

ТОЧНАЯ ВЫСТАВКА БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ КАЧКИ

Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, А.В. Козлов, И.А. Папуша

Рассматривается задача выставки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС), входящей в состав навигационного комплекса автономного подводного аппарата (АПА) совместно с датчиками дополнительной навигационной информации – гидроакустическим датчиком дальности до наводного маяка с известными координатами, лагом и глубиномером. Задача выставки состоит в определении (оценивании) значений углов истинного курса, крена и дифферента при помощи показаний инерциальных датчиков – ньютонометров (акселерометров), датчиков угловой скорости (ДУС) или гироскопов. Особенностью задачи служит наличие качки корпуса БИНС, вызванной волнением моря. При этом предполагается, что линейные перемещения БИНС незначительны. Для решения задачи выставки в условиях качки используется алгоритм позиционной коррекции БИНС на основе фильтра Калмана в варианте введения обратных связей в навигационный алгоритм. Описаны математические модели алгоритма. Приводятся результаты тестирования алгоритма с использованием реальных данных БИНС на стенде в эксперименте, имитирующем качку.

Ключевые слова: бескарданная инерциальная навигационная система, выставка БИНС, выставка БИНС на подвижном основании, выставка БИНС в условиях морской качки, уравнения ошибок БИНС, фильтр Калмана.

Введение

Автономные подводные аппараты (АПА) являются инструментом для решения множества научных и прикладных задач в исследовании и освоении океана. Они используются для морской геологической разведки, изучения подводной обстановки, экологического мониторинга водной среды, а также в военных целях.

АПА способны погружаться на заданную глубину в определенном районе океана, следовать по заданной траектории, выполнять необходимые работы и возвращаться на обеспечивающее судно после завершения программы. Ценность данных, предоставляемых подводным аппаратом, напрямую зависит от точности их навигационной привязки.

В состав навигационного комплекса АПА входит бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС) среднего класса точности. Задача навигации

АПА решается на основе комплексной обработки информации (КОИ), в которой БИНС корректируется при помощи информации о дальности до специального гидроакустического маяка, скоростной информации от лага, информации о глубине погружения, доставляемой глубиномером [12]. Основой алгоритма оценивания служит калмановская фильтрация.

Как известно, режиму навигации БИНС предшествует режим выставки, необходимый для инициализации навигационного счисления и определяющий, во многом, точность последующей навигации. Для БИНС, установленных на АПА, такой режим проходит в условиях качки, что определяет особенности построения алгоритма выставки.

Проблемам повышения точности и сокращения времени начальной выставки БИНС на подвижном морском объекте в условиях качки посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов, лишь отдельные примеры среди этого множества –

публикации [2–7]. Обилие подходов связано как с привлечением разнообразной внешней информации – позиционной и скоростной информации [2], данных мультантенной спутниковой аппаратуры [3], величины отстояния инерциального модуля от центра качания объекта [4] и т.п., так и с применением различных алгоритмов нелинейной фильтрации [5–7].

В данной работе предполагается использование позиционной информации, а задача выставки ставится как задача оценки позиционных, скоростных ошибок и ошибок определения ориентации БИНС при помощи линейного фильтра Калмана в варианте введения обратных связей в алгоритм навигации. При этом не требуется какое-либо начальное приближение для величины курса.

Итак, предполагается, что на этапе выставки доступна информация о координатах АПА, доставляемая, например, приемником глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в то время, когда АПА находится в надводном положении. Процесс выставки разделяется на 2 этапа – этап грубой выставки, не требующий начальных приближений параметров и как раз определяющий эти начальные приближения для этапа точной выставки, и этап точной выставки, основанный на коррекции навигационного счисления БИНС при помощи позиционной информации. Начальными условиями такого счисления являются оценки на этапе грубой выставки, а алгоритм коррекции строится в варианте обратных связей в навигационный алгоритм [11] для предотвращения расходимости из-за грубости или отсутствия начального приближения.

В работе приводятся математические модели алгоритма. Для тестирования алгоритма используются данные БИНС, полученные на стенде в эксперименте, имитирующем качку. Представлены результаты обработки данных, демонстрирующие работоспособность алгоритма.

Используются представления об инерциальной навигации, изложенные в [1]. Широко известные факты соответствующей теории приводятся без пояснений. Основные принципы работы и устройства АПА описаны в [8].

■ Структура навигационного комплекса АПА

Навигационная система автономного подводного аппарата (АПА) включает в себя следующие элементы:

- гидроакустический датчик дальности до надводного маяка с известными координатами;

- лаг;
- глубиномер;
- блок чувствительных элементов — датчики угловой скорости (ДУС) и ньютонометры.

Кроме того, АПА оснащены приемниками глобальных спутниковых навигационных систем ГНСС. Эти приёмники могут работать только в надводном положении и значительно упрощают поиск АПА после всплытия.

В Институте проблем морских технологий ДВО РАН применительно к малогабаритным АПА для навигации разработана система, в состав которой входят автономные подводный и водный аппараты (АПА и АНВА), а также оборудование берегового центра управления [9]. Гидроакустическая навигационная система позволяет обмениваться пакетами навигационных сигналов между АПА и АНВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними.

Предполагается, что основой бортовой навигационной системы АПА служит БИНС, а входящие в состав навигационного комплекса гидроакустический датчик, лаг, глубиномер служат средствами дополнительной информации для коррекции ошибок навигационного решения БИНС.

В качестве БИНС рассматривается система среднего класса точности на основе волоконнооптических гироскопов (ВОГ) с систематическими дрейфами на уровне десятых долей град/ч.

■ Постановка задачи

Основной задачей выставки является определение ориентации приборного трехгранника БИНС с целью инициализации алгоритмов навигации и ориентации. Наиболее распространенным условием выставки в различных приложениях является неподвижное основание. В данном случае предполагается, что выставка осуществляется в условиях качки и известны координаты объекта – либо априорно, либо по данным спутниковой навигационной системы. Также предполагается, что осуществлено «грубое горизонтирование», т.е. определены начальные приближения для углов крена и дифферента. Такие приближения можно получить при помощи, например, алгоритмов конусной выставки, которые не требуют неподвижности приборного трехгранника [10]. Считается, что для угла курса начального приближения нет.

Алгоритм выставки строится на основе трех блоков:

- навигационное счисление и решение задачи ориентации с начальными условиями с этапа

- грубой выставки;
- оценка ошибок БИНС при помощи позиционной информации с использованием фильтра Калмана;
- компенсация оценок и введение обратных связей в алгоритм навигации и ориентации.

В качестве алгоритма оценки используется простой для реализации линейный фильтр Калмана с введением обратных связей в навигационный алгоритм [11].

Математическое описание задачи

При описании моделей будем следовать терминологии и обозначениям, принятым в [1]. Приборной основой БИНС служит блок из трех ньютонометров и трех датчиков угловых скоростей, жестко связанных с корпусом объекта. Их оси чувствительности близки к осям трехгранника $Mz_1^0 z_2^0 z_3^0$, называемого приборным, точка M – приведенная чувствительная масса блока ньютонометра. В проекциях на оси приборного трехгранника измеряется внешняя сила f_{z^0} и его абсолютная угловая скорость ω_{z^0} :

$$f_{z^0}' = f_{z^0} + \Delta f_{z^0}, \quad \omega_{z^0}' = \omega_{z^0} - v_{z^0},$$

где f_{z^0}', ω_{z^0}' – результат измерений инерциальных датчиков, $\Delta f_{z^0} = (\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}, \Delta f_{z3})^T$ – вектор погрешности измерений ньютонометров, $v_{z^0} = (v_{z1}, v_{z2}, v_{z3})^T$ – вектор погрешности измерений ДУС.

Собственные инструментальные погрешности каждого из ньютонометров включают в себя систематическую составляющую $-\Delta f_{z^0}^0 = (\Delta f_{z1}^0, \Delta f_{z2}^0, \Delta f_{z3}^0)^T$ и высокочастотную составляющую $\Delta f_{z^0}^s = (\Delta f_{z1}^s, \Delta f_{z2}^s, \Delta f_{z3}^s)^T$, которая считается белым шумом. С учетом сказанного, вектор инструментальных погрешностей $\Delta f_{z^0}' = f_{z^0}' - f_{z^0}$ имеет следующий вид:

$$\Delta f_{z^0}' = \Delta f_{z^0}^0 + \Delta f_{z^0}^s.$$

Погрешности ДУС представляются аналогично: $v_{z^0} = v_{z^0}^0 + v_{z^0}^s$, где $v_{z^0}^0 = (v_{z1}^0, v_{z2}^0, v_{z3}^0)^T$, $v_{z^0}^s = (v_{z1}^s, v_{z2}^s, v_{z3}^s)^T$.

Такая модель инструментальных погрешностей принимается в алгоритмах комплексной обработки информации при навигации АПА. В алгоритме выставки систематические погрешности не учитываются, инструментальные погрешности считаются случайными процессами – белыми шумами.

Далее опишем трехгранники (системы координат), используемые в алгоритме.

Гринвичский трехгранник $O\eta$ жестко связан с вращающейся Землей. Ось $O\eta_3$ – ось вращения Земли, плоскость $O\eta_1\eta_2$ совпадает с плоскостью экватора, плоскость $O\eta_1\eta_3$ – плоскость гринвичского меридиана.

Опорный трехгранник Mx^0 , ориентированный в географической координатной сетке: ось Mx_3^0 – направление географической вертикали, Mx_1^0 – касается параллели и направлена на Восток, Mx_2^0 – лежит в плоскости меридиана и направлена на Север. Ориентация произвольного географического трехгранника Mx относительно Mx^0 определяется азимутальным углом χ : переход от Mx^0 к Mx осуществляется поворотом против часовой стрелки на угол χ вокруг оси Mx_3 .

Матрица ориентации $B_{x\eta}$ географического трехгранника Mx относительно гринвичского $O\eta$ имеет вид:

$$B_{x\eta} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \chi + & -\sin \lambda \sin \varphi \sin \chi + & \cos \varphi \sin \chi \\ + \cos \lambda \sin \varphi \sin \chi & + \cos \lambda \cos \chi & \\ \sin \lambda \sin \chi - & -\sin \lambda \sin \varphi \cos \chi - & \cos \varphi \cos \chi \\ - \cos \lambda \sin \varphi \cos \chi & - \cos \lambda \sin \chi & \\ \cos \lambda \cos \varphi & \sin \lambda \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix},$$

где φ, λ – географические широта и долгота точки M .

Компоненты матрицы ориентации $C_{x^0x} = C_{xz^0}^T$ приборного трехгранника Mz^0 относительно опорного Mx зависят от углов ориентации корпуса объекта, именно угла курса K , крена θ , дифферента ψ :

$$C_{xz^0} = \begin{pmatrix} \cos K_g \cos \theta + & \sin K_g \cos \psi & \cos K_g \sin \theta - \\ + \sin K_g \sin \psi \sin \theta & & - \sin K_g \sin \psi \cos \theta \\ - \sin K_g \cos \theta + & \cos K_g \cos \psi & - \sin K_g \sin \theta - \\ + \cos K_g \sin \psi \sin \theta & & - \cos K_g \sin \psi \cos \theta \\ - \cos \psi \sin \theta & \sin \psi & \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix},$$

где $K_g = K + \chi$.

Модельный трехгранник My^0 – числовой образ приборного трехгранника Mz^0 . В нем $\omega_{y^0} = \omega_{z^0}'$ – абсолютная угловая скорость, информация о которой доставляется ДУС. В дальнейшем все модельные параметры отмечаются верхним индексом «штрих». Вектор малого поворота β_{y^0} определяет ориентацию My^0 относительно Mz^0 .

Квазимодельный трехгранник My является числовым образом опорного трехгранника Mx . В проекциях на оси квазимодельного трехгранника в бортовом вычислителе определяются скорости

модельной точки M' , а из матрицы ориентации $B'_{x\eta}$ вычисляются её географические координаты. C'_{xz^0} – матрица ориентации модельного трехгранника Mu^0 относительно Mu . Вектор малого поворота β_y в осях квазимодельного трехгранника примет вид $\beta_x = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T = C'_{xz^0} \beta_{y^0}$. Векторы погрешностей измерений $v_x = (v_1, v_2, v_3)^T = C'_{xz^0} v_z$, $\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = C'_{xz^0} \Delta f_{z^0}$.

Навигационное счисление и решение задачи ориентации осуществляется на основе уравнений, записанных в осях географического трехгранника Mx со свободной ориентацией в азимуте [1]:

$$\begin{aligned}\dot{V}'_1 &= (\Omega'_3 + 2u'_3)V'_2 - (\Omega'_2 + 2u'_2)V'_3 + f'_1, \\ \dot{V}'_2 &= -(\Omega'_3 + 2u'_3)V'_1 + (\Omega'_1 + 2u'_1)V'_3 + f'_2, \\ \dot{V}'_3 &= -(2u'_1 + \Omega'_1)V'_2 + (2u'_2 + \Omega'_2)V'_1 + f'_3 - g + k_2(h' - h^*), \\ \dot{h}' &= V'_3 + k_1(h' - h^*),\end{aligned}$$

здесь V'_1, V'_2, V'_3 – компоненты вектора относительной линейной скорости V'_{x*} модельной точки M' , $f'_x = (f'_1, f'_2, f'_3)^T = C'_{xz^0} f_{z^0}$, h^* – высота по данным ГНСС, либо $h^* = 0$, $\Omega'_x = (\Omega'_1, \Omega'_2, \Omega'_3)^T$ – относительная угловая скорость трехгранника Mu :

$$\Omega'_1 = -\frac{V'_2}{R_E} - \frac{e^2}{a} b'_{23} [b'_{13} V'_1 + b'_{23} V'_2],$$

$$\Omega'_2 = \frac{V'_1}{R_E} + \frac{e^2}{a} b'_{13} [b'_{13} V'_1 + b'_{23} V'_2],$$

$$\Omega'_3 = 0,$$

b'_{ij} – компоненты матрицы $B'_{x\eta}$, $u'_x = (u'_1, u'_2, u'_3)^T$ – вектор угловой скорости вращения Земли в осях трехгранника Mx , определяемый как $u'_x = (0, u \cos \varphi', u \sin \varphi')^T$, e^2 и a – квадрат первого эксцентриситета и большая полуось земного эллипсоида, R_E, R_N – радиусы кривизны меридионального сечения и первого вертикала:

$$R_E = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi'}}, \quad R_N = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi')^{3/2}}.$$

Численное решение задачи ориентации БИНС основывается на решении уравнений Пуассона:

$$\dot{B}'_{x\eta} = \hat{\Omega}'_x B'_{x\eta},$$

$$\dot{C}'_{xz^0} = \hat{\omega}'_{z^0} C'^T_{xz^0} - C'^T_{xz^0} (\hat{u}'_x + \hat{\Omega}'_x).$$

где индекс $\hat{}$ обозначает кососимметрическую матрицу, составленную по определенному правилу из компонент соответствующего вектора, например, для

вектора $u'_x = (u'_1, u'_2, u'_3)^T$

$$\hat{u}'_x = \begin{pmatrix} 0 & u'_3 & -u'_2 \\ -u'_3 & 0 & u'_1 \\ u'_2 & -u'_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В данном алгоритме автономной навигации выходные параметры – автономные координаты, углы курса, крена и дифферента – определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}\lambda' &= \arctg \frac{b'_{32}}{b'_{31}}, \quad \varphi' = \arctg \frac{b'_{33}}{\sqrt{b'^2_{12} + b'^2_{23}}}, \quad \chi' = \arctg \frac{b'_{13}}{b'_{23}}, \\ K' &= \arctg \frac{c'_{21}}{c'_{22}}, \quad \theta' = -\arctg \frac{c'_{31}}{c'_{33}}, \quad \psi' = \arctg \frac{c'_{32}}{\sqrt{c'^2_{33} + c'^2_{31}}}.\end{aligned}$$

Для описания поведения ошибок БИНС используется модель *уравнений ошибок* в комбинированной форме [1]. В уравнениях участвуют следующие переменные: $\Delta y_1, \Delta y_2$ – полные ошибки местоположения; $\delta V_1, \delta V_2$ – динамические ошибки определения составляющих относительной скорости; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – кинематические ошибки определения ориентации. Уравнения ошибок имеют следующий вид:

$$\Delta \dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3 V'_2,$$

$$\Delta \dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V'_1,$$

$$\delta \dot{V}_1 = 2u_3 \delta V_2 - 2u_2 \delta V_3 - \omega_0^2 \Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1^s,$$

$$\delta \dot{V}_2 = -2u_3 \delta V_1 + 2u_1 \delta V_3 - \omega_0^2 \Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2^s,$$

$$\dot{\beta}_1 = u_3 \beta_2 - u_2 \beta_3 + v_1^s,$$

$$\dot{\beta}_2 = -u_3 \beta_1 + u_1 \beta_3 + v_2^s,$$

$$\dot{\beta}_3 = u_2 \beta_1 - u_1 \beta_2 + v_3^s,$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/a} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ 1/сек – частота Шулера, g – номинальное значение ускорения силы тяжести. Ввиду малости параметры относительного движения не учитываются.

Для оценки ошибок БИНС используется информация о координатах либо от ГНСС, либо известная из других источников.

Пусть (λ^M, φ^M) – географические координаты точки M по данным ГНСС. Измерения формируются как разности численных координат и известных:

$$z_1 = \Delta y_1 = \Delta r_\varphi \sin \chi' + \Delta r_\lambda \cos \chi' + \rho_1^s,$$

$$z_2 = \Delta y_2 = \Delta r_\varphi \cos \chi' - \Delta r_\lambda \sin \chi' + \rho_2^s,$$

$$\Delta r_\varphi = (\varphi' - \varphi^M) R_N,$$

$$\Delta r_\lambda = (\lambda' - \lambda^M) R_E \cos \varphi',$$

ρ_1^s, ρ_2^s – высокочастотные погрешности – белые шумы.

Вектор состояния динамической системы включает в себя компоненты:

$$x = (\Delta y_1, \Delta y_2, \delta V_1, \delta V_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3)^T,$$

вектор коррекции: $z = (z_1, z_2)^T$. Таким образом, поставлена задача оценки вектора состояния при помощи вектора коррекции, линейно зависящего от компонент вектора измерений, для ее решения используется алгоритм фильтра Калмана.

При решении задачи КОИ на основе фильтра Калмана определяются оценки $\Delta \tilde{y}_1^{\pm}, \Delta \tilde{y}_2^{\pm}, \delta \tilde{V}_1^{\pm}, \delta \tilde{V}_2^{\pm}, \tilde{\beta}_1^{\pm}, \tilde{\beta}_2^{\pm}, \tilde{\beta}_3^{\pm}$ ошибок БИНС. С помощью оценок формируются *коррекционные поправки* к выходной информации БИНС:

$$\Delta \tilde{\varphi}^+ = \frac{\Delta \tilde{y}_1^+ \sin \chi' + \Delta \tilde{y}_2^+ \cos \chi'}{R_N},$$

$$\Delta \tilde{\lambda}^+ = \frac{\Delta \tilde{y}_1^+ \cos \chi' - \Delta \tilde{y}_2^+ \sin \chi'}{R_E \cos \varphi'},$$

$$\tilde{\varphi} = \varphi' - \Delta \tilde{\varphi}^+, \quad \tilde{\lambda} = \lambda' - \Delta \tilde{\lambda}^+,$$

$$\tilde{V}_1 = V_1' - \delta \tilde{V}_1^+, \quad \tilde{V}_2 = V_2' - \delta \tilde{V}_2^+,$$

$$\tilde{K} = K' - \Delta \tilde{\lambda}^+ \sin \varphi' - \tilde{\beta}_3^+ - \frac{(\sin K'_g \tilde{\alpha}_1^+ + \cos K'_g \tilde{\alpha}_2^+) \sin \psi'}{\cos \psi'},$$

$$\tilde{K}'_g = K'_g - \tilde{\beta}_3^+ - \frac{(\sin K'_g \tilde{\alpha}_1^+ + \cos K'_g \tilde{\alpha}_2^+) \sin \psi'}{\cos \psi'},$$

$$\tilde{\theta} = \theta' + \frac{\sin K'_g \tilde{\alpha}_1^+ + \cos K'_g \tilde{\alpha}_2^+}{\cos \psi'},$$

$$\tilde{\psi} = \psi' + (\cos K'_g \tilde{\alpha}_1^+ - \sin K'_g \tilde{\alpha}_2^+),$$

$$\text{где } \tilde{\alpha}_1 = \frac{\Delta \tilde{y}_2^+}{a} + \tilde{\beta}_1^+, \quad \tilde{\alpha}_2 = -\frac{\Delta \tilde{y}_1^+}{a} + \tilde{\beta}_2^+.$$

Обратные связи в алгоритм навигации вводятся путем реинициализации алгоритма навигации и ориентации полученными скорректированными параметрами и одновременным обнулением оценок вектора состояния $x_i^+ = 0, i = 1, \dots, 7$.

■ Исходные данные для тестирования

Алгоритм выставки был применен к данным БИНС, полученным в эксперименте на стенде.

План эксперимента включал в себя гармонические колебания по крену и дифференту с амплитудой 5 градусов и периодом 11 с. Курс платформы не ме-

нялся во время всего эксперимента. Колебания осуществлялись в течение 5 мин, далее основание было неподвижным относительно Земли. Весь эксперимент длился 15 мин.

Для оценки точности выставки от стенда были использованы углы ориентации платформы в неподвижном состоянии, которые представляли собой эталонную информацию. Это позволило избежать необходимости синхронизации данных, полученных от БИНС и стенда.

На рис. 1, 2 представлены размерные показания ДУС и акселерометров.

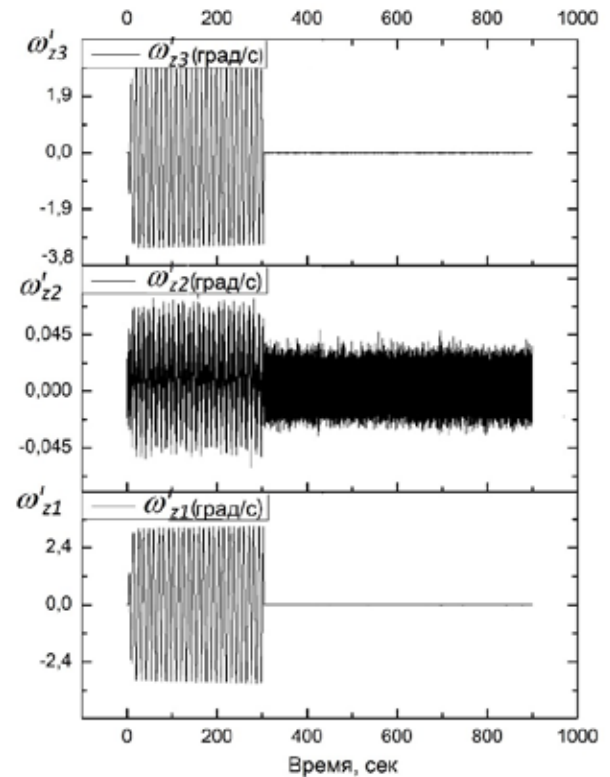


Рис. 1. Показания ДУС в эксперименте

Характеристики погрешностей датчиков следующие:

- систематические погрешности ДУС – 0.2 град/ч, СКО шумовой составляющей – 0.003 град/с на частоте 400 Гц;
- систематические погрешности акселерометров – 0.005 м/с², СКО шумовой составляющей – 0.02 м/с² на частоте 400 Гц.

Приведем численные значения параметров фильтра Калмана, принятые при моделировании:

Начальная матрица ковариаций.

$$P_0 = S_0^2, \quad S_0 = \text{diag}(\sigma_{\Delta y_1}, \sigma_{\Delta y_2}, \sigma_{\delta V_1}, \sigma_{\delta V_2}, \sigma_{\beta_1}, \sigma_{\beta_2}, \sigma_{\beta_3}) = \text{diag}\left(1 \text{ м}, 1 \text{ м}, 0.1 \text{ м/с}, 0.1 \text{ м/с}, 0.1 \text{ м/с}, 0.0015, \right) = \text{diag}\left(0.0015, 3, 5\right)$$

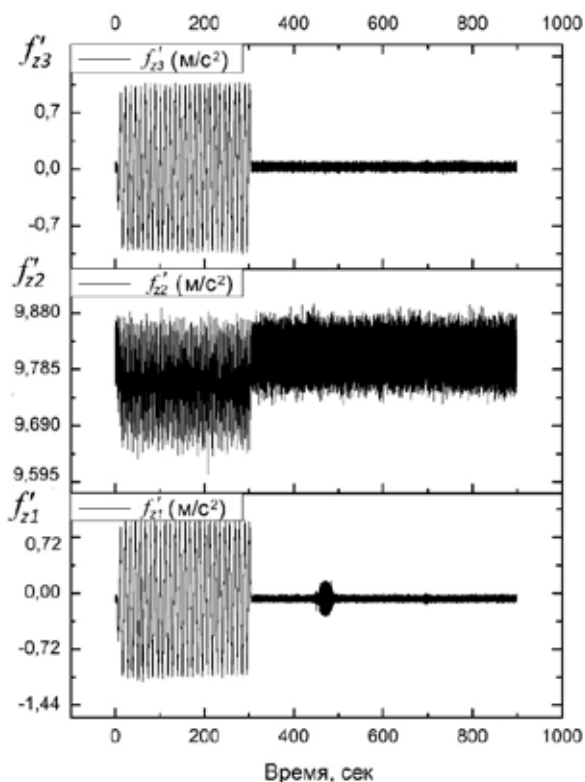


Рис. 2. Показания акселерометров в эксперименте

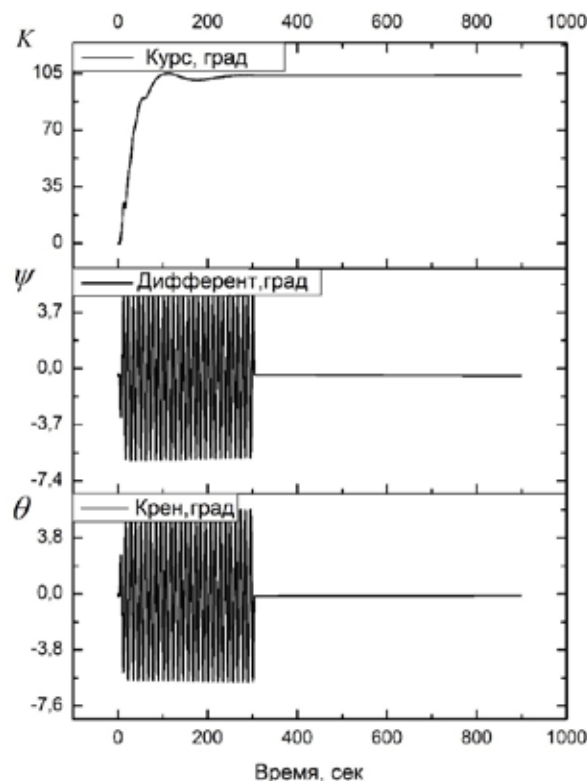


Рис. 3. Оценки углов ориентации – курса, дифферента, крена

Параметры шумов датчиков:

$$\sigma_{v^s} = 0.1 \text{ град} / \sqrt{\text{Гц}}, \quad \sigma_{\Delta f^s} = 0.0001 \text{ м} / \text{с}^2 \sqrt{\text{Гц}},$$

Параметры шумов измерений:

$$\sigma_{\rho^s} = 1 \text{ м}.$$

Время выставки задано равным 5 мин. В эксперименте это интервал времени, когда совершались колебания, далее система переводилась в автономную навигацию.

■ Результаты тестирования

В результате обработки данных эксперимента получены оценки параметров ориентации БИНС – углы крена, дифферента, курса. Графики оценок углов показаны на рис. 3.

Ошибка угла курса относительно референсного значения после 100 с от начала выставки показана на рис. 4.

Моделирование показало, что ошибки оценок углов ориентации, полученные при помощи алгоритма выставки, составили десятые доли градуса, что приемлемо для систем среднего класса точности. Таким образом, результаты тестирования подтверждают эффективность данного алгоритма выставки.

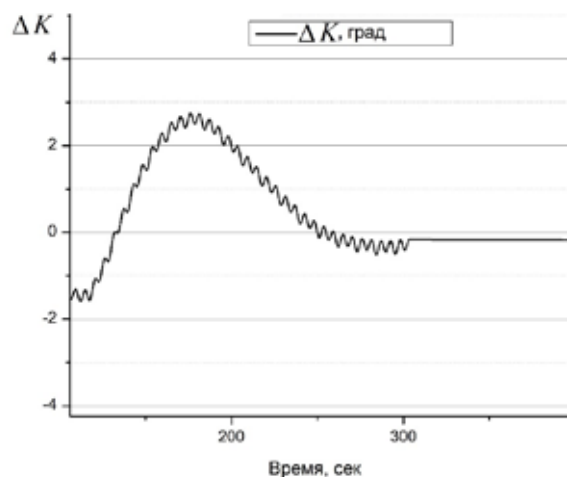


Рис. 4. Ошибка оценки угла курса относительно референсного значения

■ Заключение

Разработан алгоритм выставки, предназначенный для подготовки к навигации БИНС в составе оборудования АПА. Алгоритм основан на оценке ошибок БИНС при помощи позиционной информации. В качестве алгоритма оценки используется линейный фильтр Калмана в режиме обратных связей, легко реализуемый как в постобработке, так и в реальном

времени. Представлены математические модели алгоритма.

Продemonстрирована работа алгоритма выставки на данных, полученных в стендовом эксперименте, имитирующем качку.

Ошибки выставки, определенные в сравнении с эталонными параметрами, приемлемы для систем подобного класса. Они позволяют обеспечить высокоточную навигацию АПА при функционировании

системы в режиме коррекции от средств, входящих в навигационный комплекс АПА. Точность выставки достигается за короткое время – 5 мин.

Таким образом, показана работоспособность представленного алгоритма выставки в условиях качки.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. М.: Изд-во МГУ, 2020. 164 с.
2. Емельянец Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А. О начальной выставке корабельной БИНС в условиях качки // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, №3 (110). С. 3–17.
3. Hirokawa R., Ebinuma T. A Low-Cost Tightly Coupled GPS/INS for Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas, Navigation //: Journal of The Institute of Navigation. 2009. Vol. 56, No. 1. P. 35–44.
4. Андреев А.Г., Ермаков В.С., Мафтер М.Б. Модифицированный алгоритм начальной выставки режима приведения МИМСНис «Кама-НС-В» // XXVII Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. С-Пб., 2020.
5. Dmitriyev S.E., Stepanov O.A., Shepel S.V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1997. Vol. 33, No. 1. P. 260–272.
6. Yuan D., Ma X., Liu Y., Zhang C. Dynamic initial alignment of the MEMS-based low-cost SINS for AUV based on unscented Kalman filter // OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485669.
7. Zhang L., Zhou H., Gao Y. An in-motion alignment method of AUV SINS/DVL navigation system based on FGO // Measurement. 2023. Vol. 222, № 30. P. 113578. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113578>
8. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 397 с.
9. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 59–65.
10. Баранцев Г.О., Голован А.А., Кузнецов П.Ю. Модели задачи начальной выставки бескарданной инерциальной навигационной системы при угловом движении основания // Вестн. Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2021. № 5. С. 52–56.
11. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. К вопросу об информационно эквивалентных схемах в корректируемых инерциальных навигационных системах // Изв. Российской академии наук. Механика твердого тела. 2008. № 3. С. 90–101.
12. Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Субханкулова Г.А. Навигация автономного подводного аппарата при помощи корректируемой бескарданной инерциальной навигационной системы // Тр. МАИ: Электронный журнал. 2016. № 89Б. URL: <http://www.trudymai.ru>

Справка об авторах

ВАВИЛОВА Нина Борисовна, к.ф.-м.н, ведущий научный сотрудник лаборатории управления и навигации Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 52.

Научные интересы: теория корректируемых систем инерциальной навигации, теория спутниковых навигационных систем, методы и алгоритмы обработки информации, разработка программного обеспечения.

E-mail: nb-vavilova@yandex.ru.

Scopus ID: 14071882800

ГОЛОВАН Андрей Андреевич, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией управления и навигации Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 52.

Научные интересы: теория корректируемых систем инерциальной навигации, теория спутниковых навигационных систем, методы и алгоритмы обработки информации, задачи авиационной гравиметрии.

Тел.: +7 (495) 939-59-33.

E-mail: aagolovan@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-5628-248X

Scopus ID: 6602901884

КОЗЛОВ Александр Владимирович, к.ф.-м.н, ведущий научный сотрудник лаборатории управления и навигации Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 52.

Научные интересы: спутниковая навигация, инерциальная навигация, системы управления, теоретическая и прикладная механика.

E-mail: a.kozlov@navlab.ru

ORCID: 0009-0000-0247-8487

Scopus ID: 56352800100

ПАПУША Ирина Анатольевна, к.ф.-м.н, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории управления и навигации Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 52.

Научные интересы: теория корректируемых систем инерциальной навигации, теория спутниковых навигационных систем, методы и алгоритмы обработки информации, разработка программного обеспечения.

E-mail: ipapusha@yandex.ru.

Scopus ID: 14071950400

A FINE ALIGNMENT OF A STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM, WHICH IS PART OF THE NAVIGATION COMPLEX OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE AND IN PITCHING CONDITIONS

N.B. Vavilova, A.A. Golovan, A.V. Kozlov, I.A. Papusha

The problem of initial alignment for a strapdown inertial navigation system (INS), which is part of the navigation complex for an autonomous underwater vehicle (AUV), is being considered. INS also uses the following sensors for its aided navigation: a hydroacoustic sensor that measures the distance to a floating beacon with known coordinates, as well as a lag and depth sensor. The goal of the INS alignment problem is to accurately determine (estimate) the values of attitude angles such as heading, roll and trim using readings from inertial sensors: accelerometers, angular velocity sensors (ARC) or gyroscopes. A special features of the problem under consideration is the presence of pitching conditions caused by sea waves. It is assumed that the linear motions of the INS are insignificant. To solve the problem of the alignment in pitching conditions, the INS positional aiding algorithm is used in feedback mode. This algorithm is based on the Kalman filtering.

Keywords: strapdown inertial navigation system (INS), INS alignment, INS alignment on a moving base, INS alignment in pitching conditions, INS error equations, the Kalman filter.

References

1. Vavilova N.B., Golovan A.A., Parusnikov N.A. *Matematicheskie osnovy navigatsionnykh sistem*. M.: Izd-vo MGU, 2020. 164 s. [In Russ.]
2. Emel'yancev G.I., Stepanov A.P., Blazhnov B.A. O nachal'noj vystavke korabel'noj BINS v usloviyah kachki // *Giroskopiya i navigatsiya*. 2020. T. 28, №3 (110). S. 3–17. [In Russ.]
3. Hirokawa R., Ebinuma T. A Low-Cost Tightly Coupled GPS/INS for Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas, *Navigation // Journal of The Institute of Navigation*. 2009. Vol. 56, No. 1. P. 35–44.
4. Andreev A.G., Ermakov V.S., Mafter M.B. Modificirovannyi algoritim nachal'noj vystavki rezhima privedeniya MIMSNiS «Kama-NS-V» // XXVII Sankt-Peterburgskaya mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam. S-Pb, 2020. [In Russ.]
5. Dmitriyev S.E., Stepanov O.A., Shepel S.V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997. Vol. 33, No. 1. P. 260–272.
6. Yuan D., Ma X., Liu Y., Zhang C. Dynamic initial alignment of the MEMS-based low-cost SINS for AUV based on unscented Kalman filter // *OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485669.
7. Zhang L., Zhou H., Gao Y. An in-motion alignment method of AUV SINS/DVL navigation system based on FGO // *Measurement*. 2023. Vol. 222, № 30. P. 113578. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113578>
8. Ageev M.D. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii*. M.: Nauka, 2005. 397 s. [In Russ.]
9. Vaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Kushnerik A.A., Tufanov I.E., Shcherbatyuk A.F. Malogabaritnyy avtonomnyy neobitaemyy podvodnyy apparat MARK novogo pokoleniya dlya vypolneniya gruppovykh operatsij // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2012. № 6. S. 59–65. [In Russ.]
10. Barancev G.O., Golovan A.A., Kuznecov P.Ju. Modeli zadachi nachal'noj vystavki beskar-dannoj inercial'noj navigatsionnoy sistemy pri uglovom dvizhenii osnovaniya // *Vestn. Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika*. 2021. № 5. S. 52–56. [In Russ.]
11. Vavilova N.B., Golovan A.A., Parusnikov N.A. K voprosu ob informatsionno jekvivalentnykh shemah v korrektriruemykh inercial'nykh navigatsionnykh sistemah // *Izv. Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*. 2008. № 3. S. 90–101. [In Russ.]
12. Vavilova N.B., Parusnikov N.A., Subhankulova G.A. Navigatsiya avtonomnogo podvodnogo apparata pri pomoshhi korrektriruemoj beskar-dannoj inercial'noj navigatsionnoy sistemy // *Tr. MAI: Jelektronnyj zhurnal*. 2016. № 89B. URL: <http://www.trudymai.ru>. [In Russ.]

Recommended citation:

Vavilova N.B., Golovan A.A., Kozlov A.V., Papusha I.A. A FINE ALIGNMENT OF A STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM, WHICH IS PART OF THE NAVIGATION COMPLEX OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE AND IN PITCHING CONDITIONS. *UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS*. 2025. No. 2 (52). P. 72–80. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_07. EDN: XFQBQR.

Information about the authors

VAVILOVA Nina B., PhD, Leading Researcher at the Laboratory of Control and Navigation

Name of institution: Lomonosov Moscow State University.

Work address: Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-52, Leninskiye Gory.

Research Interests: The theory of aided inertial navigation systems, the theory of Global Satellite Navigation Systems, data processing methods and algorithms, software development.

E-mail: nb-vavilova@yandex.ru.

Scopus ID: 14071882800

GOLOVAN Andrey A., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Head of Laboratory of Control and Navigation

Name of institution: Lomonosov Moscow State University.

Work address: Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-52, Leninskiye Gory.

Research Interests: The theory of aided inertial navigation systems, the theory of Global Satellite Navigation Systems, data processing methods and algorithms, software development, airborne gravimetry problem.

Phone: +7 (495) 939-59-33.

E-mail: .aagolovan@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-5628-248X

Scopus ID: 6602901884

KOZLOV Aleksandr V., PhD, Leading Researcher at the Laboratory of Control and Navigation

Name of institution: Lomonosov Moscow State University.

Work address: Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-52, Leninskiye Gory.

Research Interests: Satellite navigation, inertial navigation, control systems, theoretical and applied mechanics.

E-mail: a.kozlov@navlab.ru

ORCID: 0009-0000-0247-8487

Scopus ID: 56352800100

PAPUSHA Irina A., PhD, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Control and Navigation

Name of institution: Lomonosov Moscow State University.

Work address: Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-52, Leninskiye Gory.

Research Interests: The theory of aided inertial navigation systems, the theory of Global Satellite Navigation Systems, data processing methods and algorithms, software development.

E-mail: ipapusha@yandex.ru.

Scopus ID: 14071950400

