
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.2

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Б. А. БЛАЖНОВ, А. В. ЛОЧЕХИН, А. П. СТЕПАНОВ

ВЫРАБОТКА КУРСА ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Рассматривается задача определения параметров ориентации объекта при интеграции данных инерциального измерительного модуля на микромеханических датчиках и мультиантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы при запуске интегрированной системы ориентации и навигации в условиях подвижного объекта, которая сводится к задаче начальной выставки и калибровки измерительного модуля. Приведены результаты обработки данных переходных испытаний опытного образца (разработка ЦНИИ „Электроприбор“).

Ключевые слова: микромеханические инерциальные датчики, интегрированная система ориентации и навигации, спутниковая навигационная система.

Введение. В работе [1] рассматривались схема построения и алгоритмы работы бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках для применения в системах навигации подводных аппаратов. Было показано, что для реализации режима начальной выставки и калибровки коэффициентов модели дрейфов электростатического гироскопа в условиях подвижного объекта необходимо привлечение эталонных данных о параметрах ориентации (по курсу и углам качки). Требуемые значения параметров ориентации при надводном положении подводного аппарата вырабатываются в рамках интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) при совместной обработке данных инерциального измерительного модуля (ИИМ) на микромеханических датчиках (ММД) и мультиантенной приемной аппаратуры (ПА) спутниковой навигационной системы (СНС).

Решение задачи определения углов качки при интеграции данных ИИМ на ММД и ПА СНС не представляет особой сложности [2], достаточно информации о скоростных измерениях от ПА СНС. Проблемой является выработка курса с требуемой точностью вследствие значительного уровня погрешностей (порядка 0,1—0,01 °/с) микромеханических гироскопов (ММГ). Для ее преодоления в настоящее время и привлекается мультиантенная ПА СНС с фазовыми измерениями.

Существуют различные схемы построения ПА СНС с фазовыми измерениями и разнесенными антеннами, например, интегрированная система Seapath 200 [3] норвежской фирмы Seatex AS для морских судов, которая использует мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте. Из отечественных разработок следует выделить аналогичную ПА СНС МРК-11 (разработка Красноярского государственного технического университета и НИИ радиотехники).

В современных GPS-компасах используется автономная выработка параметров ориентации объекта с определенной дискретностью. При этом требуется решение проблемы неоднозначности фазовых измерений. Известны различные способы решения данной проблемы [4, 5]. Все они требуют одновременной обработки фазовых измерений от группировки навигационных спутников (НС), а также достаточно сложного программного обеспечения. В предлагаемой работе проблема неоднозначности фазовых измерений ПА СНС решается с опорой на данные ИИМ на ММД.

Постановка задачи, исходные положения. Рассмотрим задачу определения параметров ориентации объекта при интеграции данных ИИМ на ММД и мультантенной ПА СНС при запуске ИСОН в условиях подвижного объекта, которая сводится к задаче начальной выставки и калибровки ИИМ. При оценке точности ИСОН используются реальные данные мореходных испытаний ИИМ на ММД и мультантенной ПА СНС.

В состав ИСОН входят ИИМ на ММД (разработки ЦНИИ „Электроприбор“) приемники СНС (ОАО „РИРВ“ и фирмы Ashtech). Бескарданный ИИМ (рис. 1) состоит из корпуса, платы чувствительных элементов (ЧЭ), на которой размещены гироскопы и акселерометры фирмы Analog Devices (ADXRS150 и ADXL105): ММГ с дрейфом уровня $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$ и ММА с уровнем погрешности $0,03 \text{ м/с}^2$, обеспечивающая электроника, а также платы, содержащей контроллер на базе сигнального процессора TMS320F2812, осуществляющего обработку навигационной информации.

Первые и вторые разности фазовых измерений ПА СНС формируются с помощью двух пространственно разнесенных антенн (опорной A_0 и A_1) и двух подключенных к ним приемников Ashtech G12 и „Котлин“.

Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителе ИИМ, позволяют решать задачи ориентации и навигации с частотой 100 Гц при поступлении данных от ПА СНС с частотой до 10 Гц. Алгоритмы реального времени, реализованные в приемниках СНС, позволяют решать задачу определения координат, скорости и времени по сигналам СНС с частотой 1 Гц. Для решения в ИСОН задачи ориентации объекта измерения фазы сигнала от обоих приемников СНС осуществлялись на частоте 10 Гц. Сигнал с частотой 1 Гц из Ashtech G12 подавался в ИИМ для обеспечения синхронизации информационных потоков.

Алгоритмическое обеспечение задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС
Скоростные измерения:

$$z_{V_i}(t_{k+1}) = [\nabla S_i^u(t_{k+1}) - \nabla S_i^c(t_{k+1})] / dT, \quad (1)$$

где $\nabla S_i^c(t_{k+1})$, $i = E, N, H$ — приращения декартовых координат объекта в проекциях на географические оси, измеряемые в доплеровском канале ПА СНС с интервалом

$dT = t_{k+1} - t_k = 1 \text{ с}$; $\nabla S_i^u(t_{k+1}) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} V_i^u(\tau) d\tau$ — приращения декартовых координат, вычисляемые по данным ИИМ о составляющих вектора линейной скорости V_i^u движения объекта, приведенных к точке размещения на объекте опорной A_0 антенны ПА СНС.

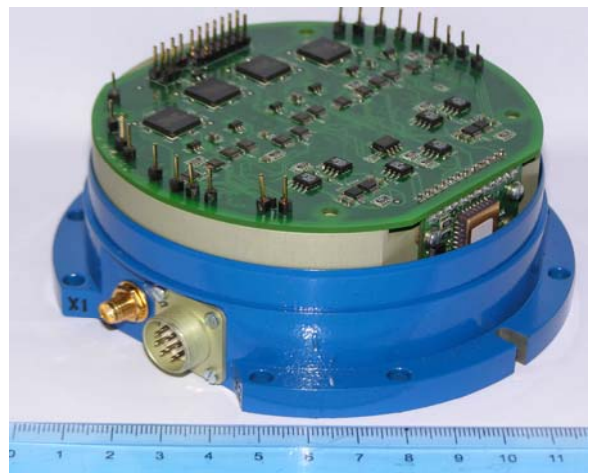


Рис. 1

Соотношения (1) могут быть приведены к виду:

$$z_{V_i}(t_{k+1}) = \Delta V_i(t_k + dT/2) - \delta \left[\nabla S_i^c(t_{k+1}) \right] / dT = \Delta V_i(t_{k+1}) - v_{V_i}(t_{k+1}), \quad (2)$$

где ΔV_i — погрешности ИИМ по составляющим вектора линейной скорости; $\delta \left[\nabla S_i^c(t_{k+1}) \right] / dT$ — погрешности доплеровского канала ПА СНС; $v_{V_i}(t_{k+1}) = [\Delta V_i(t_{k+1}) - \Delta V_i(t_k + dT/2)] + \delta \left[\nabla S_E^c(t_{k+1}) \right] / dT$ — реальные шумы скоростных измерений.

Позиционные измерения:

$$\left. \begin{aligned} z_\varphi(t_{k+1}) &= \varphi^u(t_{k+1}) - \varphi^c(t_{k+1}) = \Delta\varphi(t_{k+1}) + v_\varphi(t_{k+1}), \\ z_\lambda(t_{k+1}) &= \lambda^u(t_{k+1}) - \lambda^c(t_{k+1}) = \Delta\lambda(t_{k+1}) + v_\lambda(t_{k+1}), \\ z_h(t_{k+1}) &= h^u(t_{k+1}) = \Delta h(t_{k+1}) + v_h(t_{k+1}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\varphi^j, \lambda^j, h^j$ ($j = u, c$) — географические координаты места объекта (широта, долгота и высота), вычисляемые соответственно по данным ИИМ, приведенные к точке размещения на объекте A_0 и СНС; $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ — погрешности ИИМ по координатам; $v_\varphi(t_{k+1}) = -\delta\varphi^c(t_{k+1})$, $v_\lambda(t_{k+1}) = -\frac{1}{\cos\varphi(t_{k+1})} \delta W^c(t_{k+1})$ — погрешности дальномерного канала ПА СНС; $v_h(t_{k+1})$ — динамическая составляющая вертикальной качки морского надводного объекта (с точностью до превышения геоида).

Для вторых разностей измеренных (по данным двух приемников СНС) значений фазовых измерений имеем [6]:

$$\nabla s_{i,i+1}^z = s_i^z - s_{i+1}^z, \quad (4)$$

где s_i^z — вычисленное по измерениям разности фаз сигнала НС_i на разнесенные антенны значение направляющего косинуса орта \mathbf{s}_i (задающего направление на НС_i).

Следует заметить, что формирование вторых разностей фазовых измерений необходимо для исключения влияния расхождения шкал времени опорных генераторов у двух приемников СНС.

С другой стороны, располагая данными о декартовых координатах точки размещения на объекте опорной антенны, значениями параметров ориентации (K — курс, ψ , θ — углы качки) и соответственно матрицы ориентации $\mathbf{C}_h^o(K, \psi, \theta)$ объекта, полученными от ИИМ, а также известными координатами НС_i в гринвичской системе координат (от ПА СНС), можно рассчитать направляющие косинусы орта \mathbf{s}_i в гринвичской \mathbf{s}_{ie} , географической \mathbf{s}_{ih} и связанной \mathbf{s}_{io} с объектом системах координат [6], а также сформировать затем расчетное значение направляющего косинуса орта \mathbf{s}_i :

$$s_i^R = (\mathbf{b}_o)^T \mathbf{s}_{io}, \quad (5)$$

где \mathbf{b}_o — значения направляющих косинусов вектора \mathbf{b} в связанных с объектом осях

$$\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{A_0})^2 + (y_{A_1} - y_{A_0})^2 + (z_{A_1} - z_{A_0})^2}} \begin{bmatrix} x_{A_1} - x_{A_0} \\ y_{A_1} - y_{A_0} \\ z_{A_1} - z_{A_0} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь $[x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}]^T$, $[x_{A_0}, y_{A_0}, z_{A_0}]^T$ — известные декартовы координаты точки расположения антенн A_1 , A_0 относительно центра масс объекта в связанных осях.

Для вторых разностей расчетных значений фазовых измерений получим

$$\nabla s_{i,i+1}^R = s_i^R - s_{i+1}^R. \quad (7)$$

Сравним расчетные и измеренные значения вторых разностей фазовых измерений и сформируем искомые разностные измерения

$$z_{i,i+1} = \nabla s_{i,i+1}^R - \nabla s_{i,i+1}^z, \quad (8)$$

которые содержат погрешности решения ИИМ задачи ориентации объекта (погрешности ΔC_h^o матрицы ориентации, однозначно связанные с погрешностями аналитического построения географического сопровождающего трехгранника, α, β, γ ; где α — погрешность по курсу, β, γ — погрешности построения вертикали места), погрешности $\Delta b_y, \Delta b_z$ ориентации базы \mathbf{b} относительно связанных с объектом осей, неоднозначности вторых разностей фазовых измерений $(\lambda_{i+1}\eta_{i+1} - \lambda_i\eta_i)/|\mathbf{b}|$ (где λ_i — длина волны излучаемого НС_i сигнала, η_i — целое число длин волн — собственно неоднозначность в фазовых измерениях) и шумы измерений.

Если начальные погрешности ИИМ по навигационным параметрам и параметрам ориентации объекта малы (например, по курсу — порядка 10° при использовании магнитных датчиков, по углам качки — 3°), допустима линеаризация измерений (8). Предварительная обработка разностных измерений (8) заключается в исключении исходной неоднозначности фазовых измерений с точностью до одной длины волны.

Поскольку известно, что составляющая измерений, обусловленная погрешностями ИИМ, вместе с шумами при расстоянии между антеннами до нескольких метров составляет менее одной длины волны излучаемого НС_i сигнала в значениях приведенного измерения $z_{i,i+1}|\mathbf{b}|$, то, исключив целое число $(\eta_{i+1} - \eta_i)$ из значения $z_{i,i+1}|\mathbf{b}|/\lambda_{i+1}$ и оставив его дробную часть $\tilde{z}_{i,i+1}|\mathbf{b}|/\lambda_{i+1}$, можно уменьшить из восстановленных измерений $\tilde{z}_{i,i+1}$ неоднозначность фазовых измерений до уровня одной длины волны плюс $\delta\lambda_{i+1}\eta_i/|\mathbf{b}|$, где $\delta\lambda_{i+1} = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ — разность длин волн излучаемых НС_i сигналов. Остаточная неоднозначность фазовых измерений в пределах одной длины волны включается в число оцениваемых параметров. Следует заметить, что для обеспечения устойчивости процедуры нахождения оценок погрешностей ориентации из измерений (8) необходимо на каждом шаге формирования измерений значениям $\nabla s_{i,i+1}^z$, содержащим неоднозначности фазовых измерений, присваивать такой же знак, как и у значений $\nabla s_{i,i+1}^R$.

Значения $\tilde{z}_{i,i+1}$ вместе с разностными измерениями по навигационным параметрам (1), (3) поступают для последующей обработки с использованием алгоритмов обобщенного фильтра Калмана (ФК). Оценки, вырабатываемые в ФК, поступают в обратную связь для коррекции погрешностей параметров ориентации, навигационных параметров и коррекции измерений $\tilde{z}_{i,i+1}$, а также компенсации погрешностей гироскопов и акселерометров.

При разнесении двух антенн ПА СНС в осях объекта (база установлена по поперечной оси x_o) номинальные \mathbf{b}_o^m и приборные \mathbf{b}_o значения направляющих косинусов вектора \mathbf{b} в связанных с объектом осях будут равны

$$\mathbf{b}_o^m = \begin{bmatrix} b_x^m \\ b_y^m \\ b_z^m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_o = \mathbf{b}_o^m + \Delta \mathbf{b}_o, \quad \Delta \mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} \Delta b_x \\ \Delta b_y \\ \Delta b_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\Delta \mathbf{b}_o$ — погрешности орта \mathbf{b}_o . Значения b_y, b_z уточнялись по результатам обработки измерений (8), а составляющая b_x определялась из условия нормирования орта \mathbf{b}_o , т.е. $(b_x)^2 + (b_y)^2 + (b_z)^2 = 1$.

Таким образом, линеаризованные разностные измерения (8) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} z_{i,i+1} = & \left[b_N(s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_E(s_{iN} - s_{(i+1)N}) \right] \alpha + \\ & + \left[b_H(s_{iN} - s_{(i+1)N}) - b_N(s_{iH} - s_{(i+1)H}) \right] \beta + \left[b_E(s_{iH} - s_{(i+1)H}) - b_H(s_{iE} - s_{(i+1)E}) \right] \gamma + \\ & + (s_{iy} - s_{(i+1)y}) \Delta b_y + (s_{iz} - s_{(i+1)z}) \Delta b_z + \Delta Cf_{(i+1)-i} + v_{zi}, \end{aligned} \quad (10)$$

где b_E, b_N, b_H — направляющие косинусы вектора-базы \mathbf{b} в географических осях, т.е. элементы вектора-строки $\left[b_E, b_N, b_H \right] = (\mathbf{b}_h)^T = (\mathbf{C}_h^o \mathbf{b}_o)^T$; $s_{ij}, s_{(i+1)j}$ ($j = E, N, H$) и $s_{ij}, s_{(i+1)j}$ ($j = x, y, z$) — элементы ортов $\mathbf{s}_{ih}, \mathbf{s}_{io}$ (направляющие косинусы орта \mathbf{s}_i НС_{*i*} относительно соответственно географических осей и осей объекта); $\Delta Cf_{(i+1)-i}$ — погрешности, обусловленные остаточной неоднозначностью вторых разностей фазовых измерений для пары спутников НС_{*i+1*} и НС_{*i*}; v_{zi} — шумы измерений (в том числе шумы ПА СНС) и составляющие, обусловленные погрешностями определения координат места объекта и эфемеридной информации НС_{*i*}.

Расчетная модель погрешностей. При формировании расчетной модели погрешностей ИСОН и привлечении вторых разностей фазовых измерений от трех пар НС использовались следующие аппроксимации:

— смещения нулей гироскопов $\Delta \bar{\omega}_x, \Delta \bar{\omega}_y, \Delta \bar{\omega}_z$ и акселерометров $\Delta \bar{a}_x, \Delta \bar{a}_y, \Delta \bar{a}_z$, изменения систематических составляющих погрешностей масштабных коэффициентов ММГ $\Delta M_{gx}, \Delta M_{gz}, \Delta M_{gz}$ от запуска к запуску, погрешности Δb_j ($j = y, z$) были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;

— погрешности $\Delta Cf_{(i+1)-i}$ были описаны „скачкообразными“ случайными величинами, дисперсия которых восстанавливается до начальной неопределенности при фиксации „скачка“ в измерениях $\tilde{z}_{i,i+1}$;

— шумы измерений аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте формирования измерений.

В этом случае расчетная модель погрешностей ИСОН будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1/k} \mathbf{x}_k + \Gamma_{k+1} \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\mathbf{x}^T = \left[\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_x \quad \Delta \bar{\omega}_y \quad \Delta \bar{\omega}_z \quad \Delta \bar{a}_x \right. \\ \left. \Delta \bar{a}_y \quad \Delta \bar{a}_z \quad \Delta M_{gx} \quad \Delta M_{gy} \quad \Delta M_{gz} \quad \Delta b_y \quad \Delta b_z \quad \Delta Cf_{4_1} \quad \Delta Cf_{5_2} \quad \Delta Cf_{6_3} \right] \quad (12)$$

— вектор состояния системы; $\Phi_{k/k+1}$ — переходная на интервале dT формирования измерений матрица состояния системы; $\Gamma_{k+1} \cong \Phi_{k+1} dt$ — матрица, определяющая влияние вектора входных шумов \mathbf{w}_k с ковариациями \mathbf{Q}_k ; \mathbf{H}_{k+1} — матрица измерений, соответствующая уравнениям (2), (3) и (10); \mathbf{v}_{k+1} — шумы измерений с матрицей ковариаций \mathbf{R}_k .

Для отбраковки недостоверных измерений использовался безынерционный алгоритм контроля, основанный на анализе невязки разностных измерений, т.е. анализе превышения разностных измерений (с учетом факта включения оценок в обратную связь на каждом шаге обработки измерений) допустимых значений, рассчитываемых по текущим значениям ковариационной матрицы ошибок оценок.

Формирование пар НС для фазовых измерений. Как следует из соотношения (10), точность оценивания погрешности α и, следовательно точность выработки ИСОН курса, зависит от значения функционала

$$f(\alpha) = \left[b_N (s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_E (s_{iN} - s_{(i+1)N}) \right], \quad (13)$$

где $s_{iN} = \cosh_i \cos Az_i$, $s_{iE} = \cosh_i \sin Az_i$ (здесь h_i — высота НС_{*i*}, Az_i — азимут НС_{*i*}). Очевидно, что желательно иметь максимальное значение функционала $f(\alpha)$.

Рассмотрим частный случай движения: $K = 0$. Тогда при поперечном расположении базы по оси x_o $b_N = 0$, $b_E = 1$. Максимум функционала $f(\alpha)$, учитывая, что $s_{iN} = \cosh_i \cos K$, $s_{iE} = \cosh_i \sin K$, получим при условиях:

— значения высоты НС, выбранные из наблюдаемой группировки, должны быть минимальны;

— $s_{iN} = 1$ (max), если азимут НС_{*i*} равен нулю, т.е. направление на НС_{*i*} должно быть ортогонально базе;

— $s_{(i+1)N} = -s_{iN}$, азимут НС_{*i+1*} должен быть равен 180° .

Итак, для общего случая движения объекта выбор НС должен соответствовать следующим требованиям:

— значения высоты НС, полученные из наблюдаемой группировки для формирования вторых разностей фазовых измерений, должны быть минимальны;

— азимуты НС должны быть $Az \cong K$, $Az \cong K + 180^\circ$, чтобы направления на НС были ортогональны базе;

— различие в азимутах НС из одной пары должно быть близко к 180° .

Результаты мореходных испытаний. Испытания проводились на Ладожском озере 24.07.09 г. При этом использовались измерения фазы от двух приемников — Ashtech G12 и „Котлин“ (ОАО РИРВ). Приемные антенны СНС были расположены на судне на базе около 3,4 м по поперечной оси.

Разностные фазовые линеаризованные измерения (8) для трех пар НС, навигационные измерения (1) и (3), а также данные ИИМ обрабатывались в камеральном режиме. При обработке:

— отбраковка недостоверных результатов измерений от ПА СНС производилась в соответствии с критерием, учитывающим текущие значения ковариационной матрицы ошибок оценок;

— при скачках в разностных фазовых измерениях для пары спутников более чем на $0,3$ длины волны производился частичный перезапуск фильтра Калмана по погрешности $\Delta C f_{(i+1)-i}$, соответствующей данному измерению;

— в качестве эталонных значений курса и угла бортовой качки использовались данные, полученные путем обработки всех видимых НС с исключением неоднозначности фазовых измерений по методу, изложенному в [5];

— запись массива данных ИИМ (текущих значений сигналов ММГ и ММА) производилась на частоте 100 Гц;

— начальная погрешность ИИМ по курсу составляла около 30° .

Результаты испытаний представлены на рис. 2, 3. На рис. 2, *а* приведены погрешности ориентации при произвольном формировании пар НС_{*i*} (ΔK — погрешность по курсу, $\Delta\theta$ — погрешность по углу бортовой качки, ψ — значения угла килевой качки), *б* — то же, участок хода прямым курсом.

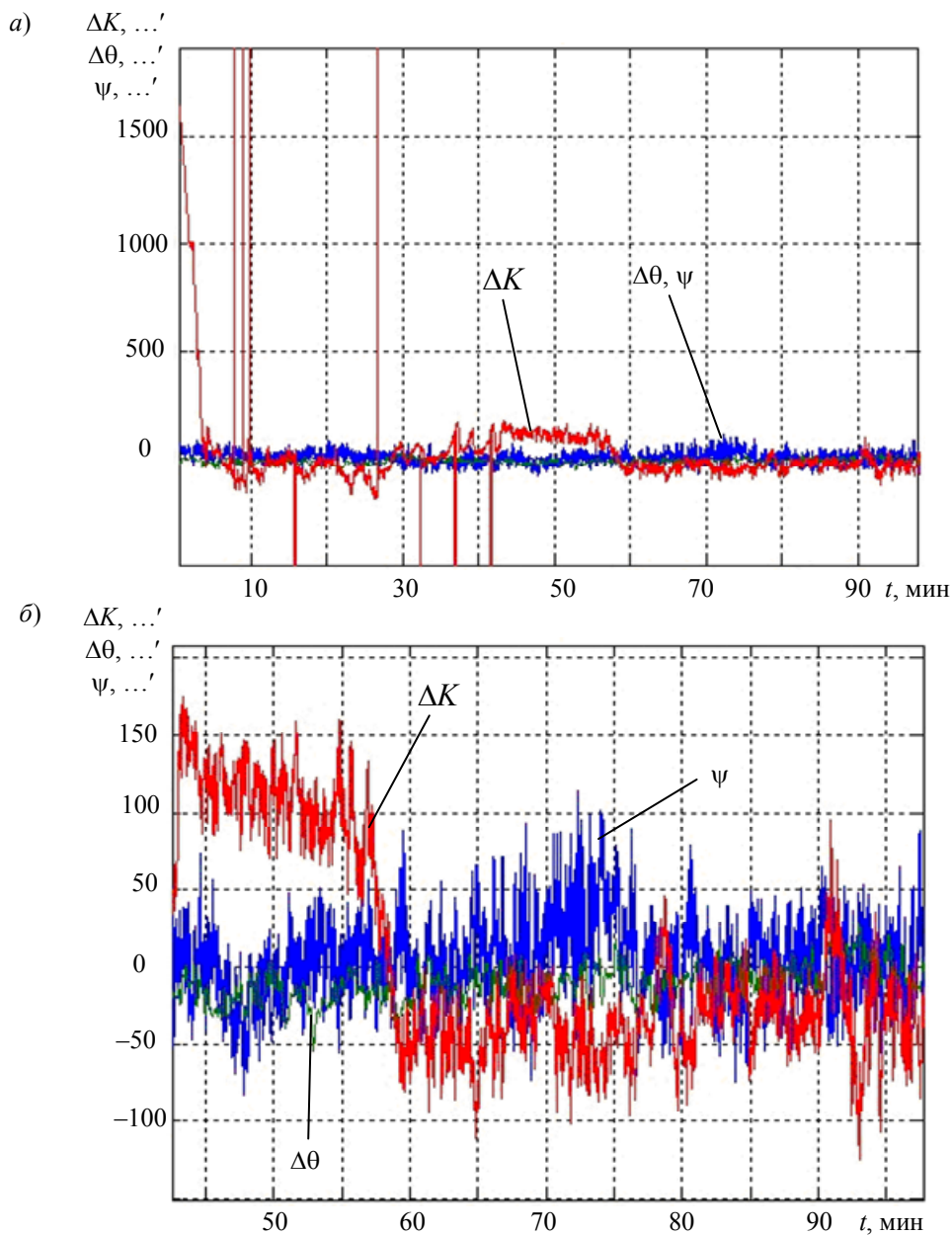


Рис. 2

На рис. 3 представлены погрешности ориентации при формировании пар $НС_i$, согласно анализу функционала (13), участок хода прямым курсом.

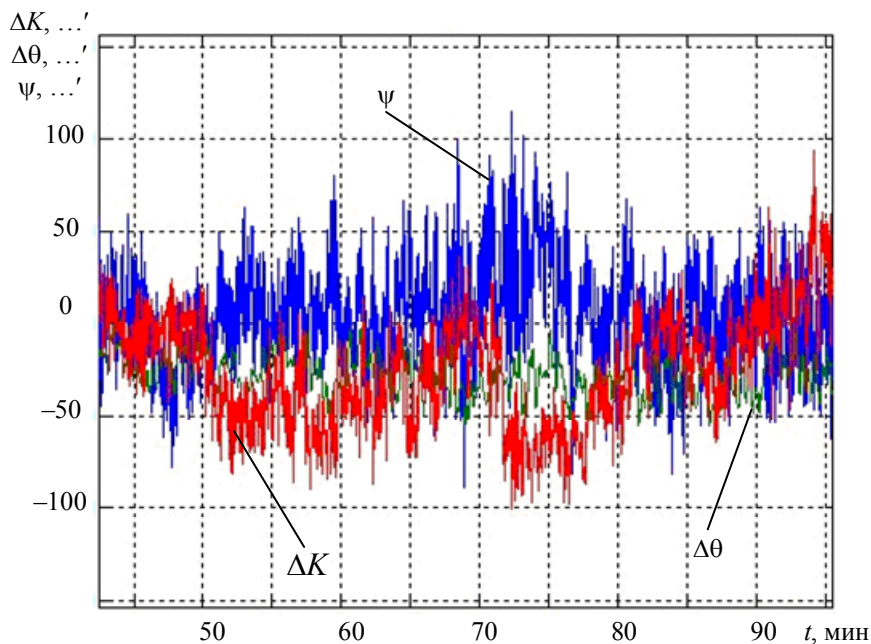


Рис. 3

Выводы

1. Результаты решения задачи ориентации объекта в рассматриваемой схеме построения ИСОН подтверждают эффективность используемых методов. Предлагаемое решение допускает перерывы в поступлении фазовых измерений от ПА СНС и позволяет эффективно обеспечивать отбраковку недостоверных результатов измерений.

2. Используемая процедура исключения неоднозначности фазовых измерений существенно проще традиционных поисковых алгоритмов, требующих перебора целого числа периодов и приводящих к значительным вычислительным затратам.

3. Допускается значительная начальная неопределенность по курсу, что может быть обеспечено применением магнитного датчика. При этом время переходного процесса лежит в пределах 3—4 мин.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 10-08-00904а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянец Г. И., Лочехин А. В. Начальная выставка и калибровка бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 5 (63). С. 62—69.
2. Блажнов Б. А., Вольнский Д. В., Емельянец Г. И., Несенюк Л. П., Степанов А. П. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле // Гироскопия и навигация. 2008. № 4 (63). С. 77.
3. Интегрированная система Seapath 200. Product Manuals – Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. Seatech AS. Trondheim, Norway, 1998.
4. Степанов О. А., Кошаев Д. А. Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 1999. № 2 (25). С. 30—55.
5. Блажнов Б. А., Кошаев Д. А. Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2009. № 4 (67). С. 15—33.

6. Емельянцеv Г. И., Блажнов Б. А., Степанов А. П. Об использовании фазовых измерений для задачи ориентации в интегрированной инерциально-спутниковой системе // Гироскопия и навигация. 2010. № 1 (68). С. 12—16.

Сведения об авторах

- Геннадий Иванович Емельянцеv** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: Emel@mail.ifmo.ru
- Борис Александрович Блажнов** — канд. техн. наук; „ЦНИИ «Электроприбор»“, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: office@eprib.ru
- Алексей Владимирович Лочехин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: alex@infom.su
- Алексей Петрович Степанов** — „ЦНИИ «Электроприбор»“, Санкт-Петербург; инженер 1-й категории; E-mail: office@eprib.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-навигационных систем

Поступила в редакцию
11.05.10 г.