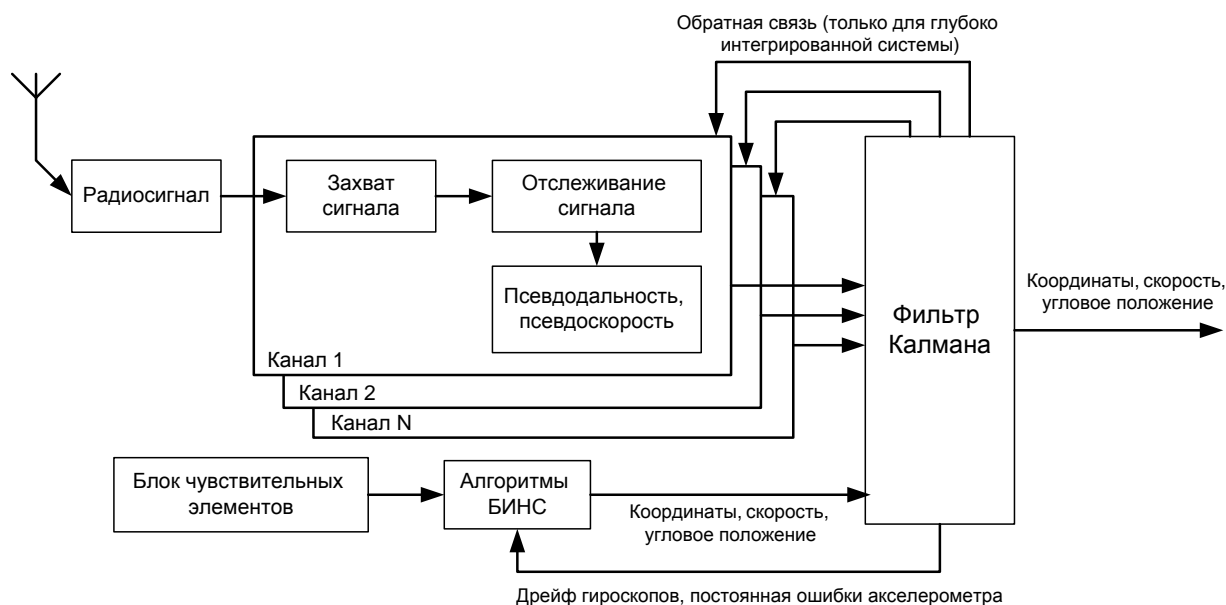


Рисунок 1 – Обобщенная схема сильносвязанной системы

Особенностью приведенной схемы является отсутствие в составе приемника фильтра Калмана. В сильносвязанной схеме приемник лишь обеспечивают состав измерений для общего вычислительного блока, в котором реализован единый фильтр Калмана. Измерения для фильтра в сильносвязанных системах строятся по разности псевдодальностей или/и скоростей изменения псевдодальностей, определенных, с одной стороны, в инерциальной навигационной системе (ИНС) по вычисленным координатам объекта и эфемеридам спутника, и измеренных приемником глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС), с другой стороны.

Особенности построения, преимущества и недостатки каждой из перечисленных схем достаточно подробно описаны в литературе [1]. При этом основная часть работ, посвященных созданию и исследованию сильносвязанных систем, предполагает интеграцию одноантенного приемника ГНСС и бесплатформенной ИНС (БИНС). Однако в последнее время активное развитие получили многоантенные приемники ГНСС, которые позволяют

получать дополнительную информацию об углах ориентации, на основе вычислений по измерениям фазы сигналов спутниковых навигационных систем.

Идея определения параметров ориентации с использованием спутниковых навигационных систем основана на том, что, измеряя разность дальностей от навигационного космического аппарата (НКА) до, в простейшем случае, двух антенн можно судить об угловом положении линии, соединяющей антенны и по устоявшейся терминологии называемой базовой линией или базой. Очевидно, что при такой постановке, задача определения параметров ориентации является задачей относительного позиционирования с тем ограничением, что при практической реализации принимающие антенны расположены на борту объекта (рисунок 2). При этом расстояния между антеннами значительно меньше расстояний от самих антенн до НИСЗ. Последний факт при решении задачи ориентации позволяет использовать интерферометрическую модель измерений, поэтому можно записать следующее соотношения для угла α , характеризующего угловое положение базы (рисунок 2):

$$\cos \alpha = \frac{\Delta\Phi_{12}^j}{B},$$

где $\Delta\Phi_{12}^j$ - разность дальностей от j -го спутника до антенны 2 и от того же спутника до антенны 1, B - длина базы (расстояние между антеннами 1 и 2).

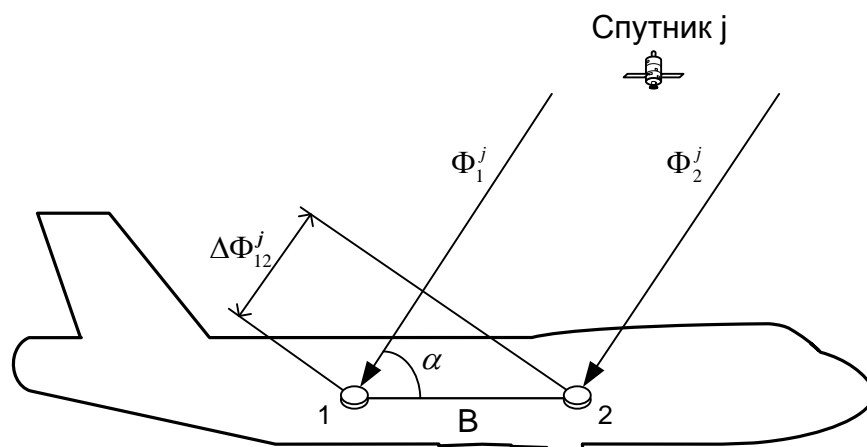


Рисунок 2 – Концепция определения параметров ориентации по сигналам СНС

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть возможность интеграции БИНС и многоантенного приемника ГНСС по сильносвязанной схеме. На текущем этапе стояла задача разработки теоретических основ построения интегрированной системы заявленного состава, а именно: вектора состояния оцениваемых параметров, состава измерений фильтра, структуры фильтра-оценителя, в том числе таких его элементов, как матрица динамики и измерений. В работе не рассматривается вопрос разрешения целочисленной неоднозначности в интегрированной системе. На следующем этапе работ предполагается провести имитационное и полунатурное моделирование разработанных алгоритмов.

Сильносвязанная схема комплексирования БИНС и многоантенного приемника ГНСС

Алгоритмы комплексной обработки информации (КОИ) современных интегрированных систем, как правило, строятся на использовании оптимального фильтра Калмана (ОФК). Уравнение динамики системы и уравнение измерений во временной области могут быть записаны в следующем виде [1]:

$$\dot{\bar{X}}(t) = F(t) \cdot \bar{X}(t) + B(t) \cdot \bar{U}(t) + G(t) \cdot \bar{W}(t)$$

$$\bar{Z}(t) = H(t) \cdot \bar{X}(t) + \bar{V}(t)$$

где $\bar{X}(t)$ - вектор состояния, определяемый принятой моделью погрешностей системы; $F(t)$ - матрица динамики системы; $B(t)$ - матрица управления; $\bar{U}(t)$ - вектор управляющих сигналов; $G(t)$ - матрица шумов системы; $\bar{W}(t)$ - вектор шумов системы; $\bar{Z}(t)$ - вектор измерений; $H(t)$ - матрица связи вектора состояния и вектора измерений; $\bar{V}(t)$ - вектор шумов измерений.

Основными отличиями при построении интегрированной системы по сильносвязанной схеме комплексирования по сравнению со слабосвязанной схемой являются: отсутствие в многоантенном ГНСС приёмнике реализации алгоритма решения навигационной задачи и задачи определения параметров ориентации; способ формирования измерений ОФК и наличие обратной связи между ОФК и алгоритмом слежения за сигналами ГНСС приёмника. На рисунке 3 представлен возможный вариант обобщенной схемы комплексирования БИНС и многоантенного ГНСС приемника при использовании сильносвязанной схемы.

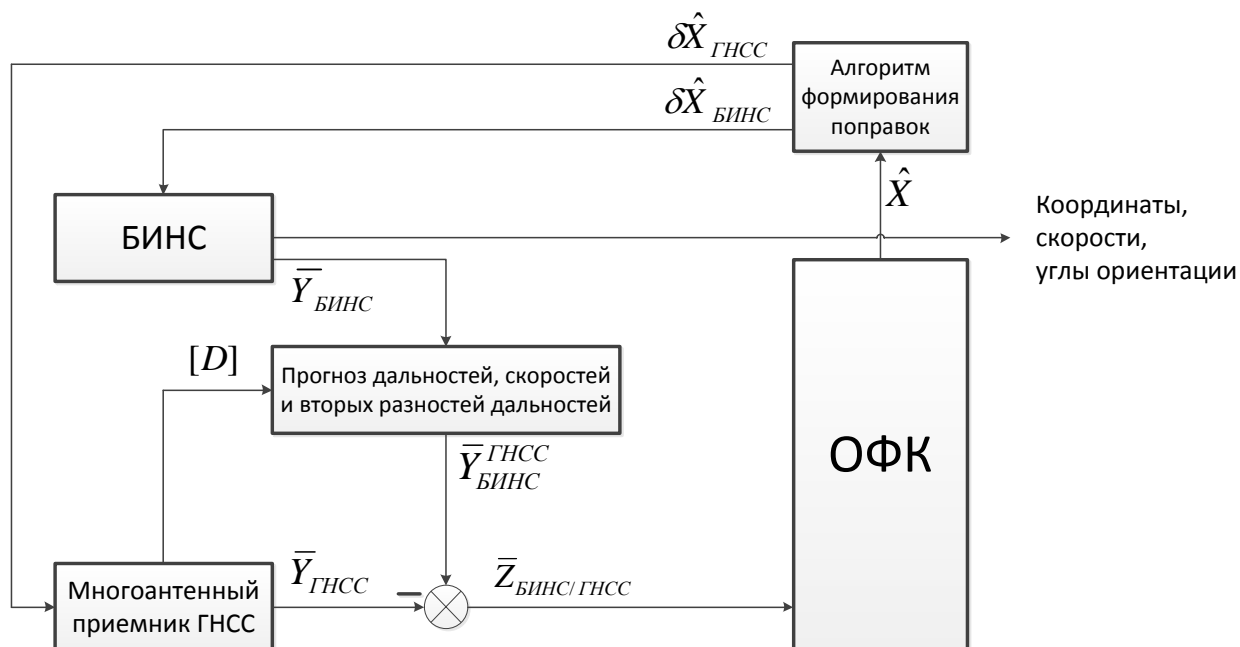


Рисунок 3 – Обобщенная схема комплексирования БИНС и многоантенного ГНСС приемника по сильносвязанной схеме

Вектор выходных параметров БИНС $\bar{Y}_{\text{БИНС}}$, используемых в ОФК, имеет следующий вид:

$$\bar{Y}_{\text{БИНС}}^T = \{\lambda_{\text{БИНС}} \quad \varphi_{\text{БИНС}} \quad h_{\text{БИНС}} \quad V_{e\text{БИНС}} \quad V_{n\text{БИНС}} \quad V_{h\text{БИНС}} \quad \psi_{\text{БИНС}} \quad \vartheta_{\text{БИНС}} \quad \gamma_{\text{БИНС}}\}$$

где $\lambda_{\text{БИНС}}$, $\varphi_{\text{БИНС}}$, $h_{\text{БИНС}}$ – долгота, широта и высота, вычисляемые БИНС; $V_{e\text{БИНС}}$, $V_{n\text{БИНС}}$, $V_{h\text{БИНС}}$ – восточная, северная и вертикальная проекции скорости, вычисляемые БИНС; $\psi_{\text{БИНС}}$, $\vartheta_{\text{БИНС}}$, $\gamma_{\text{БИНС}}$ – углы курса, тангажа и крена, вычисляемые БИНС.

Вектор выходных параметров приёмника ГНСС $\bar{Y}_{\text{ГНСС}}$ содержит информацию об измеренных базовой антенной кодовых псевдодальностях и псевдоскоростях, а также о вторых разностях фазовых измерений для всех антенн многоантенного приемника:

$$\bar{Y}_{\text{ГНСС}}^T = \{\rho_1^{\text{ГНСС}} \quad \rho_2^{\text{ГНСС}} \quad \dots \quad \rho_m^{\text{ГНСС}} \quad \dot{\rho}_1^{\text{ГНСС}} \quad \dot{\rho}_2^{\text{ГНСС}} \quad \dots \quad \dot{\rho}_m^{\text{ГНСС}} \quad \nabla\Delta\varphi_1^{\text{ГНСС}} \quad \nabla\Delta\varphi_2^{\text{ГНСС}} \quad \dots \quad \nabla\Delta\varphi_{m-1}^{\text{ГНСС}}\},$$

где m – количество НКА рабочего созвездия ГНСС.

Для формирования вектора измерений $\bar{Z}_{\text{БИНС/ГНСС}}$ необходимо вычислить на основании выходных параметров БИНС прогнозируемые дальности и скорости для базовой антенны ГНСС, а также вторые разности дальностей для всех антенн многоантенного приемника относительно всех НКА рабочего созвездия ГНСС. Эти вычисления осуществляются в блоке «Прогноз дальностей, скоростей и вторых разностей дальностей». На вход этого блока от приёмника ГНСС поступает массив данных [D] с координатами и скоростями или эфемеридами НКА рабочего созвездия, а от БИНС – информация о координатах точки места и проекциях путевой скорости.

$$\bar{Y}_{\text{БИНС}}^{\text{ГНСС}T} = \{\rho_1^{\text{БИНС}} \quad \rho_2^{\text{БИНС}} \quad \dots \quad \rho_m^{\text{БИНС}} \quad \dot{\rho}_1^{\text{БИНС}} \quad \dot{\rho}_2^{\text{БИНС}} \quad \dots \quad \dot{\rho}_m^{\text{БИНС}} \quad \nabla\Delta\varphi_1^{\text{БИНС}} \quad \nabla\Delta\varphi_2^{\text{БИНС}} \quad \dots \quad \nabla\Delta\varphi_{m-1}^{\text{БИНС}}\}$$

где m – количество НКА рабочего созвездия ГНСС.

Определение координат НКА и решение навигационной задачи осуществляется в геоцентрической гринвичской декартовой системе координат. Связь между гринвичскими

координатами точки места $R_1^{\text{БИНС}}, R_2^{\text{БИНС}}, R_3^{\text{БИНС}}$ и ее географическими сферическими координатами, вычисленными в БИНС, имеет вид:

$$\begin{aligned} R_1^{\text{БИНС}} &= (R' + h_{\text{БИНС}}) \cdot \cos(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \\ R_2^{\text{БИНС}} &= (R' + h_{\text{БИНС}}) \cdot \sin(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \\ R_3^{\text{БИНС}} &= ((1 - e^2) \cdot R' + h_{\text{БИНС}}) \cdot \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) \\ R' &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi_{\text{БИНС}})}} \end{aligned} \quad (1)$$

где a - большая полуось принятого референц-эллипсоида; e - эксцентриситет принятого референц-эллипсоида.

Связь между проекциями путевой скорости, вычисленными БИНС, в географической системе координат и проекциями относительной скорости БИНС в гринвичской декартовой системе $V_1^{\text{БИНС}}, V_2^{\text{БИНС}}, V_3^{\text{БИНС}}$ определяется соотношением:

$$\begin{bmatrix} V_1^{\text{БИНС}} \\ V_2^{\text{БИНС}} \\ V_3^{\text{БИНС}} \end{bmatrix} = [A_{\Gamma}^{\text{H}}]^T \cdot \begin{bmatrix} V_{e_{\text{БИНС}}} \\ V_{n_{\text{БИНС}}} \\ V_{h_{\text{БИНС}}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$[A_{\Gamma}^{\text{H}}] = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_{\text{БИНС}}) & \cos(\lambda_{\text{БИНС}}) & 0 \\ -\cos(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) & -\sin(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) & \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \\ \cos(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) & \sin(\lambda_{\text{БИНС}}) \cdot \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) & \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) \end{bmatrix}$$

Прогнозируемая дальность до i -ого НКА ГНСС, вычисленная на основании координат НКА в декартовой гринвичской системе координат $R_{1_i}^{\text{ГНСС}}, R_{2_i}^{\text{ГНСС}}, R_{3_i}^{\text{ГНСС}}$ и координат БИНС, определяется соотношением вида:

$$\rho_i^{\text{БИНС}} = \sqrt{(R_{1_i}^{\text{ГНСС}} - R_1^{\text{БИНС}})^2 + (R_{2_i}^{\text{ГНСС}} - R_2^{\text{БИНС}})^2 + (R_{3_i}^{\text{ГНСС}} - R_3^{\text{БИНС}})^2},$$

где $i = \overline{1, m}$ – порядковый номер измерения НКА в рабочем созвездии ГНСС.

Прогнозируемая (вычисленная) радиальная скорость относительного движения по линии «БИНС - i -ый НКА ГНСС» может быть определена следующим образом:

$$\dot{\rho}_i^{\text{БИНС}} = \frac{1}{\rho_i^{\text{БИНС}}} \sum_{j=1}^3 [(R_{j_i}^{\text{ГНСС}} - R_j^{\text{БИНС}}) \cdot (V_j^{\text{ГНСС}} - V_j^{\text{БИНС}})]$$

где $i = \overline{1, m}$ – порядковый номер измерения НКА в рабочем созвездии ГНСС; $V_{1_i}^{\text{ГНСС}}, V_{2_i}^{\text{ГНСС}}, V_{3_i}^{\text{ГНСС}}$ – проекции вектора относительной скорости НКА в гринвичской декартовой системе координат.

Прогнозируемые значения вторых разностей дальностей могут быть вычислены следующим образом:

$$\nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}} = -\nabla C_i^T A_{\Gamma}^H A_{\text{H}}^C X_i^C,$$

где ∇C_i^T – разность направляющих косинусов базового и i -го спутника; A_{Γ}^H – матрица пересчета между нормальной (горизонтной) и геоцентрической системами координат (2); A_{H}^C – матрица пересчета из связанной в нормальную систему координат, параметризованная с помощью углов курса, крена и тангажа; X_i^C – вектор-база между антеннами в связанной системе координат. Матрица A_{Γ}^H рассчитывается на основе вычисленных БИНС широты и долготы. Матрица A_{H}^C рассчитывается на основе вычисленных БИНС значений углов курса, крена и тангажа.

Таким образом, вектор измерений $\bar{Z}_{\text{БИНС/ГНСС}}$ формируется как разница векторов $\bar{Y}_{\text{БИНС}}^{\text{ГНСС}}$ и $\bar{Y}_{\text{ГНСС}}$:

$$\bar{Z}_{\text{БИНС/ГНСС}} = \begin{bmatrix} \{\rho_1^{\text{БИНС}} - \rho_1^{\text{ГНСС}} & \rho_2^{\text{БИНС}} - \rho_2^{\text{ГНСС}} & \dots & \rho_m^{\text{БИНС}} - \rho_m^{\text{ГНСС}}\}^T \\ \{\dot{\rho}_1^{\text{БИНС}} - \dot{\rho}_1^{\text{ГНСС}} & \dot{\rho}_2^{\text{БИНС}} - \dot{\rho}_2^{\text{ГНСС}} & \dots & \dot{\rho}_m^{\text{БИНС}} - \dot{\rho}_m^{\text{ГНСС}}\}^T \\ \nabla \Delta \varphi_1^{\text{БИНС}} - \nabla \Delta \varphi_1^{\text{ГНСС}} & \nabla \Delta \varphi_2^{\text{БИНС}} - \nabla \Delta \varphi_2^{\text{ГНСС}} & \dots & \nabla \Delta \varphi_m^{\text{БИНС}} - \nabla \Delta \varphi_{m-1}^{\text{ГНСС}} \end{bmatrix}$$

В оцениваемый ОФК вектор состояния системы $\bar{X}_{\text{БИНС/ГНСС}}$ предлагается включить погрешности, так называемой, двухканальной БИНС (с исключенным вертикальным каналом), погрешности датчиков БИНС, а также погрешности, связанные с приемником ГНСС. В таком случае вектор состояния примет вид:

$$\bar{X}^T_{\text{БИНС/ГНСС}} = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z, \Delta K_{\Omega_X}, \Delta K_{\Omega_Y}, \Delta K_{\Omega_Z}, \Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z, \\ \Delta K_{n_X}, \Delta K_{n_Y}, \Delta K_{n_Z}, \\ \delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{СНС}} \\ \dot{\delta\rho}_{\Delta\tau}^{\text{СНС}} \end{array} \right\}$$

где x_1, x_2 - ошибки определения координат БИНС, связанные с ошибками определения долготы и широты, соответственно:

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta\lambda \cdot \rho_2 \cdot \cos(\varphi) \\ x_2 &= \delta\varphi \cdot \rho_1 \end{aligned}$$

φ - текущая широта; ρ_1, ρ_2 - радиусы кривизны, соответственно, меридионального и перпендикулярного ему сечений; x_3, x_4 - ошибки в определении скорости изменения координат БИНС, связанные с ошибками определения восточной δV_E и северной δV_N составляющими путевой скорости:

$$\begin{aligned} x_3 &= \delta V_E + \left(\frac{V_h}{\rho_2} + \Omega_E \cdot \text{tg}(\varphi) \right) \cdot x_1 + \Omega_H \cdot x_2 \\ x_4 &= \delta V_N + \frac{V_h}{\rho_1} \cdot x_1, \end{aligned}$$

где значения вычисленных проекций абсолютной угловой скорости определяются соотношением:

$$\Omega_E = \frac{-V_N}{\rho_1}$$

$$\Omega_N = \frac{V_E}{\rho_2} + u \cdot \cos(\varphi)$$

$$\Omega_H = \frac{V_E}{\rho_2} \cdot \text{tg}(\varphi) + u \cdot \sin(\varphi),$$

u - угловая скорость вращения Земли;

α, β, γ - ошибки ориентации вычисленной БИНС базовой системы координат, которые могут быть представлены в виде:

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\beta = \beta_2 - \beta_1$$

$$\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$$

где для траектории общего вида:

$$\alpha_1 = -\frac{x_2}{\rho_1}$$

$$\beta_1 = \frac{x_1}{\rho_2}$$

$$\gamma_1 = \frac{x_1}{\rho_2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{-\sin(\psi)}{\cos(\nu)} \right) \cdot \delta\nu + (\sin(\gamma) \cdot \cos(\psi) + \cos(\gamma) \cdot \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}(\nu)) \cdot \delta\psi +$$

$$+(\cos(\gamma) \cdot \cos(\psi) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}(\nu)) \cdot \delta\gamma$$

$$\beta_2 = \left(\frac{\cos(\psi)}{\cos(\nu)} \right) \cdot \delta\nu + (\sin(\gamma) \cdot \sin(\psi) - \cos(\gamma) \cdot \cos(\psi) \cdot \operatorname{tg}(\nu)) \cdot \delta\psi +$$

$$+(\cos(\gamma) \cdot \sin(\psi) + \sin(\gamma) \cdot \cos(\psi) \cdot \operatorname{tg}(\nu)) \cdot \delta\gamma$$

$$\gamma_2 = \cos(\gamma) \cdot \delta\psi - \sin(\gamma) \cdot \delta\gamma$$

где ψ, ν, γ - текущие углы истинного курса, тангажа и крена; $\delta\psi, \delta\nu, \delta\gamma$ - погрешности определения углов ориентации алгоритма БИНС.

$\Delta\Omega_x, \Delta\Omega_y, \Delta\Omega_z$ - проекции постоянных составляющих погрешностей датчиков угловых скоростей (ДУС) на оси связанной системы координат; $\Delta K_{\Omega_x}, \Delta K_{\Omega_y}, \Delta K_{\Omega_z}$ - ошибки масштабных коэффициентов ДУС в проекции на оси связанной системы координат; $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ - постоянные составляющие ошибок акселерометров в проекции на оси связанной системы координат; $\Delta K_{n_x}, \Delta K_{n_y}, \Delta K_{n_z}$ - ошибки масштабных коэффициентов акселерометров в проекции на связанные оси; $\delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{ЧНС}}$ - уход часов приёмника; $\delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^{\text{ЧНС}}$ - ошибка определения радиальной скорости, вызванная наличием скорости ухода часов приёмника.

Матрицы динамики F и шумов системы G могут быть сформированы на основе модели погрешностей БИНС, представленной например в [2].

Формирование измерений предложенной схемы ОФК требует определения матрицы связи $[H]_{\text{БИНС/ГНСС}}$ между вектором измерений $\bar{Z}_{\text{БИНС/ГНСС}}$ и вектором состояния системы $\bar{X}^T_{\text{БИНС/ГНСС}}$, а также определения вектора шумов измерений $\bar{V}_{\text{БИНС/ГНСС}}$.

Матрица $[H]_{\text{БИНС/ГНСС}}$ формируется на базе принятой модели кодовых, доплеровских и фазовых измерений приёмника ГНСС с использованием уравнений связи систем координат (1) и (2) по параметрам БИНС – $\lambda^{\text{БИНС}}, \varphi^{\text{БИНС}}, V_E^{\text{БИНС}}, V_N^{\text{БИНС}}, \psi^{\text{БИНС}}, \nu^{\text{БИНС}}, \gamma^{\text{БИНС}}$, соответственно:

$$\frac{\partial \rho_i^{\text{БИНС}}}{\partial \lambda^{\text{БИНС}}} = \frac{1}{\rho_i^{\text{БИНС}}} (R' + h_{\text{БИНС}}) \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) [\sin(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{1_i}^{\text{СНС}} - R_1^{\text{БИНС}}) - \cos(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{2_i}^{\text{СНС}} - R_2^{\text{БИНС}})] \delta \lambda^{\text{БИНС}}$$

$$\frac{\partial \rho_i^{\text{БИНС}}}{\partial \varphi^{\text{БИНС}}} = \frac{1}{\rho_i^{\text{БИНС}}} \cdot [\cos(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{1_i}^{\text{СНС}} - R_1^{\text{БИНС}}) R^{\text{тп}} - \sin(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{2_i}^{\text{СНС}} - R_2^{\text{БИНС}}) R^{\text{тп}} - (R_{3_i}^{\text{СНС}} - R_3^{\text{БИНС}}) (1 - e^2) \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \left(\left(R' + \frac{h_{\text{БИНС}}}{(1-e^2)} \right) + \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) \frac{\partial R'}{\partial \varphi^{\text{БИНС}}} \right)] \delta \varphi^{\text{БИНС}}$$

$$R^{\text{тп}} = \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) (R' + h_{\text{БИНС}}) - \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \frac{\partial R'}{\partial \varphi^{\text{БИНС}}}$$

$$\frac{\partial R'}{\partial \varphi^{\text{БИНС}}} = \frac{a \cdot e^2 \cdot \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) \cdot \sin(\varphi_{\text{БИНС}})}{(1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi_{\text{БИНС}}))^{3/2}}$$

$$\frac{\partial \dot{\rho}_i^{\text{БИНС}}}{\partial V_E^{\text{БИНС}}} = \frac{1}{\rho_i^{\text{БИНС}}} [\sin(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{1_i}^{\text{СНС}} - R_1^{\text{БИНС}}) - \cos(\lambda_{\text{БИНС}}) (R_{2_i}^{\text{СНС}} - R_2^{\text{БИНС}})] \delta V_E^{\text{БИНС}}$$

$$\frac{\partial \dot{\rho}_i^{\text{БИНС}}}{\partial V_N^{\text{БИНС}}} = \frac{1}{\rho_i^{\text{БИНС}}} [\cos(\lambda_{\text{БИНС}}) \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) (R_{1_i}^{\text{СНС}} - R_1^{\text{БИНС}}) + \sin(\lambda_{\text{БИНС}}) \sin(\varphi_{\text{БИНС}}) (R_{2_i}^{\text{СНС}} - R_2^{\text{БИНС}}) - \cos(\varphi_{\text{БИНС}}) (R_{3_i}^{\text{СНС}} - R_3^{\text{БИНС}})] \delta V_N^{\text{БИНС}}$$

$$\frac{\partial \nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}}}{\partial \lambda_{\text{БИНС}}} = - \frac{\partial \nabla C_i^T}{\partial \lambda_{\text{БИНС}}} \frac{\partial A_{\Gamma}^H}{\partial \lambda_{\text{БИНС}}} A_{\text{H}}^{\text{C}} X_i^{\text{C}}$$

$$\frac{\partial \nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}}}{\partial \varphi_{\text{БИНС}}} = - \frac{\partial \nabla C_i^T}{\partial \varphi_{\text{БИНС}}} \frac{\partial A_{\Gamma}^H}{\partial \varphi_{\text{БИНС}}} A_{\text{H}}^{\text{C}} X_i^{\text{C}}$$

$$\frac{\partial \nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}}}{\partial \psi_{\text{БИНС}}} = - \nabla C_i^T A_{\Gamma}^H \frac{\partial A_{\text{H}}^{\text{C}}}{\partial \psi_{\text{БИНС}}} X_i^{\text{C}}$$

$$\frac{\partial \nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}}}{\partial \nu_{\text{БИНС}}} = - \nabla C_i^T A_{\Gamma}^H \frac{\partial A_{\text{H}}^{\text{C}}}{\partial \nu_{\text{БИНС}}} X_i^{\text{C}}$$

$$\frac{\partial \nabla \Delta \varphi_i^{\text{БИНС}}}{\partial \gamma_{\text{БИНС}}} = - \nabla C_i^T A_{\Gamma}^H \frac{\partial A_{\text{H}}^{\text{C}}}{\partial \gamma_{\text{БИНС}}} X_i^{\text{C}}$$

Элементы матрицы $[H]_{\text{БИНС/ГНСС}}$ связи погрешностей часов приёмника ГНСС $\delta \rho_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$, $\delta \dot{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$ и измерений ОФК определяются на основе моделей измерений псевдодальностей и псевдоскоростей, и имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_i^{\text{СНС}}}{\partial \delta \rho_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}} = \delta \rho_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$$

$$\frac{\partial \rho_i^{\text{СНС}}}{\partial \delta \dot{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}} = -\delta \dot{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$$

Заключение

В статье приводятся результаты первого этапа исследования возможностей построения и основных свойств сильносвязанных интегрированных инерциально-

спутниковых навигационных систем. Особенностью исследования является включение в состав системы многоантенного приемника ГНСС, позволяющего определять углы ориентации объекта. На первом этапе стояла задача разработки теоретических основ построения интегрированной системы заявленного состава, а именно: вектора состояния оцениваемых параметров, состава измерений фильтра, структуры фильтра-оценителя, в том числе таких его элементов, как матрица динамики и измерений. В работе не рассматривается вопрос разрешения целочисленной неоднозначности в интегрированной системе. На следующем этапе работ предполагается провести имитационное и полунатурное моделирование разработанных алгоритмов.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ №11-08-00515-а.

Библиографический список

1. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов./ Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 562 с. – ISBN 978-5-9221-1168-3.
2. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б.С. Алешина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.

Сведения об авторах:

Алешин Борис Сергеевич, заведующий кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., член корреспондент РАН, МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.:499-158-43-59

Антонов Дмитрий Александрович, инженер Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-48-71; e-mail: d_antonov@sitc-mai.ru

Веремеенко Константин Константинович, доцент, заместитель декана, доцент, Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-40-78;

e-mail: k_veremeenko@sitc-mai.ru

Жарков Максим Витальевич, старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-48-71; e-mail: m_zharkov@sitc-mai.ru.