

Г.И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Б.А. БЛАЖНОВ, Д.А.РАДЧЕНКО, А. А. МЕДВЕДКОВ

## О ФОРМИРОВАНИИ АВТОНОМНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ GPS-КОМПАСА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРОПАДАНИИ СИГНАЛА

*Рассматривается задача определения параметров ориентации объекта при интеграции данных инерциального измерительного модуля на микромеханических датчиках (ММД) с магнитометрами и одноосным волоконно-оптическим гироскопе (ВОГ), мультиантенной приемной аппаратуры (ПА) спутниковой навигационной системы (СНС) и лага в рамках интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) для морских судов.*

*Исследуются алгоритмы и погрешности ИСОН в решении задачи ориентации для автономного режима ее работы при длительных перерывах в поступлении данных от ПА СНС.*

*Приводятся результаты камеральной обработки данных объектовых испытаний в городских условиях опытного образца GPS-компыаса, разрабатываемого в ЦНИИ «Электроприбор».*

### Введение

Решение задачи определения углов качки в рамках ИСОН с инерциальным измерительным модулем (ИИМ) на ММД не представляет особой сложности [1]. Оказывается достаточным привлечение скоростных измерений от ПА СНС или лага. Проблемой является выработка курса с требуемой точностью, что обусловлено значительным уровнем погрешностей (порядка 0,1-0,01 град/с) современных коммерческих микромеханических гироскопов (ММГ). Для ее решения в настоящее время и привлекается мультиантенная ПА СНС с фазовыми измерениями.

Известны различные схемы построения так называемых GPS-компыасов, использующих ПА СНС с фазовыми измерениями и разнесенными антеннами, которые могут содержать и гироскопические модули. Известны, например, интегрированная система **Seapath 300 (200)** норвежской фирмы Seatex AS для морских судов [2], которая содержит мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте и малогабаритный ИИМ, а также GPS-компыас **Navistar** фирмы Northrop Grumman Sperry Marine с дешевым ИИМ, как недорогая альтернатива гирокомпыасу для катеров, рыболовецких судов, больших яхт, военных патрульных судов, небольших торговых судов водоизмещением 300 и 500 рег. т. [3].

---

**Блажнов** Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

**Емельянцеv** Геннадий Иванович. Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

**Радченко** Дмитрий Александрович. Начальник сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Медведков** Андрей Александрович. Аспирант ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Из отечественных разработок следует выделить мультиантенную ПА СНС МРК-11 (разработка Красноярского государственного технического университета и НИИ радиотехники), которая не содержит гироскопического модуля.

Характерным для современных GPS-компасов является выработка с определенной дискретностью параметров ориентации объекта при обработке фазовых измерений от группировки навигационных спутников ( $НС_i$ ). При этом, как известно, требуется решение проблемы неоднозначности фазовых измерений.

Известны различные способы решения данной проблемы [4, 5, 7]. Все они требуют одновременного наблюдения группировки  $НС_i$  и достаточно сложного программного обеспечения. В работе [6] проблема неоднозначности фазовых измерений ПА СНС решается с опорой на данные ИИМ.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации GPS-компасов имеют место частые сбои и достаточно длительные перерывы в поступлении данных от ПА СНС. Поэтому представляет интерес создание GPS-компаса как интегрированной системы, обладающей повышенной помехозащищенностью и возможностью работы в автономном режиме при выработке параметров ориентации.

### **Постановка задачи, исходные положения и алгоритмическое обеспечение**

Рассмотрим задачу определения параметров ориентации объекта в рамках построения ИСОН с ИИМ на ММД с магнитометрами и одноосным ВОГ, мультиантенной ПА СНС и возможностью приема данных от судового лага. При оценке точности ИСОН будем использовать реальные данные испытаний на автомобиле в городских условиях опытного образца GPS-компаса, разрабатываемого в ЦНИИ «Электроприбор». При этом данные лага имитировали, формируя продольную составляющую  $V_{y0}$  скорости движения объекта по данным ИИМ на ВОГ **IMU-120** фирмы IXSEA и учитывая модель морских течений.

В состав ИСОН входят:

- ИИМ, содержащий измерительный блок (ИБ) ADIS16405 фирмы Analog Devices с ММГ, акселерометрами (ММА) и магнитометрами, а также одноосный ВОГ VG 035 фирмы «Физоптика» с измерительной осью, ортогональной плоскости палубы;
- антенный модуль, включающий разнесенные на базе 1,5 м две спутниковые антенны;
- два приемных модуля СНС К-161 ОАО «РИРВ» и навигационный вычислитель, на вход которого могут поступать также данные от судового лага.

Исследовался автономный режим работы ИСОН, включающий обработку данных ИИМ, содержащего ИБ ADIS16405 и ВОГ, и имитатора лага при отсутствии или дискретном поступлении с длительными перерывами данных о курсе от ПА СНС.

Калибровка магнитометров блока ADIS16405 проводилась ранее по данным предыдущей реализации, содержащей движение автомобиля по кругу.

При подключении данных ВОГ( $zb$ ) по оси  $zb$ , ортогональной плоскости палубы, отключался соответствующий ММГ.

Начальная выставка ИИМ и уточнение нулей ММД и ВОГ в пуске проводились в обсервационном режиме работы ИСОН с использованием данных ПА СНС о скорости, координатах места и курсе.

Значения курса  $K_{GPS}$  на траектории движения объекта по фазовым измерениям от ПА СНС были получены Д.А. Кошаевым по предложенному им алгоритму и предоставлены нам, за что авторы выражают ему благодарность.

В качестве эталонного средства по параметрам ориентации использовался при испытаниях ИИМ на ВОГ IMU-120 фирмы IXSEA.

## Формирование разностных измерений

### Скоростные измерения

Формирование скоростных и позиционных разностных измерений с привлечением данных ИИМ о составляющих вектора линейной скорости  $V_i, i = E, N, H$  и географических координатах места  $\varphi, \lambda, h$  объекта и ПА СНС по скорости и координатам осуществляется при начальной выставке, калибровке и обсервационном режиме работы ИСОН [6].

В автономном режиме работы ИСОН используются данные лага о продольной  $V_{y0} = V_L$  составляющей вектора линейной скорости:

$$\begin{aligned} z_{V_E} &= V_E - V_L \sin K \cong \Delta V_E - V_N \Delta K + v_{V_E}, \\ z_{V_N} &\cong V_N - V_L \cos K \cong \Delta V_N + V_E \Delta K + v_{V_N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta V_i, i = E, N$  – погрешности ИИМ в выработке соответственно восточной и северной составляющих вектора линейной скорости;  $\Delta K$  – погрешность ИИМ по курсу;  $K$  – значения курса от ИСОН;  $v_{V_E} = V_{TE} - \delta V_L \sin K$ ,  $v_{V_N} = V_{TN} - \delta V_L \cos K$  – шумы измерений, содержащие в реальности морские течения  $V_{TE}, V_{TN}$ , не измеряемую лагом поперечную составляющую вектора скорости судна и инструментальную погрешность  $\delta V_L$  лага.

При формировании измерений (1) в рассматриваемом случае течения имитировались марковскими процессами с  $\sigma_{TE(N)} = 0,2 \dots 0,3$  м/с и интервалом корреляции  $1/\mu_T = 5400$  с. При этом в расчетной модели фильтра Калмана они были аппроксимированы в сумме с другими шумами измерений дискретными белыми шумами с дисперсией  $\sigma_L^2 = (1 \text{ м/с})^2$  на частоте 1 Гц.

### Курсовые измерения

В рассматриваемой системе имеется возможность сформировать и обрабатывать:

- либо разностные курсовые измерения путем сравнения текущих значений курса  $K$  (от ИИМ) и курса  $K_{GPS}$ , вычисляемого отдельно непосредственно по фазовым измерениям ПА СНС

$$z_k = K - K_{GPS} = \Delta K - \delta K_s, \quad (2)$$

где  $\delta K_{GPS}$  – шумы ПА СНС по курсу;

- либо [6] путем сравнения расчетных  $\nabla s_{i,i+1}^{bl(R)}$  (по данным ИИМ и эфемерид навигационных спутников) и измеренных  $\nabla s_{i,i+1}^{bl(z)}$  (по данным приемников

СНС от разнесенных на базе антенн) значений вторых разностей фазовых измерений

$$Z_{i,i+1}^{bl} = \nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} - \nabla s_{i,i+1}^{bl(z)}, \quad (3)$$

где содержатся с соответствующими весами в основном погрешности решения в ИИМ задачи ориентации объекта, неоднозначности вторых разностей фазовых измерений, погрешности ориентации базы и шумы измерений [6];

- а также дополнительное курсовое измерение, которое при учете предварительной калибровки нулей магнитометров и малости влияния погрешностей ИИМ по углам качки (они ограничены в рамках интегрированной системы использованием скоростных измерений) приближенно может быть представлено в виде

$$z_{MK} = K - K_{mk} \cong \Delta K - \Delta \bar{K}_{mk} + \delta K_{mk}, \quad (4)$$

где  $K_{mk}$  – курс от магнитного компаса (МК), формируемый по данным блока магнитометров;  $\Delta \bar{K}_{mk}$ ,  $\delta K_{mk}$  – систематическая и флюктуационная погрешности МК.

### Расчетная модель погрешностей

(для случая формирования по данным ПА СНС курсового измерения в виде(2))

При формировании расчетной модели погрешностей ИСОН использовались следующие аппроксимации:

- смещения нулей ММГ  $\Delta \bar{\omega}_i (i = xb, yb, zb)$ , ВОГ  $\Delta \bar{\omega}_i (i = zb)$  и акселерометров  $\Delta \bar{a}_i$  были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;
- шумы измерений  $v_{zi}$  аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте формирования измерений.

С учетом сделанных допущений расчетная модель погрешностей ИСОН будет иметь вид:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_{k+1/k} \cdot x_k + \Gamma_{k+1} \cdot w_k, \\ z_{k+1} &= H_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$x^T = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_{xb} \quad \Delta \bar{\omega}_{yb} \quad \Delta \bar{\omega}_{zb} \quad \Delta \bar{a}_{xb} \quad \Delta \bar{a}_{yb} \quad \Delta \bar{a}_{zb}] - (6)$$

вектор состояния системы;  $\bar{\Lambda}_h = [\beta \quad \gamma \quad \alpha]^T$  – вектор малого эйлера поворота, который описывает погрешности построения географического сопровождающего трехгранника  $ENH$ , угол  $\alpha$  характеризует разворот приборного трехгранника  $хуз$  вокруг вертикали места – погрешность по курсу, а углы  $\beta, \gamma$  – погрешности построения вертикали места соответственно в плоскости меридиана места и в плоскости первого вертикала;  $\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h$  – погрешности ИИМ в выработке географических координат;  $\Phi_{k/k+1}$  – переходная на интервале  $T_z$  формирования измерений матрица состояния системы;  $\Gamma_{k+1} \cong \Phi_{k+1} \cdot dT$  – матрица, определяю-

щая влияние вектора входных шумов  $w_k$  с ковариациями  $Q_k$ ;  $H_{k+1}$  – матрица измерений, соответствующая уравнениям (1),(2) и (4);  $v_{k+1}$  – шумы измерений с матрицей ковариаций  $R_k$ .

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

### Результаты объектовых испытаний

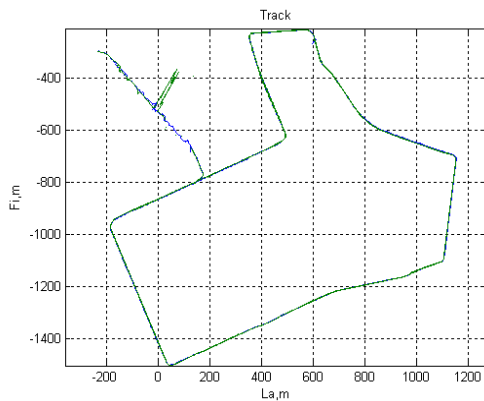


Рис. 1. Траектория движения автомобиля по набережной реки Нева, где  $Fi$ ,  $La$  – изменение соответственно широты и долготы (в метрах)

Испытания опытного образца GPS-компаса проводились на автомобиле в городских условиях. При этом синхронно фиксировались следующие данные:

- запись массива данных ИБ ADIS16405 (текущих значений сигналов ММД и магнитометров) и ВОГ( $zb$ ) производилась на частоте 100 Гц;
- на частоте 2 Гц осуществлялась запись данных ПА СНС;
- данные гироскопов и акселерометров IMU-120 фиксировались на частоте 100 Гц, по которым затем в камеральном режиме с опорой на данные ПА СНС о

скорости и координатах места формировались эталонные значения параметров ориентации на маршруте движения объекта.

Маршрут движения выбирался с учетом обеспечения возможности наблюдать максимально возможное число навигационных спутников. Этот маршрут пролегал по набережной реки Нева (рис. 1). На рис. 2 представлены графики изменения широты  $Fi$  и курса  $K$  на данной траектории во времени. Первый проезд по данной траектории после 15-минутной стоянки был осуществлен целиком в автономном режиме, т.е. без использования данных ПА СНС. При втором проезде переход в автономный режим происходил при пропадании данных ПА СНС на короткое время. Как видно из рис. 3, даже при движении в условиях хорошей наблюдаемости  $НС_i$  происходят регулярные перерывы в получении данных GPS-компаса.

Результаты испытаний по оценке погрешностей ИСОН в выработке параметров ориентации (углов курса  $K$ , килевой  $\psi$  и бортовой  $\theta$  качки) приведены на рис. 4–6, где:

$$\Delta K = \alpha - \operatorname{tg} \psi (\beta \sin K + \gamma \cos K);$$

$$\Delta \psi = -\beta \cos K + \gamma \sin K;$$

$$\Delta \theta = -(\beta \sin K + \gamma \cos K) / \cos \psi.$$

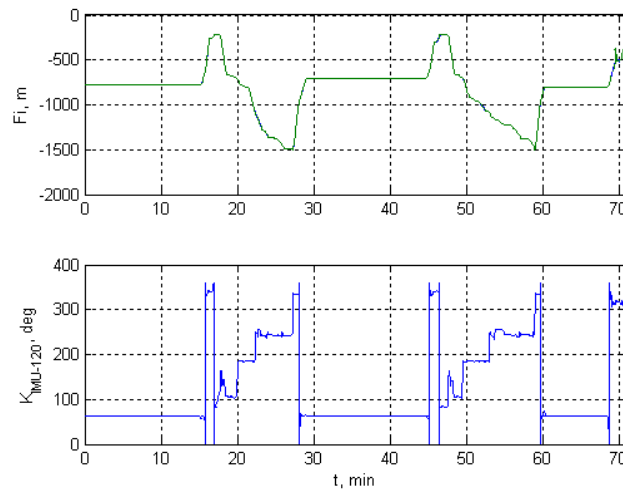


Рис. 2. Изменение широты (в метрах) и курса (в градусах) при движении во времени (мин)

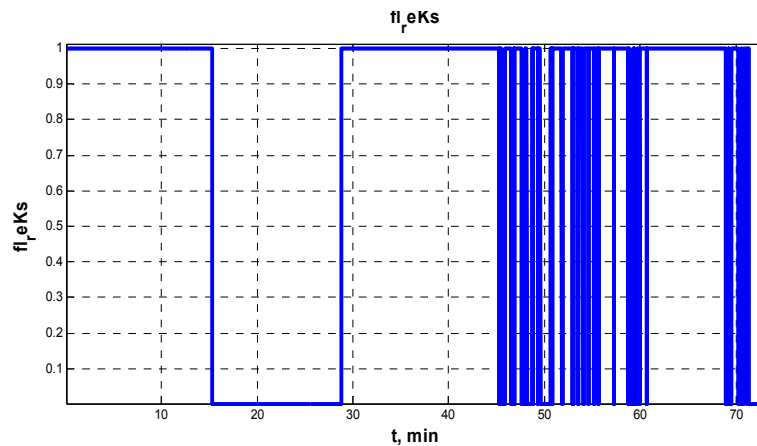


Рис. 3. Диаграмма поступления ( $fl\_reKs=1$ ) и отсутствия ( $fl\_reKs=0$ ) данных от ПА СНС

Из рис. 4 следует, что автономный режим работы ИСОН с опорой на данные ИИМ на ММД ADIS16405 и лага (с 15-й по 29-ю минуту) обеспечивает выработку курса с погрешностью на уровне требований ИМО ( $1,5^\circ \times \text{секф}$ ) лишь в пределах ограниченного интервала времени, не более 5-6 мин. Привлечение данных от магнитометров приводит к погрешностям по курсу в пределах  $5-6^\circ$  (рис. 5). Однако при наличии участков с

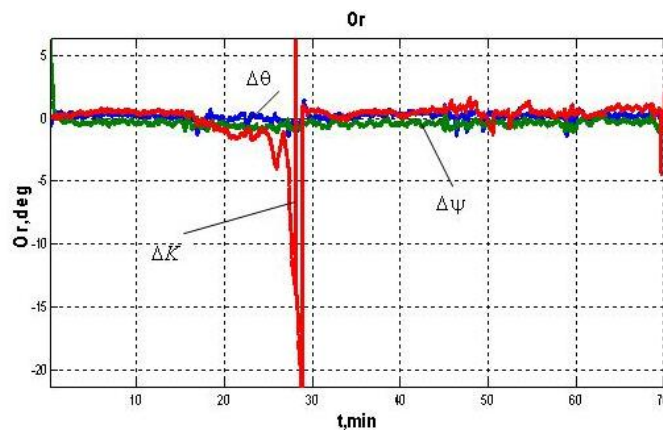


Рис. 4. Погрешности ориентации (град.) при использовании ИИМ на ММД, лага и данных ПА СНС по курсу

аномальным изменением магнитного поля на траектории движения погрешность по курсу может достигать и значительно бoльших значений  $-15-20^\circ$ .

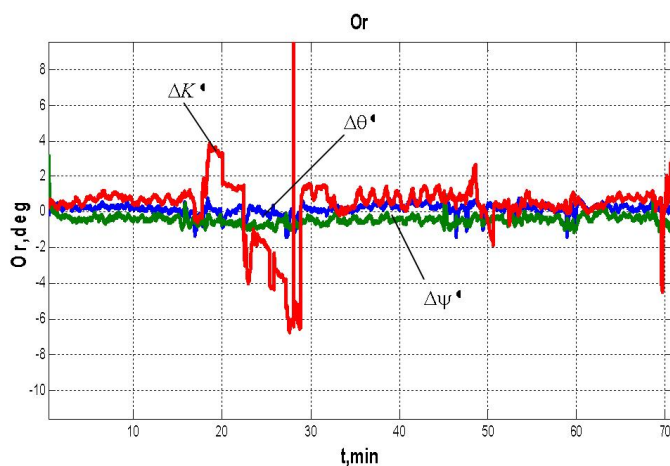


Рис. 5. Погрешности ориентации (град.) при использовании ИИМ на ММД, магнитометров, лага и данных ПА СНС по курсу

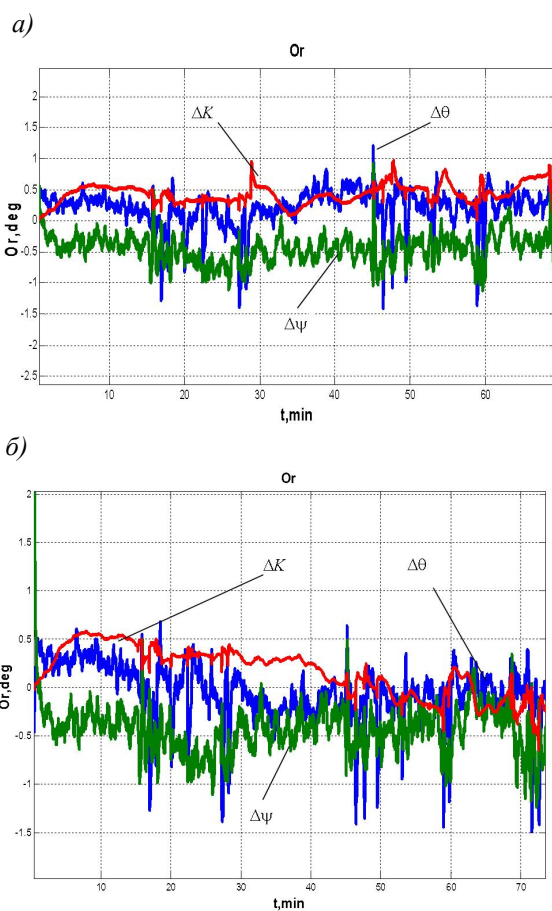


Рис. 6. Погрешности ориентации (град.) при использовании ИИМ на ММД, ВОГ( $zb$ ), лага и данных ПА СНС по курсу: а) в соответствии с реальной диаграммой сбоев (см. рис. 3); б) при использовании данных ПА СНС только до 15-й минуты

Использование одноосного ВОГ типа VG 035 по оси  $zb$  обеспечивает удержание погрешности по курсу (рис. 6 а, б) на требуемом уровне при длительных перерывах (до 1 ч) в поступлении данных ПА СНС о курсе. При этом погрешности по углам качки лежали в пределах  $0,5-1,0^\circ$ .

Графики на рис. 7 и 8 демонстрируют возможности оценки изменения дрейфов ДУС в процессе испытаний при наличии данных ПА СНС.

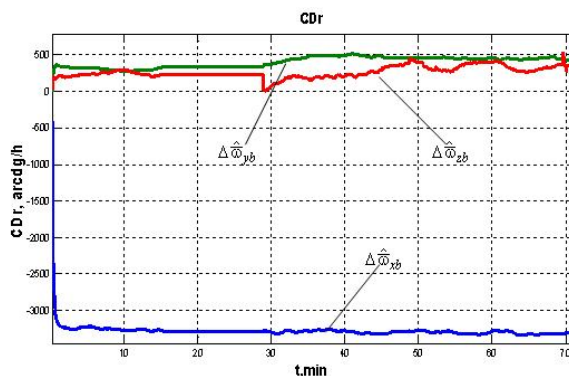


Рис. 7. Оценки дрейфов ММГ (град/ч)

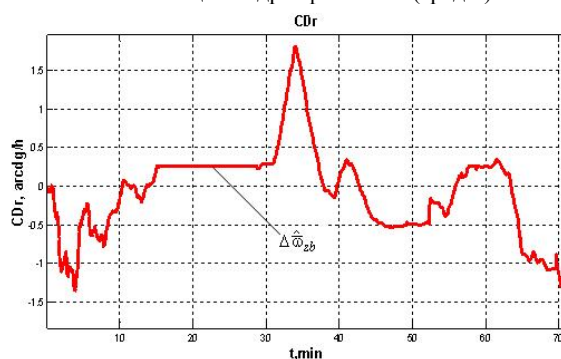


Рис. 8. Оценка дрейфа ВОГ (град/ч) в моменты времени наличия данных ПА СНС по курсу

## Выводы

1. Включение в состав инерциального модуля с микромеханическими датчиками одноосного ВОГ с нестабильностью дрейфа на уровне 1 град/ч обеспечивает хранение интегрированной системой в автономном режиме курса объекта при длительных перерывах в поступлении данных от мультиантенной ПА СНС. При этом калибровку ВОГ необходимо осуществлять только на интервалах времени, когда поступают данные по курсу от ПА СНС.

2. Блок магнитометров в целях выработки курса магнитного целесообразно использовать только в качестве резервного средства.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ. Код проекта 10-08-00904а.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Интегрированная** инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле / Б.А.Блажнов [и др.]// Рефераты докладов XXVI конф. памяти Н.Н. Острякова. - СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2008, С. 21-22; Гироскопия и навигация. - № 4, 2008. - С.77.

2. **Интегрированная** система Seapath 200. Product Manuals - Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. Seatex AS, Trondheim, Norway, 1998-05-04.
3. **GPS-компас** Navistar ф. Northrop Grumman Sperry Marine, www.antarsat.ru.
4. **Степанов, О.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем / О.А. Степанов, Д.А. Кошаев //Гирскопия и навигация.-1999.-№ 2. - С. 30-55.
5. **Блажнов, Б.А.** Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа / Б.А.Блажнов, Д.А.Кошаев //Гирскопия и навигация.-2009.-№ 4. -С. 15-33.
6. **Емельянцев, Г.И.** Особенности использования фазовых измерений в задаче ориентации интегрированной инерциально-спутниковой системы. Результаты ходовых испытаний /Г.И.Емельянцев, Б.А. Блажнов, А.П. Степанов //Гирскопия и навигация. - 2011. -№ 3. - С. 3-11.
7. **Hayward R.C., Gebre-Egziabher D., Powell J.D.** GPS-Based Attitude for Aircraft. 5<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May, 1998, S.-Petersburg, Russia, s. 85-94.

**Abstract.** The paper focuses on vehicle attitude determination by a MEMS-based inertial measurement unit (IMU) comprising magnetometers and one-axis FOG, a multiantenna GNSS receiver, and a log integrated in an integrated orientation and navigation system (IONS) for sea-going ships.

IONS algorithms and errors in autonomous mode during long-term outages of GNSS signals are investigated.

Experimental prototype of GPS compass developed by Elektropribor has passed onboard tests in urban conditions, results from office studies of test data are presented.

Материал поступил 05.06.12