

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПОСРЕДСТВОМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

© 2016 Д. А. Кутовой, О. И. Маслова, С. Ю. Перепёлкина,
Ю. С. Тиунов, А. А. Федотов

Акционерное общество «Научно-производственное объединение автоматики
имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург

Предложена методика оценки основных характеристик инерциальных измерителей угловой скорости среднего и низкого классов точности, включая шумовые составляющие измерительного канала. Методика основана на обработке выходной информации измерителя посредством дискретного фильтра Калмана и метода вариации Аллана. Оцениваемыми характеристиками являются погрешности масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала, а также ряд типовых шумовых составляющих. Приведены оценки уровня методической погрешности для рассматриваемой методики на основе математического моделирования измерительной информации с внесением в неё различного рода оцениваемых погрешностей. Практическая апробация данной методики показана на примере обработки результатов испытаний, проведённых для двух инерциальных измерителей, основанных на различных принципах действия. Один из них – прибор ВГ910-МК470 разработки ЗАО «Физоптика», г. Арзамас, содержащий один волоконно-оптический гироскоп среднего класса точности, второй – прибор ADIS16405 разработки Analog Devices (США), реализованный на базе трёх микромеханических гироскопов низкого класса точности.

Инерциальный измеритель угловой скорости, волоконно-оптический гироскоп, микромеханический гироскоп, фильтр Калмана, вариация Аллана, стендовые испытания.

Введение

В настоящей работе рассмотрены методические аспекты оценки основных характеристик инерциальных измерителей угловой скорости в части погрешностей масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала, а также ряда типовых шумовых составляющих измерительного канала.

Раздел методики, касающийся оценки погрешностей масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала, предназначен к использованию, в первую очередь, для инерциальных измерителей угловой скорости среднего и низкого классов точности. К таким измерителям относятся, например, ряд волоконно-

оптических гироскопов (ВОГ) и микромеханические гироскопы (ММГ).

Характерной особенностью средне- и низкоточных измерителей угловой скорости является их «нечувствительность» в стационарных условиях неподвижного основания к вектору угловой скорости вращения Земли $\vec{\Omega}$. Указанное обстоятельство делает неэффективным использование классических методов калибровки, которые базируются на показаниях, полученных при выставке измерительных осей чувствительных элементов в различные характерные положения относительно вектора $\vec{\Omega}$. В связи с этим исследование средне- и низкоточных измерителей угловой скорости проводилось в условиях

Цитирование: Кутовой Д.А., Маслова О.И., Перепёлкина С.Ю., Тиунов Ю.С., Федотов А.А. Методика оценки характеристик измерителя угловой скорости посредством фильтра Калмана и вариации Аллана // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 171-182. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-171-182

подвижного основания на одноосном стенде качания отработочной позиции АО «НПО автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург (НПОА). При этом оценка погрешностей осуществлялась посредством дискретного фильтра Калмана путём сравнительного анализа оценок, полученных на основе выходной информации исследуемого образца инерциального измерителя и высокоточного синусно-косинусного датчика угла (СКДУ), также установленного на стенде качания.

Второй раздел методики, касающийся оценки типовых шумовых составляющих измерительного канала, в отличие от первого не зависит от класса точности измерителя и строится на обработке показаний, зарегистрированных в стационарном положении прибора при длительном интервале наблюдения (1.5, ..., 3.0 ч и более) в запуске. Обработка проводится по методу вариации Аллана [1].

Согласно руководству [2] идентификация типовых шумовых составляющих осуществляется путём нахождения соответствующих коэффициентов полиномиального разложения кривой вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$. При этом определение коэффициентов аппроксимирующего полинома базируется на использовании способа многопараметрической оптимизации нелинейной целевой функции [3].

Описанная методика реализована посредством специализированного программно-математического обеспечения разработки НПОА и успешно апробирована на двух образцах измерителей угловой скорости среднего и низкого классов точности – приборе ВГ910-МК470 разработки ЗАО «Физоптика» (г. Арзамас) с аналоговым выходом и приборе ADIS16405 разработки Analog Devices (США) с цифровым выходом соответственно.

Оценка точностных характеристик измерителя угловой скорости посредством дискретного фильтра Калмана

Подвижное основание для проведения исследований точностных характеристик измерителя угловой скорости реализовано посредством одноосного стенда качания. Испытываемый образец размещается на стенде таким образом, чтобы его исследуемая измерительная ось была номинально сонаправлена с осью качания. Параметры изменения угла заклона стенда задаются программно в виде синусно-косинусных гармонических колебаний с определёнными периодом и амплитудой и регистрируются в том числе с помощью высокоточного СКДУ, установленного непосредственно на оси качания стенда [4]. Определение погрешностей масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала в условиях колебаний стенда качания основано на обработке посредством дискретного фильтра Калмана значений углов заклона стенда по информации СКДУ и тех же углов заклона, полученных путём интегрирования угловой скорости, поступающей с выхода исследуемого измерителя угловой скорости.

При формировании рекуррентного дискретного фильтра Калмана принята следующая модель измеряемого угла заклона стенда качания:

$$\varphi(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_0\right) + \varphi_0 + \omega_0 t + \dot{\omega}_0 \frac{t^2}{2},$$

где $\varphi(t)$ – измеряемый угол заклона стенда качания; A – амплитуда гармонических колебаний; T – период гармонических колебаний; t – текущее время записи информации в запуске; ψ_0 – начальная фаза гармонических колебаний; φ_0 – отклонение оси колебаний от нулевого значения; ω_0 – угловая скорость, эквивалентная смещению нулевого сигнала; $\dot{\omega}_0$ – линейное изменение ω_0 в течение запуска.

Следует отметить, что в случае обработки сигнала СКДУ оценку угла φ_0 можно интерпретировать как суммарную оценку отклонения оси качания и смещения нулевого сигнала в течение запуска, а оценку угловой скорости ω_0 – как дрейф угла φ_0 в течение запуска.

На каждом дискретном i -м шаге обработки в качестве вектора состояния (вектора оценок) принимается вектор:

$$\hat{X}_i = \left(\hat{X}_{1i} \quad \hat{X}_{2i} \quad \hat{X}_{3i} \quad \hat{X}_{4i} \quad \hat{X}_{5i} \right)^T,$$

где $\hat{X}_{1i} = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_i + \psi_0\right),$

$$\hat{X}_{2i} = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_i + \psi_0\right),$$

$$\hat{X}_{3i} = \varphi_i = \varphi_0 + \omega_0 t_i + \dot{\omega}_0 \frac{t_i^2}{2},$$

$$\hat{X}_{4i} = \omega_i = \omega_0 + \dot{\omega}_0 t_i,$$

$\hat{X}_{5i} = \dot{\omega}_0$ – текущая оценка нестабильности смещения нулевого сигнала в запуске, $t_i = (i-1)\Delta t_i$ – текущее дискретное время запуска с шагом опроса измерителя Δt_i .

При этом переходная матрица состояния Φ_i имеет следующий вид:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_i\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_i\right) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_i\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_i\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t_i & \frac{\Delta t_i^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Оценка вектора состояния \hat{X}_i вычисляется в соответствии с рекуррентным алгоритмом дискретного фильтра Калмана [5], в котором текущая оценка, полученная на основе принятой модели динамической системы, корректируется с поступлением следующего измерения. Далее

на основании оценки \hat{X}_i вычисляют амплитуду \hat{A}_i и угловую скорость $\hat{\omega}_0$ гармонических колебаний стэнда качания как:

$$\hat{A}_i = \sqrt{\left(\hat{X}_{1i}\right)^2 + \left(\hat{X}_{2i}\right)^2}, \quad \hat{\omega}_0 = \hat{X}_{4i} - \hat{X}_{5i}t_i.$$

Погрешность масштабного коэффициента тарированного измерителя угловой скорости $\Delta\rho^H$ оценивается по формуле

$$\Delta\rho^H = \left(\hat{A}^H - \hat{A}^{СКДУ}\right) / \hat{A}^{СКДУ}. \quad (1)$$

Поскольку модель погрешностей СКДУ [6; 7] не предусматривает дрейф смещения нулевого сигнала датчика, то оценка $\Delta\hat{\omega}_0^{СКДУ}$, полученная по результатам обработки измерений СКДУ, характеризует только дрейф положения оси колебаний стэнда качания в процессе запуска. Соответственно для измерителя угловой скорости оценку погрешности смещения нулевого сигнала $\Delta\omega_0^H$ и его дрейфа $\Delta\dot{\omega}_0^H$ определяют следующим образом:

$$\Delta\omega_0^H = \Delta\hat{\omega}_0^H - \Delta\hat{\omega}_0^{СКДУ}, \quad (2)$$

$$\Delta\dot{\omega}_0^H = \Delta\hat{\dot{\omega}}_0^H - \Delta\hat{\dot{\omega}}_0^{СКДУ}. \quad (3)$$

Оценка методической погрешности предложенного способа тарировки проводилась по специальной программе разработки НПОА путём математического моделирования угла заклона стэнда качания $\varphi_{СТ}(t_i)$ и соответствующих показаний датчика СКДУ $\varphi^{СКДУ}(\tilde{t}_i)$ и измерителя угловой скорости $\omega^H(\tilde{t}_i)$.

Модель угла заклона стэнда качания в условиях гармонических колебаний с учётом дрейфа оси качания представляется в следующем виде:

$$\varphi_{СТ}(t_i) = (A + \Delta A) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_i\right) + \varphi_0 + (\omega_0 + \Delta\omega_0)t_i + \dot{\omega}_0 \frac{t_i^2}{2},$$

где ΔA , $\Delta \omega_0$ – шумы системы, рассматриваемые как гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием.

Модель измерений СКДУ $\varphi^{СКДУ}(\tilde{t}_i)$, включающая шум аналого-цифрового преобразования Δd_1 , квантование выходного сигнала по уровню d_1 и с учётом разрядности цифрового представления сигнала d_2 , а также неравномерность шага съёма информации $\tilde{t}_i = t_i + \Delta \tilde{t}_i$, записывается в виде:

$$\varphi^{СКДУ}(\tilde{t}_i) = \left[\frac{[\varphi_{СТ}(t_i) / d_1]_{ЦЧ} d_1 + \Delta d_1}{d_2} \right]_{ЦЧ} d_2,$$

где $[...]_{ЦЧ}$ – операция взятия целой части числа; Δd_1 и $\Delta \tilde{t}_i$ – шумы системы, рассматриваемые как гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием.

Модель выходной информации измерителя угловой скорости $\omega^H(\tilde{t}_i)$ с учётом разрядности цифрового представления сигнала d^H определяется как

$$\omega^H(\tilde{t}_i) = \left[\frac{\dot{\varphi}_{СТ}(\tilde{t}_i) \cos(\Delta \vartheta + \delta \Delta \vartheta)}{d^H} + \frac{(\omega_0^H + \delta \Delta \omega_0^H) + \dot{\omega}_0^H \tilde{t}_i}{d^H} \right]_{ЦЧ} d^H,$$

где $\Delta \vartheta$ – угол между измерительной осью датчика и осью качания стенда; $\delta \Delta \vartheta$ и $\delta \Delta \omega_0^H$ – нестабильность угла $\Delta \vartheta$ и смещения нулевого сигнала $\Delta \omega_0^H$ в запуске соответственно, рассматриваемые как гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием.

Обработка моделируемых сигналов $\varphi^{СКДУ}(\tilde{t}_i)$ и $\varphi^H(\tilde{t}_i) = \int_0^{\tilde{t}_i} \omega^H(\tau) d\tau$, подаваемых на вход дискретного фильтра Калмана, и сравнение полученных оценок (1) – (3) показали [4], что с доверительной ве-

роятностью $\gamma = 0.999$ методическая погрешность оценки масштабного коэффициента $\Delta \rho^H$ находится в интервале $[-0.008; 0.0498]\%$; смещение нулевого сигнала $\Delta \omega_0^H$ не превышает $\sim 0.8\%$ от заданной величины; дрейфа нулевого сигнала $\Delta \dot{\omega}_0^H$ не превышает $\sim 3.4\%$ от заданной величины.

Полученные по результатам моделирования оценки методической погрешности величин $\Delta \rho^H$ и $\Delta \omega_0^H$ не превышают уровня случайных составляющих соответствующих погрешностей, характерных для измерителей угловой скорости среднего и низкого классов точности.

В связи с этим изложенный способ тарирования посредством дискретного фильтра Калмана может быть использован для измерителей угловой скорости среднего и низкого классов точности [8], для которых случайные составляющие погрешности от запуска к запуску (σ) в части масштабного коэффициента превышают уровень 0.05% , а в части смещения нулевого сигнала превышают уровень 0.0004 угл.град/с [4].

Оценка шумовых составляющих измерительного канала посредством метода вариации Аллана

Оценка шумовых составляющих измерительного канала по методу вариации Аллана строится на обработке показаний измерителя, зарегистрированных в течение длительного интервала наблюдения при стационарном положении самого измерителя. При этом каких-то специальных требований к его ориентации относительно измеряемой величины не предъявляется.

Формула для расчёта вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ при условии равномерного шага опроса инерциального измерителя имеет следующий вид:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{L-2l} \left[\sum_{i=1}^l (\Delta N(t_{n+i}) - \Delta N(t_{n+l+i})) \right]^2}{2\tau^2(L-2l+1)},$$

где $\tau = l\Delta t$ – интервал осреднения данных измерителя; l – количество опросов на интервале осреднения ($l = 1, 2, \dots \leq L/2$); L – общее количество опросов в обрабатываемом наборе информации; $\Delta t = (t_i - t_{i-1})$ – шаг опроса данных измерителя; $\Delta N(t_i)$ – данные инерциального измерителя за шаг опроса Δt .

Длительность интервала наблюдения определяется количеством измерений, необходимых для достижения требуемой точности оценки шумовых характеристик. В теории [2] расчёт вариации Аллана предполагается проводить на интервале $0 < \tau \leq L/2$ с шагом съёма первичной измерительной информации Δt при общем количестве опросов измерителя в запуске L .

Однако на практике, с целью сокращения времени вычислений в 10^3 раз с одновременным сохранением точности вычислений, расчёт вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ предлагается осуществлять с сохранением равномерности шага осреднения в логарифмическом масштабе [3].

При этом формула для вычисления интервала осреднения данных принимает следующий вид:

$$\{\tau_k\} = \left\{ \Delta t \left[2^{0,1k} \right]_{цч} \right\},$$

где

$$k = 0, 1, \dots, NK \text{ и } NK = 10 \left[\log_2(L/2) \right]_{цч}.$$

Оценка шумовых составляющих измерительного канала осуществляется путём представления вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ посредством аппроксимирующего полинома $p_A^2(\tau)$ следующего вида [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau) &\approx p_A^2(\tau) = \\ &= R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициенты R, K, B, N, Q связаны определёнными соотношениями [2; 9] с известными типовыми шумовыми составляющими – трендом выходного сигнала, случайным блужданием скорости изменения выходного сигнала, нестабильностью смещения нулевого сигнала, случайным блужданием выходного сигнала и шумом квантования соответственно.

При этом на $\sigma_A(\tau)$ -графике кривой вариации Аллана, построенном по квадратному корню из значений вариации Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ относительно интервала осреднения τ в логарифмическом масштабе по обеим осям, коэффициенты R, K, B, N, Q соответствуют участкам с наклонами «1», «1/2», «0», «-1/2», и «-1» [2; 9].

Известно [3; 10; 11], что классическое применение метода наименьших квадратов (МНК) для определения численных значений коэффициентов R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2 полинома $p_A^2(\tau)$ может дать некорректный результат в виде отрицательных значений, что, в свою очередь, не позволит сделать физическую интерпретацию полученных оценок. В связи с этим вместо МНК предлагается использовать способ многопараметрической оптимизации, заключающийся в минимизации по набору коэффициентов R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2 для заданного набора интервалов осреднения $\{\tau_k\}$ нелинейной целевой функции вида [3]:

$$\sum_{k=0}^K \left| \ln(\sigma_A^2(\tau_k)) - \ln(p_A^2(\tau_k)) \right| \rightarrow \min_{R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2}.$$

Апробация методики на образцах углоизмерительных приборов

Описанная методика прошла практическую апробацию при обработке результатов испытаний двух образцов измерителей – прибора ВГ910-МК470 разработки ЗАО «Физоптика», г. Арзамас, содержащего один ВОГ среднего класса точности, и прибора ADIS16405 разработки Analog Devices (США), реализованного на базе трёх ММГ низкого класса точности. Информация с выхода обоих приборов пропорциональна значению проекции вектора угловой скорости на соответствующую измерительную ось в момент опроса.

Практическая оценка погрешностей масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала и дрейфа нулевого сигнала с использованием фильтра Калмана сделана по девяти запускам с прибором ВГ910-МК470 длительностью и по десяти запускам с прибором ADIS16405. Запись выходной информации с приборов осуществлялась в течение 15 мин с шагом опроса (0.001 – 0.010) с и (0.002 – 0.003) с соответственно. Результаты статистической обработки – математическое ожидание (м.о.) и среднее квадратичное отклонение (СКО) для каждой оцениваемой характеристики – представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценка погрешностей масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала и дрейфа нулевого сигнала с использованием фильтра Калмана по результатам испытаний прибора ВГ910-МК470 (девять запусков) и прибора ADIS16405 (десять запусков)

Прибор		Погрешность масштабного коэффициента, % $\Delta\rho^H$		Погрешность смещения нулевого сигнала, угл.град/с $\Delta\omega_0^H$		Погрешность дрейфа нулевого сигнала, угл.град/с ² ·10 ⁻⁵ $\Delta\dot{\omega}_0^H$	
		М.о.	СКО (σ)	М.о.	СКО (σ)	М.о.	СКО (σ)
ВГ910-МК470		1.85	0.43	-0.04	0.04	-1.86	4.49
ADIS16405	Ось X	-0.09	1.00	-0.58	0.17	-4.14	11.67
	Ось Y	0.21	0.82	-0.04	0.10	11.90	26.61
	Ось Z	-0.28	0.91	0.11	0.02	0.03	8.40

Как следует из данных табл. 1, средние значения величин погрешностей $\Delta\rho^H$, $\Delta\omega_0^H$ и $\Delta\dot{\omega}_0^H$ для прибора ВГ910-МК470 находятся на уровне 1.85 %, (-0.04) угл.град/с, и $(-1.86 \cdot 10^{-5})$ угл.град/с² соответственно.

Для прибора ADIS16405 средние значения аналогичных величин погрешностей, сделанные по трем измерительным осям X, Y и Z, находятся на уровне (-0.09)%, (-0.58) угл.град/с и $(-4.14 \cdot 10^{-5})$ угл.град/с² (ось X); 0.21 %, (-0.04) угл.град/с и $11.90 \cdot 10^{-5}$ угл.град/с² (ось Y); (-0.28)%, 0.11 угл.град/с и $0.03 \cdot 10^{-5}$ угл.град/с² (ось Z).

Для обоих приборов статистические оценки являются достоверными, т.к. их уровень значительно превышает рассчитанную ранее величину методической погрешности $\Delta\rho^H$ и $\Delta\omega_0^H$.

Практическая оценка шумовых составляющих измерительных каналов проведена по шести запускам с прибором ВГ910-МК470 и по трём запускам с прибором ADIS16405. Запись выходной информации с приборов осуществлялась в течение 1.5 ч с шагом опроса 0.010 с и в течение 3 ч с шагом опроса 0.003 с соответственно.

На рис. 1 и 2 показаны $\sigma_A(\tau)$ -графики кривой вариации Аллана, построенные по результатам прогонов с приборами ВГ910-МК470 и ADIS16405

(для измерительного канала по оси X) соответственно. При этом в обработку для построения кривой вариации Аллана взяты приращения углов, вычисленные как текущие значения угловой скорости, умноженные на шаг опроса данных измерителя: $\Delta\varphi(t_i) = \omega(t_i)\Delta t$. В виде двух пунктирных линий на рисунках показаны

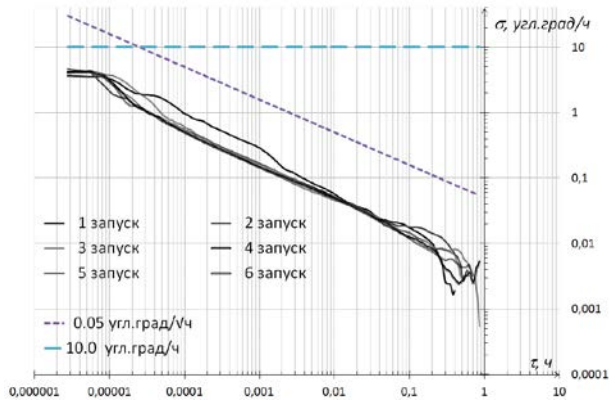


Рис. 1. Вид $\sigma_A(\tau)$ -графика вариации Аллана для шести запусков с прибором ВГ910-МК470 и пунктирных линий, соответствующих заявленным разработчиком прибора характеристикам

Как следует из рис. 1, на $\sigma_A(\tau)$ -графике кривой вариации Аллана характерный наклон « -1 » отсутствует, наклон « $-1/2$ » присутствует в явном виде, наклон « 0 » не имеет ярко выраженного характера. Отсутствие наклонов « $1/2$ » и « 1 » связано, в первую очередь, с ограниченностью имеющегося интервала записи данных с выхода прибора ВГ910-МК470. Таким образом, оценке подлежит только коэффициент N , характеризующийся наклоном « $-1/2$ » и соответствующий величине случайного блуждания угла.

В части наклонов « -1 », « $-1/2$ », « $1/2$ » и « 1 » на графике рис. 2 получены аналогичные заключения, что и для рис. 1. Отличие рис. 2 от рис. 1 заключается в присутствии участка с наклоном « 0 ». В связи с этим для прибора ADIS16405 наряду с коэффи-

соответствующие наклоны кривой вариации Аллана для заявленных разработчиками приборов величин шумовых составляющих измерительного канала – нестабильности смещения нулевого сигнала (наклон « 0 ») и углового случайного дрейфа (наклон « $-1/2$ »).

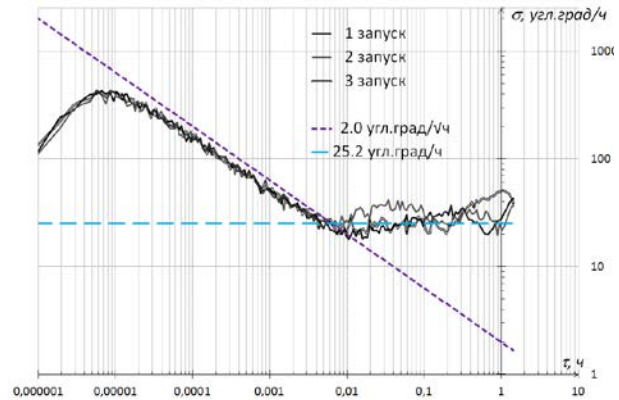


Рис. 2. Вид $\sigma_A(\tau)$ -графика вариации Аллана для трёх запусков с прибором ADIS16405 (ось X) и пунктирных линий, соответствующих заявленным разработчиком прибора характеристикам

циентом N дополнительно можно оценить и коэффициент B , соответствующий нестабильности смещения нулевого сигнала.

Следует также заметить, что «неклассический» вид начального участка $\sigma_A(\tau)$ -графика на рис. 2 обусловлен коррелированностью соседних значений измерительной информации [12], связанной с предобработкой (сглаживанием) первичной информации в самом приборе ADIS16405 [13]. В дальнейшем планируется доработать рассматриваемую методику в части анализа коррелированных шумовых составляющих вариации Аллана.

Результаты статистической обработки запусков по обоим приборам приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка шумовых составляющих в измерительной информации приборов ВГ910-МК470 и ADIS16405 по методу вариации Аллана

Прибор	Случайное блуждание угла, угл.град/ $\sqrt{ч}$ N			Нестабильность смещения нулевого сигнала, угл.град/ч B		
	Допуск по паспорту разработчика, не более	М.о.	СКО (σ)	Допуск по паспорту разработчика, не более	М.о.	СКО (σ)
ВГ910-МК470	0.050	0.005	0.001	10.0	– *	–
ADIS16405	Ось X	2.0	1.890	25.2	36.950	3.824
	Ось Y		1.648			1.409
	Ось Z		1.463			8.008

Примечание: *Символ «–» указывает на отсутствие данных.

Анализ данных табл. 2 в части прибора ВГ910-МК470 показал, что среднее значение коэффициента N , полученное на уровне ~ 0.005 угл.град/ $\sqrt{ч}$ при СКО ~ 0.001 угл.град/ $\sqrt{ч}$, не превышает заявленного разработчиком значения 0.050 угл.град/ $\sqrt{ч}$. Оценки коэффициента B , имеющие большой разброс от запуска к запуску, ввиду своей недостоверности не приводятся. В связи с тем, что на рис.1 пунктирная горизонтальная линия, характеризующая заявленную разработчиком величину, находится выше участка перехода $\sigma_A(\tau)$ -графиков от наклона « $-\frac{1}{2}$ » к неявно выраженному наклону «0», можно сказать, что нестабильность смещения нулевого сигнала не превышает заявленного разработчиком значения.

Анализ данных табл. 2 в части прибора ADIS16405 показал следующее:

- средние значения коэффициента N по осям X, Y и Z, полученные на уровне $\sim (1.890, 1.648$ и $1.463)$ угл.град/ $\sqrt{ч}$ при СКО $\sim (0.041, 0.005$ и $0.029)$ угл.град/ $\sqrt{ч}$ соответственно, не превышают заявленного разработчиком значения 2.0 угл.град/ $\sqrt{ч}$;

- средние значения коэффициента B по осям X, Y и Z, полученные на уровне $\sim (36.950, 31.058$ и $30.724)$ угл.град/ч при СКО $\sim (3.824, 1.409$ и $8.008)$ угл.град/ч соответственно, превышают паспортное значение 25.2 угл.град/ч на множители $\sim (1/0.81, 1/0.68$ и $1/0.82)$. В то же время следует отметить соответствие исследуе-

мого участка кривой вариации Аллана в запусках величине 25.2 угл.град/ч (пунктирная горизонтальная линия на рис. 2), заявленной разработчиком [13] как нестабильность смещения нулевого сигнала в запуске.

Сопоставляя рис. 2 с приведённым разработчиком [13] графиком вариации Аллана, можно утверждать, что в документации на прибор ADIS16405 при определении нестабильности смещения нулевого сигнала в запуске не учтён множитель $\sqrt{\frac{2}{\pi}} \ln 2 \approx 0.664$, стоящий при B в формуле (4). Данный множитель (названный в работе [14] коэффициентом нестабильности нуля гироскопа) определяет соответствующий коэффициент пересчёта, равный $1/0.664$.

С учётом указанной правки нестабильность смещения нулевого сигнала должна находиться на уровне 38.0 угл.град/ч вместо заявленного значения 25.2 угл.град/ч. При этом полученные опытным путём оценки коэффициента B будут находиться в допуске.

Заключение

Разработана методика, позволяющая оценить ряд точностных характеристик инерциальных измерителей угловой скорости посредством фильтра Калмана и ряд типовых шумовых составляющих измерительного канала посредством вариации Аллана.

Изложены результаты практической апробации данной методики на примере исследования на позициях НПОА двух инерциальных измерителей угловой скорости, основанных на различных принципах действия: прибора ВГ910-МК470 среднего класса точности и прибора ADIS16405 низкого класса точности. Для

рассматриваемых образцов приборов приведены статистические оценки масштабного коэффициента и смещения нулевого сигнала, сделанные согласно предложенному способу тарировки, а также некоторых шумовых составляющих измерительных каналов, полученных по методу вариации Аллана.

Библиографический список

1. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. 1966. V. 54, Iss. 2. P. 221-230. DOI: 10.1109/proc.1966.4634
2. IEEE Standard 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
3. Кутовой Д.А., Маслова О.И., Перепёлкина С.Ю., Федотов А.А. К вопросу оценки шумовых составляющих измерительного тракта по методу вариации Аллана // Гироскопия и навигация. 2015. № 2(89). С. 30-39.
4. Маслова О.И., Тиунов Ю.С. Оценка погрешностей измерителя угловой скорости по результатам испытаний на стенде качания // Сборник тезисов VII научно-технической конференции молодых специалистов «Ракетно-космическая техника». Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. Екатеринбург: НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, 2015. С. 116-117.
5. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. Москва: Энергия, 1973. 440 с.
6. Арендт В.Р., Сэвент К.Дж. Практика следящих систем. Москва: Госэнергоиздат, 1962. 556 с.
7. Попков С.Л. Следящие системы. Москва: Высшая школа, 1963. 304 с.
8. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. Миниатюрные волоконно-оптические гироскопы // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 6. С. 742-750.
9. IEEE Standard 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
10. Кутовой Д.А., Ситников П.В., Федотов А.А., Якимов В.Л. Оценка основных характеристик бесплатформенного инерциального блока с использованием вариации Аллана // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 1(43). С. 201-209.
11. Щербицкий Д.С., Дружинин П.В. Определение коэффициентов модели случайной погрешности волоконно-оптического гироскопа методом регрессионного анализа // Материалы XVI конференции молодых учёных «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 201-206.
12. Кутовой В.М., Кутовой Д.А., Маслова О.И., Перепёлкина С.Ю., Ситников П.В., Федотов А.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 229-233.
13. ADIS16400/ADIS16405. Analog Devices: Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer. Data sheet. Rev. B. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16400_16405.pdf

14. Матвеев В.В., Погорелов М.Г. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариации Аллана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 3. С. 123-135.

Информация об авторах

Кутовой Денис Алексеевич, инженер-конструктор, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург. E-mail: kutovoidenis@mail.ru. Область научных интересов: измерительные средства и системы управления.

Маслова Ольга Ивановна, ведущий инженер-программист, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург. E-mail: avt@nproa.ru. Область научных интересов: задачи инерциальной навигации, тарировка инерциальных измерителей.

Перепёлкина Светлана Юрьевна, главный специалист тематического подразделения, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург. E-mail: avt@nproa.ru. Область научных интересов: измерительные средства и системы управления.

Тиунов Юрий Сергеевич, инженер-конструктор, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург. E-mail: avt@nproa.ru. Область научных интересов: задачи инерциальной навигации, тарировка инерциальных измерителей.

Федотов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-конструктор, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург. E-mail: avt@nproa.ru. Область научных интересов: измерительные средства и системы управления.

PROCEDURE OF ESTIMATING CHARACTERISTICS OF ANGULAR VELOCITY METER USING THE KALMAN FILTER AND ALLAN VARIANCE

© 2016 D. A. Kutovoy, O. I. Maslova, S. Y. Perepelkina, Y. S. Tiunov, A. A. Fedotov

JSC «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», Yekaterinburg, Russian Federation

A procedure of assessing the main characteristics of angular velocity inertial meters of middle and low accuracy classes, including measuring channel noise terms is proposed. The procedure is based on the processing of the meter output information by means of the Kalman discrete filter and the Allan variance method. The characteristics to be estimated are: scale coefficient errors and zero signal shifts, as well as series of standard noise terms. Estimates of the method error level for the procedure under consideration are given on the basis of mathematical simulation of the measurement information and its correction with different estimated errors. An example of approbation of the technique is processing the results of tests conducted for two inertial meters based on different operating principles. One of them is the ADIS16405 device developed by Analog Devices (USA) on the basis of three micromechanical gyroscopes of low- accuracy class and the other is the ВГ910-МК470 device designed by Fizoptika, CJSC (Arzamas city) which consists of one fiber-optic gyroscope of the middle -accuracy class.

Allan variance, inertial angular velocity meter, bench test, Kalman filter, fiber-optic gyroscope, micro-mechanical gyroscope.

Citation: Kutovoy D.A., Maslova O.I., Perepelkina S.Y., Tiunov Y.S., Fedotov A.A. Procedure of estimating characteristics of angular velocity meter using the Kalman filter and Allan variance. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 171-180. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-171-182

References

1. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards. *Proceedings of the IEEE*. 1966. V. 54, Iss. 2. P. 221-230. DOI: 10.1109/proc.1966.4634
2. IEEE Standard 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis.
3. Kutovoi D.A., Maslova O.I., Perepelkina S. Yu., Fedotov A.A. Estimating the noise components of measurement channel by Allan variance method. *Gyroscopy and Navigation*. 2016. V. 7, Iss. 1. P. 18-23. DOI: 10.1134/s2075108716010077
4. Maslova O.I., Tiunov Y.S. Otsenka pogreshnostey izmeritelya uglovoy skorosti po rezul'tatam ispytaniy na stende kachaniya. *Sbornik tezisev VII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov «Raketno-kosmicheskaya tekhnika». Ser. XI. Sistemy upravleniya raketnykh kompleksov*. Yekaterinburg: Scientific and Production Association of automatics named after academician N.A. Semikhatov Publ., 2015. P. 116-117. (In Russ.)
5. Medich Dzh. *Statisticheski optimal'nye lineynye otsenki i upravlenie* [Statistically-optimal linear estimates and control]. Moscow: Energiya Publ., 1973. 440 p.
6. Arendt V.R., Sevent K.Dzh. *Praktika sledyashchikh system* [Practices of follow-up systems]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1962. 556 p.
7. Popkov S.L. *Sledyashchie sistemy* [Follow-up systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1963. 304 p.
8. Listvin V.N., Logozinskii V.N. Miniature fiber-optic gyroscopes. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2005. V. 50, Iss. 6. P. 679-686.
9. IEEE Standard 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
10. Kutovoy D.A., Sitnikov P.V., Fedotov A.A., Yakimov V.L. Allan variance-based assessment of basic characteristics of a strapdown inertial sensing unit // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 1(43). P. 201-209. (In Russ.)
11. Shcherbitskiy D.S., Druzhinin P.V. Opredelenie koeffitsientov modeli sluchaynoy pogreshnosti volokonno-opticheskogo giroskopa metodom regressionnogo analiza. *Materialy XVI konferentsii molodykh uchenykh «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem»*. Saint Petersburg: Concern CSRI Elektropribor Publ., 2014. P. 201-206. (In Russ.)
12. Kutovoy V.M., Kutovoy D.A., Maslova O.I., Perepelkina S.U., Sitnikov P.V., Fedotov A.A. Ispol'zovanie variatsii Allana dlya prakticheskogo opredeleniya struktury shumov chuvstvitel'nykh elementov besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy. *Sbornik materialov XXII Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam*. Saint Petersburg: Concern CSRI Elektropribor Publ., 2015. P. 249-252. (In Russ.)
13. ADIS16400/ADIS16405. Analog Devices: Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer. Data sheet. Rev. B. Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16400_16405.pdf
14. Matveev V.V., Pogorelov M.G. Error analysis of micromechanical gyroscopes by Allan variance. *Izvestia TulGu. Technicheskie nauki*. 2015. No. 3. P. 123-135. (In Russ.)

About the authors

Kutovoy Denis Alekseevich, design engineer, «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», JSC, Yekaterinburg, Russian Federation. E-mail: kutovoidenis@mail.ru. Area of Research: measuring devices and control systems.

Maslova Olga Ivanovna, Principal Software Engineer, «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», JSC, Yekaterinburg, Russian Federation. E-mail: avt@npoa.ru. Area of Research: problems of inertial navigation, calibration of inertial meters.

Perepelkina Svetlana Yurievna, Chief Officer of a special division, «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», JSC, Yekaterinburg, Russian Federation. E-mail: avt@npoa.ru. Area of Research: measuring devices and control systems.

Tiunov Yuriy Sergeevich, design engineer, «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», JSC, Yekaterinburg, Russian Federation. E-mail: avt@npoa.ru. Area of Research: problems of inertial navigation, calibration of inertial meters.

Fedotov Andrey Anatolievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Principal Design Engineer, «Scientific & Production Association of Automatics named after Academician N.A. Semikhatov», JSC, Yekaterinburg, Russian Federation. E-mail: avt@npoa.ru. Area of Research: measuring devices and control systems.