

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОГ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ,
АНАЛИЗ ИХ ПАРАМЕТРОВ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ БИНС**

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², В. Е. Прилуцкий³, В. Г. Пономарев⁴
ООО ИПК «Оптолинк», Россия, 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом 5
тел. (+7495)5369953, факс (+7495)5369934, E-mail: opto@optolink.ru

П. К. Плотников⁵, А. В. Михеев⁶

Саратовский государственный технический университет, Россия,
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77. Тел. (+78452)799174, E-mail: pribor@sstu.ru

Аннотация

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, навигация, погрешности, курс, шумы, вариация Аллана

Анализируются по результатам лабораторных испытаний погрешности волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и акселерометров (А) в виде сдвигов нулей, асимметрии статических характеристик, шумов. При анализе влияния шумов используется вариация Аллана. Описывается подход к прогнозированию погрешностей выходных параметров бесплатформенной инерциальной системы навигации (БИНС) с учетом ошибок ВОГ и кварцевых маятниковых акселерометров путем математического моделирования ее работы. Получены графики погрешностей в зависимости от основных ошибок ВОГ и А.

Постановка задачи. Естественным методом определения погрешностей БИНС является экспериментальный, когда исследуемая система устанавливается на объект применения вместе с эталонной (образцовой) БИНС или ИИС, и процессы определения параметров движения по сигналам ВОГ и акселерометров, а главное, координат местоположения и ориентации объекта обеими системами записываются одновременно. При постобработке информации легко определяются погрешности исследуемой системы и погрешности датчиков. На практике такая возможность представляется крайне редко. Чаще проводятся испытания на подвижном объекте (ПО) отдельной исследуемой БИНС, а иногда -- только блока ВОГ и акселерометров и даже отдельных приборов. В случае отдельной БИНС погрешности по результатам испытаний могут быть определены путем сопоставления сигналов БИНС с сигналами GPS/ГЛОНАСС по навигационным параметрам, а по параметрам ориентации, а также по сигналам ВОГ и акселерометров их погрешности практически не поддаются оценке.

В силу этого для прогнозирования погрешностей БИНС обращаются к аналитическим оценкам, а также к методу математического моделирования. Как правило, при этом располагают записями сигналов ВОГ и акселерометров (датчиков первичной информации (ДПИ)). Чаще всего эти записи сделаны в лабораторных или заводских условиях и, как правило, содержат собственные шумы с другими погрешностями ДПИ. Что касается движения ПО, то обычно известен тип объекта с параметрами качки, скорости и ускорения в том числе поступательного движения, иногда имеются записи отдельных ДПИ, параметров движения объектов аналогичного типа. Для полной системы дифференциальных уравнений и конечных соотношений движения ПО-БИНС при математическом моделировании необходимо формировать полный набор параметров поступательного и углового движения ПО, его угловых и поступательных вибраций в месте установки БИНС, погрешностей ДПИ и т.д. Естественно, что часть параметров движения ПО и часть параметров БИНС приходится задавать.

Погрешности сдвигов нулей, масштабных коэффициентов, их нелинейностей и асимметрии задаются по результатам испытаний ДПИ путем статистической обработки результатов испытаний ДПИ. Собственные шумы ДПИ записываются при испытаниях, определяются коэффициенты вариации Аллана, а также анализируются с помощью спектрального и корреляционного методов. Затем на основе полученных результатов формируются «цветные» шумы из «белого» шума. Производится математическое моделирование БИНС по 10-15 циклов продолжительностью 7...20 тысяч секунд каждый. При этом движение ПО задается по аналогии с другими объектами в виде кинематических соотношений и дифференциальных уравнений. В последующем статистической обработкой результатов математического моделирования производится осреднение погрешностей БИНС из указанных выше числа циклов и продолжительностей работы, определяются оценки дисперсий и другие показатели. Из анализа результатов намечаются пути по снижению погрешностей БИНС.

¹ Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

² Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

³ Директор Саратовского отделения.

⁴ Кандидат технических наук, ведущий конструктор.

⁵ Доктор технических наук профессор, зав. кафедрой.

⁶ Ассистент кафедры.

Решение задачи. В качестве ПО выбрано морское судно на среднем волнении со скоростью до 40 узлов, БИНС в составе трехкомпонентного ВОГ и трехкомпонентного измерителя кажущегося ускорения на основе кварцевых компенсационных акселерометров с бортовым компьютером при шаге интегрирования 0,01-0,005 с. У ВОГ параметры погрешностей варьировались; у акселерометров относительные погрешности были меньше и зафиксированы по сдвигам нулей, параметров вариаций Аллана и другим показателям. Значения погрешностей ДПИ определены по результатам экспериментов, при их обработке получены коэффициенты вариации Аллана (B , N , K и др), построены кривые спектральных плотностей мощности шума ДПИ. После этого по разработанной методике в программе компьютера производилась генерация «цветного» шума по этим коэффициентам из «белого». Коэффициенты менялись и производились циклы моделирования работы автономной БИНС. Наряду с навигационными, выводились параметры ориентации, в том числе угол рыскания и угол курса, определяемый непрерывно путем гирокомпасирования.

Были сравнены спектральные плотности мощностей шумов различных ВОГ, в том числе по опубликованным данным для ПНСК 40-018 ООО НПК «Оптоланк», ВГ-951 и ВГ-910ФОС АО НТК «Физоптика», ВОГ-06/100 ПНППК, вариации Аллана для ПНСК 40-018, ВГ951 и ВОГ-06/100. По указанным характеристикам на основе разработанной процедуры сформированы «цветные» шумы для приборов ВГ951 и ВОГ-06/100. С прибором ПНСК 40-018 проведены экспериментальные исследования, определены коэффициенты вариации Аллана и сконструированы модели «цветного» шума, а также определен систематический дрейф и погрешности масштабных коэффициентов.

Ниже приведены результаты синтеза «цветного» шума для одного компонента сигнала ВОГ. На рис. 1 представлены запись сигнала канала «Х» прибора БГД на неподвижном относительно Земли основании и вариация Аллана для этого сигнала, на рис. 2 – запись сигнала ВОГ ВГ951 и его вариация.

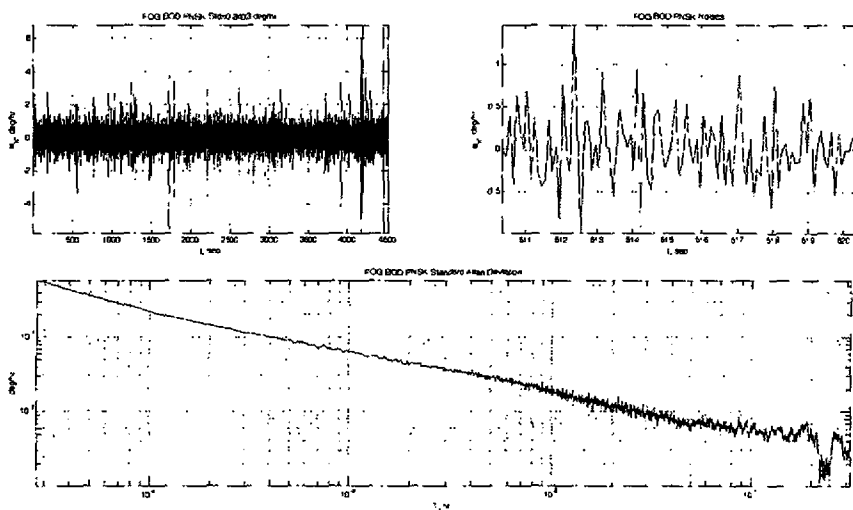


Рис. 1. Сигнал и график вариации Аллана для сигнала прибора БГД

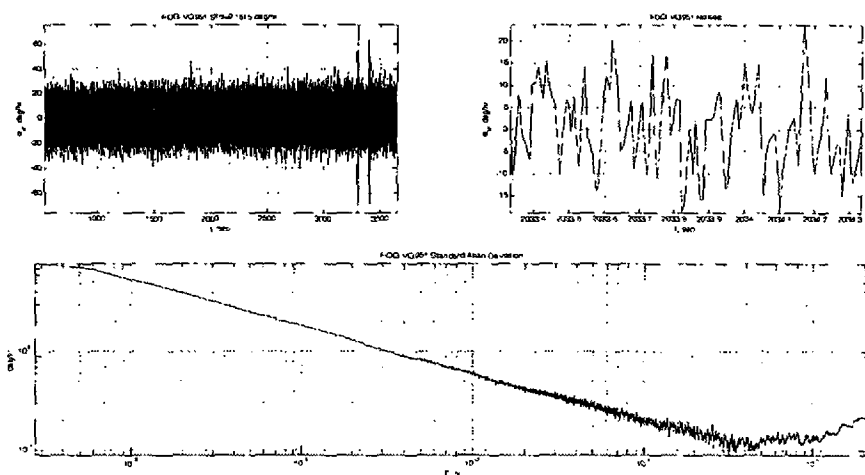


Рис. 2. Сигнал и график вариации Аллана для сигнала ВОГ ВГ951

На рис. 3 и 4 представлены выработанные в соответствии с [9–12] сигнал и график вариации Аллана для синтезированного сигнала. Нетрудно видеть, что они соответственно идентичны. Аналогичные операции выполнены для других каналов.

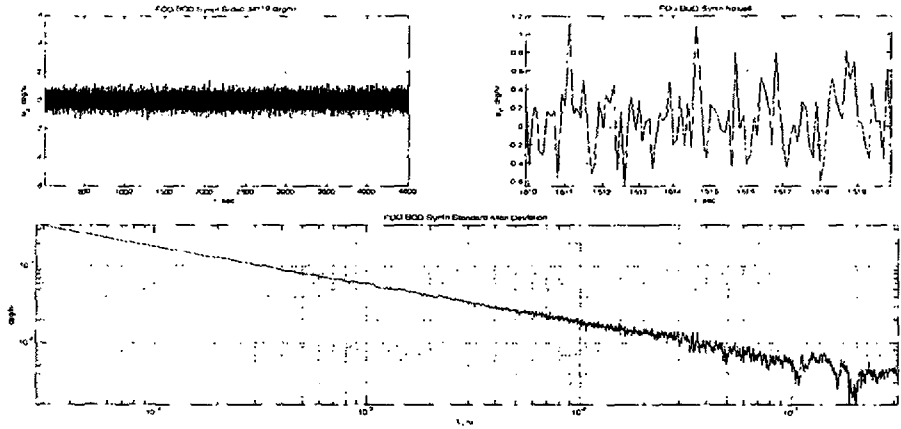


Рис. 3. Синтезированный сигнал прибора БГД и график вариации Аллана для синтезированного сигнала

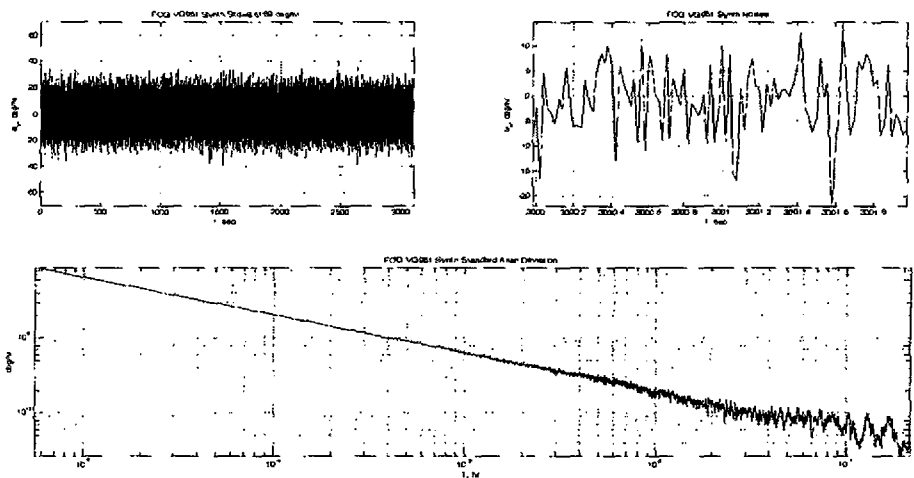


Рис. 4. Синтезированный сигнал ВОГ ВГ951 и график вариации Аллана для синтезированного сигнала

Аналогичным образом были синтезированы сигналы акселерометров. На рис. 5 показан сигнал и график вариации Аллана акселерометра АКП-2.

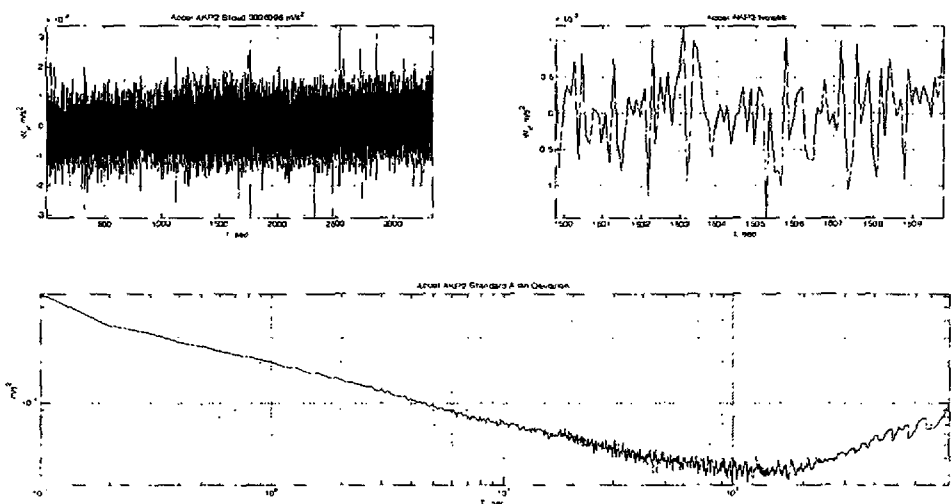


Рис. 5. Сигнал акселерометра АКП-2 и его график вариации Аллана

С учетом параметров движения ПО, параметров ДПИ, синтезированных на основе найденных коэффициентов вариации Аллана «цветных» шумов и других погрешностей ДПИ, на основе системы дифференциальных уравнений было проведено математическое моделирование работы БИНС. В результате определены погрешности БИНС, что дало возможность сравнивать для одинаковых условий влияние уровней погрешностей ДПИ, оценить влияние шумов ВОГ на точность БИНС.

Для математического моделирования работы БИНС использованы алгоритмы ориентации и параметры движения, сформированные на основе [5], дополненные алгоритмами гироскопирования (ГК) [12], а также алгоритмами навигации по [6, 7].

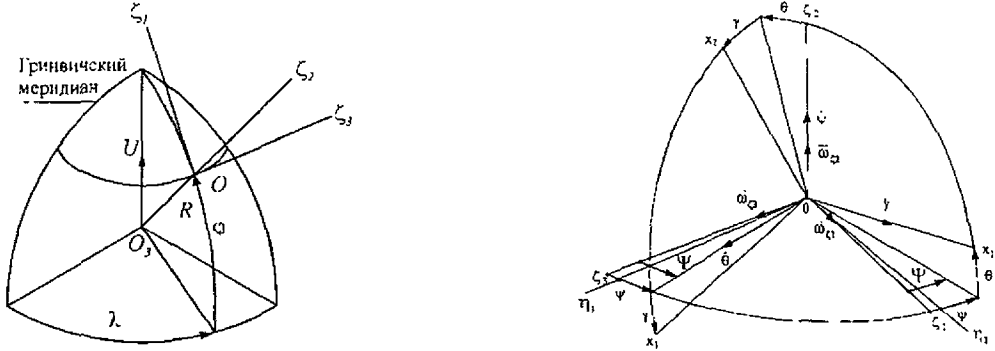


Рис. 6. Используемые системы координат

$$\dot{\hat{\phi}} = \omega_{\xi_3}^k; \dot{\hat{\lambda}} = -\frac{\omega_{\xi_1}^k}{\cos \hat{\phi}} - U, \quad (1)$$

где $\hat{\phi}, \hat{\lambda}$ – оценки географической широты и долготы объекта, U – угловая скорость вращения Земли, $\omega_{\xi_3}^k$ – угловая скорость коррекции в осях географического трехгранника $0\xi_1\xi_2\xi_3$.

$$\frac{d\hat{\xi}_1}{dt} = R\dot{\hat{\phi}}; \frac{d\hat{\xi}_3}{dt} = -R\dot{\hat{\lambda}} \cos \hat{\phi}, \quad (2)$$

где $\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_3$ – оценки координат местоположения подвижного объекта, R – радиус Земли.

Программы моделирования базировались на численном методе Рунге–Кутты 4(5) порядка [3] с автоматически варьируемым шагом интегрирования от максимального значения 0,01 с и меньше. Введена компенсация поворотных ускорений и скоростной погрешности для режима ГК. Для оценки эффективности алгоритмов произведено математическое моделирование процесса функционирования БИНС по алгоритмам идеальной работы, т.е. при отсутствии у ДПИ погрешностей, когда точные алгоритмы заменены дискретными по схеме Рунге–Кутты. Модель Земли принята в виде сферы.

При моделировании вначале ($t < 500$ с) на неподвижном относительно Земли подвижном объекте производилась начальная выставка [5]. Затем с момента времени $t = 1000$ и до конца моделирования включалась качка объекта по каналам курса Ψ , тангажа θ и крена γ

$$\Psi = \Psi_a \sin(\omega_\Psi t + \Delta\chi_\Psi); \theta = \theta_a \sin(\omega_\theta t + \Delta\chi_\theta); \gamma = \gamma_a \sin(\omega_\gamma t + \Delta\chi_\gamma), \quad (3)$$

где $\theta_a, \gamma_a, \Psi_a$ – амплитуды качки по каналам тангажа, крена и курса, изменяющиеся плавно, по экспоненциальному закону

$$\theta_a = 0,1 \cdot (1 - e^{-0,6(t-t_0)}); \Psi_a = 0,1 \cdot (1 - e^{-0,6(t-t_0)}); \gamma_a = 0,1 \cdot (1 - e^{-0,6(t-t_0)}). \quad (4)$$

Здесь $\omega_\Psi, \omega_\theta, \omega_\gamma$ – угловые частоты качки по каналам курса, тангажа и крена, равные соответственно 0,628; 0,314 и 1,256 рад/с, $\Delta\chi_\Psi, \Delta\chi_\theta, \Delta\chi_\gamma$ – фазы качки по каналам курса, тангажа и крена, равные соответственно 0; 0,7 и 0,4 рад.

Также для подвижного объекта задавалось равноускоренное движение по двум осям ξ_1 и ξ_3 с последующим движением с постоянной скоростью:

$$t = 1200 \dots 1220 \text{ с}, v_{\xi_1} = \frac{dv_{\xi_1}}{dt} \cdot (t - 1200) \text{ м/с}; v_{\xi_3} = \frac{dv_{\xi_3}}{dt} \cdot (t - 1200) \text{ м/с}; \frac{dv_{\xi_1}}{dt} = \frac{dv_{\xi_3}}{dt} = 1 \text{ м/с}^2; \\ t > 1220 \text{ с}, v_{\xi_1} = 20 \text{ м/с}, \frac{dv_{\xi_1}}{dt} = \frac{dv_{\xi_3}}{dt} = 0 \text{ м/с}^2. \quad (5)$$

На рис. 7 представлены погрешности определения с помощью БИНС декартовых координат местоположения объекта в северном ($\Delta\zeta_1$) и восточном ($\Delta\zeta_3$) направлениях, а также угла курса ($\Delta\Psi$) по алгоритмам идеальной работы, то есть при отсутствии погрешностей у ДПИ. При математическом моделировании работы БИНС применялся метод Рунге-Кутты 4(5) порядков [3] с варьируемым шагом, не превышающим 0,01 с. Данное моделирование является практически эталонным.

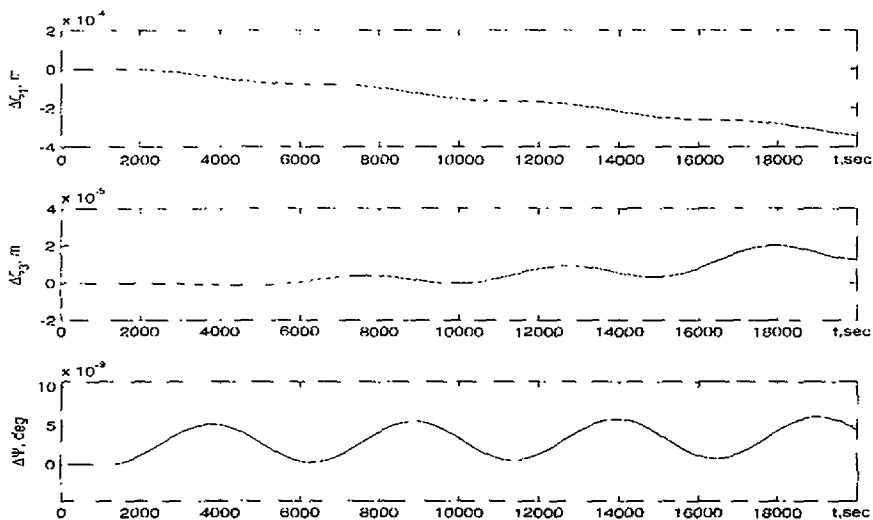


Рис. 7. Погрешности определения БИНС координат места и угла курса

Из графиков следует, что погрешности накапливаются со временем, в них наблюдаются колебания с периодом Шулера и к моменту времени $t=2\cdot 10^4$, с. достигают значений $\Delta\zeta_1=3,5\cdot 10^{-4}$; $\Delta\zeta_3=1,2\cdot 10^{-5}$ м; $\Delta\Psi=8\cdot 10^{-9}$ угл. град. По углам рыскания, крена и тангажа погрешности еще меньше, по путевым скоростям ΔV_{ζ_1} и ΔV_{ζ_3} погрешности достигают значений $0,6\cdot 10^{-10}$ и $4\cdot 10^{-14}$ м/с. Нетрудно видеть, что при компенсации переносных ускорений и скоростной погрешности, например от сигналов GPS, БИНС обладает высокой точностью.

Для оценки влияния погрешностей ДПИ были учтены погрешности ВОГ:

- систематических составляющих дрейфов $\Delta\omega_{xi}=0,01$ ($i=1,2,3$) угл. град/ч;
- погрешностей масштабных коэффициентов $\delta\omega_{xi}=10^{-4}$ ($i=1,2,3$);
- погрешностей несимметрии статических характеристик ВОГ $A\omega_{xi}=10^{-6}$ ($i=1,2,3$).

Погрешности у акселерометров вначале отсутствуют.

В результате проведенного математического моделирования для тех же условий получены следующие погрешности БИНС: $\Delta\Psi=0,06$ угл. град; $\Delta\zeta_1=4200$, $\Delta\zeta_3=900$ км; $\Delta\theta=2\cdot 10^{-3}$, $\Delta\gamma=4\cdot 10^{-3}$ угл. град.

При учете еще и погрешностей акселерометров $\Delta W_{xi}=10^{-4}$ м/с²; $\delta W_{xi}=10^{-4}$ ($i=1,2,3$) погрешности БИНС составили следующие максимальные значения к моменту времени $t=20\cdot 10^4$ с: $\Delta\psi=0,03$; $\Delta\Psi=0,06$; $\Delta\theta=7\cdot 10^{-3}$; $\Delta\gamma=1\cdot 10^{-2}$ угл. град; $\Delta\zeta_1=4,2$; $\Delta\zeta_3=1$ км.

Для оценки влияния шумов ВОГ и акселерометров на точность БИНС отметим следующие обстоятельства - шумы исследуемых ВОГ имеют низкочастотный характер в основном в диапазоне частот 0–5 Гц [1, 2]. Амплитуды этих шумов имеют в основном значения от 1 до 10^0 /ч [8]. В результате экспериментальных исследований было определено, что низкочастотные шумы оказывают существенное влияние на точность БИНС и, скорее всего, детектируются за счет асимметрии статических характеристик ВОГ и акселерометров.

Поскольку применение экспериментально выполняемых записей сигналов датчиков ограничено рядом причин, таких как длительность записи, частота опроса, ее непостоянство, наличие в сигналах датчиков посторонних шумов и информации (например, в ВОГ – угловые скорости вращения Земли и угловые скорости дрейфов) была разработана методика генерации «цветных» шумов по заданным коэффициентам вариации Аллана. За основу была взята методика, изложенная в [9–12]. У полученных сигналов имеют место практически одинаковые с экспериментальными сигналами датчиков спектральные характеристики плотности мощности шумов.

Результаты моделирования работы БИНС с учетом генерированных шумов свидетельствуют о том, что погрешности за счет шумов возросли до величин: $\Delta\psi=0,05$; $\Delta\Psi=0,1$; $\Delta\theta=5\cdot 10^{-3}$; $\Delta\gamma=1\cdot 10^{-2}$ угл. град; $\Delta\zeta_1=6$, $\Delta\zeta_3=2,3$ км.

На рис. 8 представлены графики погрешностей БИНС по указанным выше кинематическим параметрам.

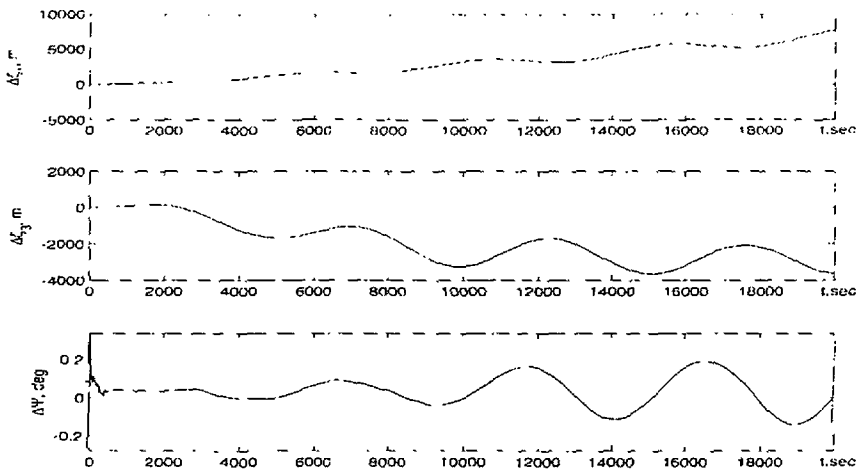


Рис. 8. Графики погрешностей БИНС

Анализ погрешностей БИНС по результатам математического моделирования показал, что при использовании в них волоконно-оптических гироскопов различных типов погрешности по углу рыскания изменяются от 13 (с ВГ951) до 0,35° (ПНСК 40-018) за 15000 с. По широте места погрешности составили значения от 825 (ВГ951) до 31 км (ПНСК 40-018) за то же время. Установлено, что при отсутствии шумов, которые преимущественно являются низкочастотными, указанные выше погрешности меньше для ПНСК 40-018 в 2-3 раза, а для ВГ951 в 5-10 раз, чем указанные выше. Для снижения погрешностей, вызванных влиянием «цветного» шума, необходимо применение фильтрации сигналов ДПИ.

В целях выявления влияния отдельных факторов на погрешность БИНС была проведена серия математических моделирований, при которых раздельно оценивались:

- влияние амплитуды шумовых составляющих сигналов ВОГ (в качестве шумовой составляющей сигнала ВОГ задавался «белый» шум с СКО=0,6; 0,1; 3 °/ч);
- влияние асимметрии масштабного коэффициента ВОГ (задавались $A\omega_{\text{н}}=0,0001; 0,00003; 0,00001\%$ ($i=1, 2, 3$));
- влияние сдвига нулевого сигнала акселерометров (задавались $\Delta W_{\text{н}}=10^{-2}; 10^{-3}; 10^{-4} \text{ м/с}^2$ ($i=1, 2, 3$)).

Для более точной оценки влияния перечисленных параметров остальные погрешности ДПИ были исключены из расчетов. Результаты моделирования в виде зависимостей результирующих погрешностей $\Delta\zeta_1$, $\Delta\zeta_3$ и $\Delta\Psi$ от указанных выше параметров представлены на рис. 9-11.

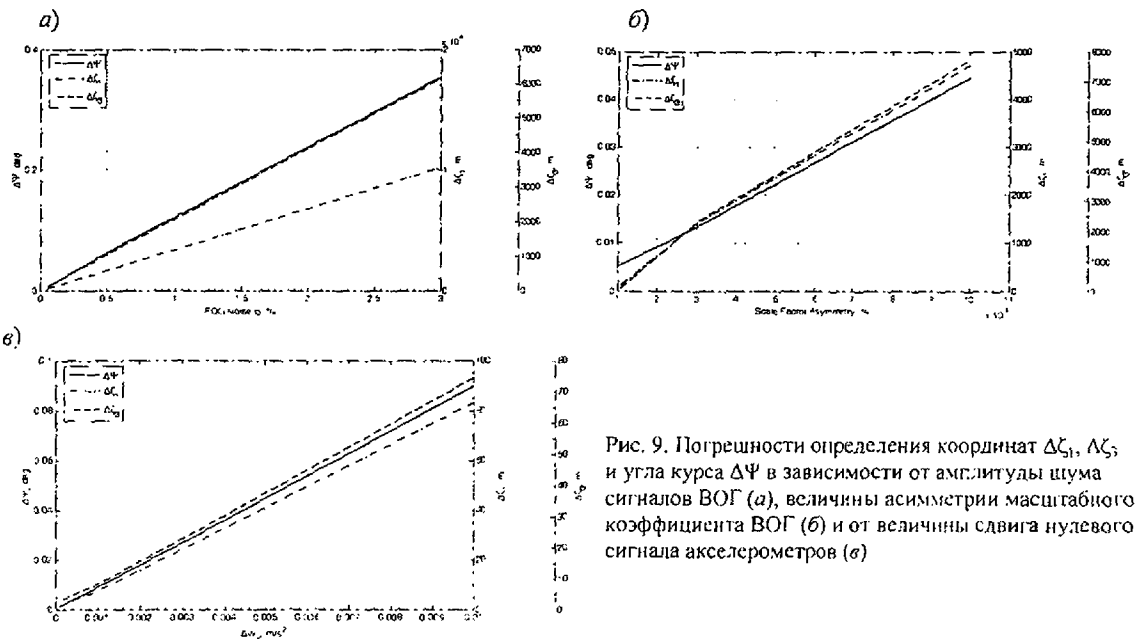


Рис. 9. Погрешности определения координат $\Delta\zeta_1$, $\Delta\zeta_3$ и угла курса $\Delta\Psi$ в зависимости от амплитуды шума сигналов ВОГ (а), величины асимметрии масштабного коэффициента ВОГ (б) и от величины сдвига нулевого сигнала акселерометров (в)

Как следует из графиков, амплитуда шума в сигнале ВОГ, как и величина асимметрии масштабного коэффициента оказывают, значительное влияние на точность определения координат и угла курса. При увеличении СКО шума выходного сигнала ВОГ с 0,06 до 3 % погрешности определения координат $\Delta\zeta_1$ и $\Delta\zeta_2$ возросли с 202 и 125 м до 10,1 и 6,1 км соответственно. Погрешность определения угла курса $\Delta\Psi$ возросла с 0,007 до 0,35°. Рост величины асимметрии масштабного коэффициента ВОГ с 10^{-5} до 10^{-4} дает изменение погрешностей определения координат $\Delta\zeta_1$ и $\Delta\zeta_2$ с 85 и 17 м до 4,7 и 7,7 км соответственно, а погрешностей определения угла курса $\Delta\Psi$ с 0,005 до 0,045°. Величины сдвигов нулевых сигналов акселерометров также влияют на точность определения параметров с помощью БИНС, причем зависимость близка к описываемой в [4]

$$\Delta\Psi = \frac{\Delta\omega_x}{U \cos \varphi} + \frac{\Delta W_x}{g} I g \varphi, \quad (6)$$

где φ – широта места, g – ускорение свободного падения.

При росте величины сдвига нулевого сигнала акселерометров с 0,0001 до 0,01 м/с² погрешности определения координат $\Delta\zeta_1$ и $\Delta\zeta_2$ увеличиваются с 1,5 и 2,9 м до 83 и 75 м соответственно. Погрешность определения угла курса $\Delta\Psi$ увеличивается с 0,001 до 0,09°.

Литература

1. **IEEE Std 952-1997.** IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
2. **А.С. Буравлев, Л.Г. Лисин.** Использование вариации Аллана при исследовании шумовых характеристик волоконно-оптических гироскопов. Доклад VIII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением" - СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2006. (<http://www.elektroprigor.sph.ru/cnf/kmu8/dokl/s4-7.zip>)
3. **P.J. Prince & J.R. Dorman.** High order embedded Runge-Kutta formulae. J.Comp. Appl. Math. 1981, Vol. 7. pp. 67-75.
4. **T. Gaiffe, Y. Cottreau, N. Faussot, G. Hardy, P. Simonpietri, H. Lefevre and H. Arditty.** Highly Compact Fiber Optic Gyrocompass for applications at depths up to 3,000 meters. Underwater Technology, 2000. UT 00. Proceedings of the 2000 International Symposium on Volume, Issue, 2000 Page(s):155 - 160.
5. **Плотников П.К.** Теория работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации// Гироскопия и навигация, 1999, №3. –с. 23-31.
6. **Анучин О.Н., Емельянец Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Л.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999. –356 с.
7. **Ишлинский А.Ю.** Механика гироскопических систем, М: Изд-во АН СССР, 1963 –483с.
8. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е. и др.** Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности// XIV МКНИС, -С-116, 2007, с.141-150.
9. **S. Plaszczynski.** Generating long streams of $1/f^\alpha$ noise. Fluctuation and Noise Letters. Vol.0.No.0 (2006) 000-000. World Scientific Publishing Company. http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0510/0510081v2.pdf
10. **M.Keshner,** $1/f$ noise. Proc. IEEE. Vol.70 (1982)
11. **N.Kasdin.** Discrete simulation of colored noise and stochastic-processes and $1/f^\alpha$ power-law noise generation. Proc. IEEE. Vol. 83 (1995)
12. **Haiying Hou.** Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance. Department of Geomatics Engineering. UCGE Reports. Number 20201. September 2004.