

Виды погрешностей микромеханических датчиков и методы их анализа

Н.А. Петрова¹, В.М. Полушкин²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

² Филиал ФГБУ «46 Центральный научно-исследовательский институт» Минобороны России

Аннотация: Целью статьи является анализ видов погрешностей и существующих методов анализа определения случайных погрешностей микромеханических гироскопов и датчиков, в целом. Проводится сравнение различных методов анализа определения случайных погрешностей: автокорреляционный, анализ по спектральной плотности мощности и анализ по вариации Аллана. Данный материал в дальнейшем поспособствует проведению испытаний по определению случайных погрешностей гироскопического датчика серии ТГ-8А, производства ООО «Лаборатория Микроприборов»

Ключевые слова: микромеханические датчики; микромеханические гироскопы; систематические и случайные погрешности; спектральная плотность мощности; автокорреляционный метод; вариация Аллана.

Введение

Микромеханический гироскоп (ММГ) – датчик угловой скорости (ДУС), без которого невозможно представить работу некоторых систем, связанных с движением, например, автомобилей, самолетов, систем движения со стабилизацией, гироскутеров, сигвеев, и даже некоторых электронных средств, ноутбуков и телефонов. Существуют разные виды гироскопов. Их можно классифицировать по видам конструкций, по принципам работы и по точности их работы. В данной статье будут рассмотрены виды погрешностей гироскопов и пути их решения.

Типы погрешностей

Погрешность гироскопа – отклонение измеряемой угловой скорости от ее истинной величины.

Запишем уравнение выходного сигнала ММГ:

$$y = (1 + k)x + b(t) \quad (1)$$

В уравнении (1) y – измеренное ММГ значение величины угловой скорости, а x – истинное значение этой величины. Истинное значение x имеет

где Δ_{SB} – «основная (Basic) систематическая погрешность»; Δ_{SA} – «дополнительная (Additional) систематическая погрешность» [1].

Для однотипных устройств основную систематическую погрешность можно принять как случайную погрешность, которая является «постоянной (в данном запуске)» [1], т.к. у двух датчиков из одной серии, как правило, будут отличаться основная и систематическая погрешности.

Основная погрешность появляется после запуска датчика и может выражаться «случайной величиной с нулевым средним и дисперсией σ_{Δ}^2 » [1].

Постоянное смещение должно удовлетворять следующему дифференциальному уравнению [1]:

$$\dot{\Delta}_{SB} = 0 \quad (3)$$

При калибровке можно определить и исключить Δ_{SB} из выходных данных ММГ при его эксплуатации.

Возникновение Δ_{SA} ММГ связано с его восприимчивостью к факторам окружающей среды. К дополнительным погрешностям ММГ относят: чувствительность к изменению температуры (Temperature sensitivity), чувствительность к вибрациям (Shock and vibration sensitivity), чувствительность к ускорениям (Acceleration sensitivity) и др [2].

Запишем случайную погрешность ММГ [1]:

$$\Delta_R = \Delta_{WN} + \Delta_{BI} + \Delta_{RRW}, \quad (4)$$

где Δ_{WN} – белый шум (White Noise); Δ_{BI} – нестабильность нуля (Bias Instability); Δ_{RRW} – случайное блуждание угловой скорости (Random Rate Walk) [1,2].

Определение «белый шум» подобно определению белый свет, содержащим «электромагнитные волны, частот всего видимого диапазона» [1]. «Теоретически спектральная плотность мощности белого шума постоянна на всех частотах» [1].

Различные возмущения влияют на выходной сигнал датчика, например, термомеханический шум возбуждает колебания сигнала скорости, которые могут превышать действительный сигнал. «Если сигнал гироскопа принимается в дискретные моменты времени длительностью T_0 , то шум гироскопа может быть описан белой последовательностью (дискретным белым шумом) с нулевым средним $M[\varepsilon_{WN}]$. Причем белая последовательность в отличие от непрерывного белого шума имеет конечную дисперсию σ_{WN}^2 » [1].

При моделировании случайных погрешностей ММГ упор производится на «случайный характер смещения $b(t)$ » [3]. Так как «изменение масштабного коэффициента от времени является незначительным по сравнению с $b(t)$ » [3].

Смещение нуля можно разделить на зависящую и инвариантную от времени составляющие [3]:

$$b(t) = b_0 + b_R(t), \quad (5)$$

где b_0 – представляет собой постоянное нулевое смещения, в сопроводительной документации на изделия этот параметр называют стабильностью нуля; $b_R(t)$ – представляет собой случайный дрейф смещения или остаточное смещение после калибровки (термин «дрейф» обусловлен изменением параметра от времени) [3].

Модель $b_R(t)$ имеет несколько источников ошибки. Моменты этих ошибок, таких как случайное блуждание со временем возрастают, что приводит к накоплению ошибки со временем [3].

До проведения калибровки необходимо определить причины возникновения ошибок.

Чтобы определить случайные погрешности ММГ применяют следующие методы:

- спектральную плотность мощности (Power spectral density (PSD));

- автокорреляционный метод (Autocorrelation technique);
- вариацию Аллана (Allan Variance).

Анализ посредством спектральной плотности мощности

«Спектральная плотность мощности (далее СПМ) является преобразование Фурье от корреляционной функции» [3–6]:

$$S(\omega) = \int e^{-j\omega\Delta t} R(\Delta t) d\Delta t, \quad (6)$$

Для линейных систем, выходная СПМ является произведением входной СПМ и величины квадрата передаточной функции системы [3–6]:

$$S_{out}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{in}(\omega) \quad (7)$$

или

$$S_{out}(\omega) = H(j\omega) S_{in}(\omega) H^{*T}(j\omega), \quad (8)$$

где $H^{*T}(j\omega)$ – транспонированное комплексно сопряженное.

Неизвестную модель описывают посредством «известной выходной СПМ и наличии белого шума на входе» [3] для линейных симметричных по времени систем.

Различные шумы с помощью СПМ представляют «в виде прямых линий с разными наклонами». На рис. 2 представлена «идеализированная СПМ с разными наклонами для разных видов шумов». Реальная СПМ имеет постепенные переходы между различными наклонами, а не резкие, и наклоны отличаются от типичных значений [3].

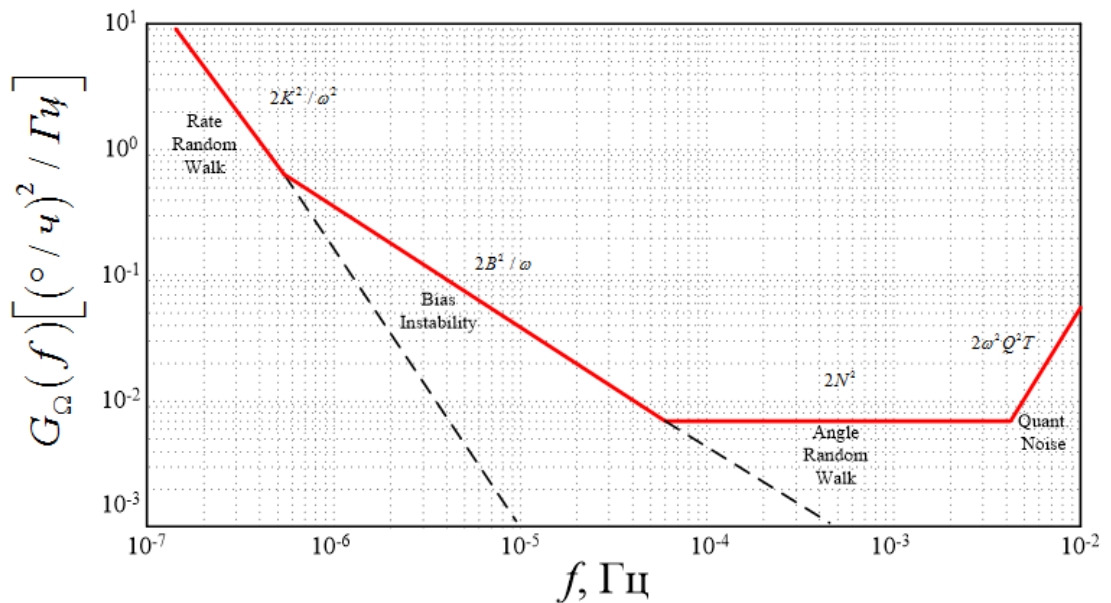


Рис. 2 – Идеализированная кусочная односторонняя PSD гироскопа [3]

Автокорреляционный метод

Автокорреляционная функция процесса $b_R(t)$ имеет следующий вид [3]:

$$R_{b_R}(t_1, t_2) = E[b_R(t_1)b_R(t_2)], \quad (9)$$

где E оператор математического ожидания, а t_1 и t_2 являются произвольными моментами выборки. Если случайный процесс $b_R(t)$ является постоянным во времени, его автокорреляционная функция является функцией от разницы во времени $\Delta t = t_2 - t_1$, т.е. [3]

$$R_{b_R}(\Delta t) = E[b_R(t)b_R(t + \Delta t)], \quad (10)$$

Как показано в исследовании [3] пик при нулевой задержке ($\Delta t = 0$) (рис. 3), свидетельствует о широкополосности (некоррелированности) процесса. Процесс $b_R(t)$ раскладывается на две составляющие

$$b_R(t) = b_w(t) + b_c(t), \quad (11)$$

где $b_w(t)$ широкополосный случайный процесс, а $b_c(t)$ коррелированный процесс. Тогда автокорреляционная функция примет вид [3]:

$$\begin{aligned} R_{b_R}(\Delta t) &= E[b_R(t)b_R(t + \Delta t)] \\ &= E[(b_w(t) + b_c(t))(b_w(t + \Delta t) + b_c(t + \Delta t))] \\ &= E[b_w(t)b_w(t + \Delta t)] + E[b_c(t)b_c(t + \Delta t)] \\ &= \sigma_w^2 \delta(\Delta t) + R_{b_c}(\Delta t) \end{aligned} \quad (12)$$

Равенство справедливо, т.к. [3]

$$E[b_w(t)b_w(t + \Delta t)] = \sigma_w^2 \delta(\Delta t), \quad (13)$$

где $\delta(\Delta t)$ дельта функция.

Как полагают авторы коррелированный процесс не представляется возможным увидеть на фоне широкополосного сигнала. Чтобы подавить пик при $\Delta t = 0$ необходимо отфильтровать исходную последовательность с помощью ФНЧ [3].

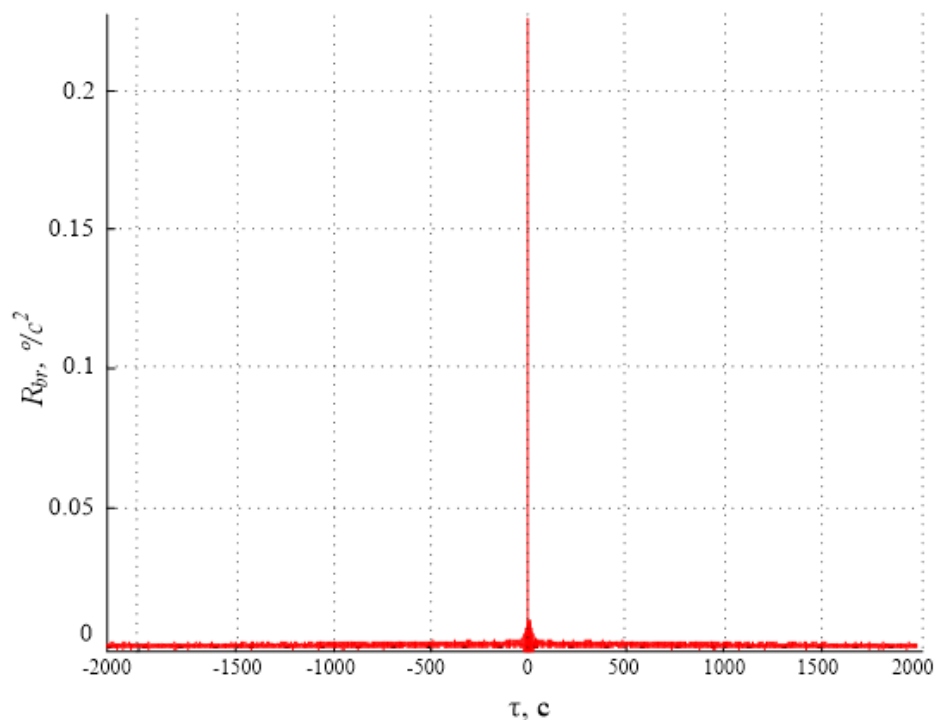


Рис. 3 – График автокорреляционной микромеханического гироскопа μ Nav фирмы Crossbow Technology, Inc (USA, California) с полосой пропускания 50 Гц [3]

Но после фильтрации широкий диапазон шумов присутствует, присутствует пик при $\Delta t = 0$, но «дисперсия широкополосного шума соизмерима с дисперсией коррелированного, что позволяет судить о характере изменения коррелированного шума $b_c(t)$ » [3].

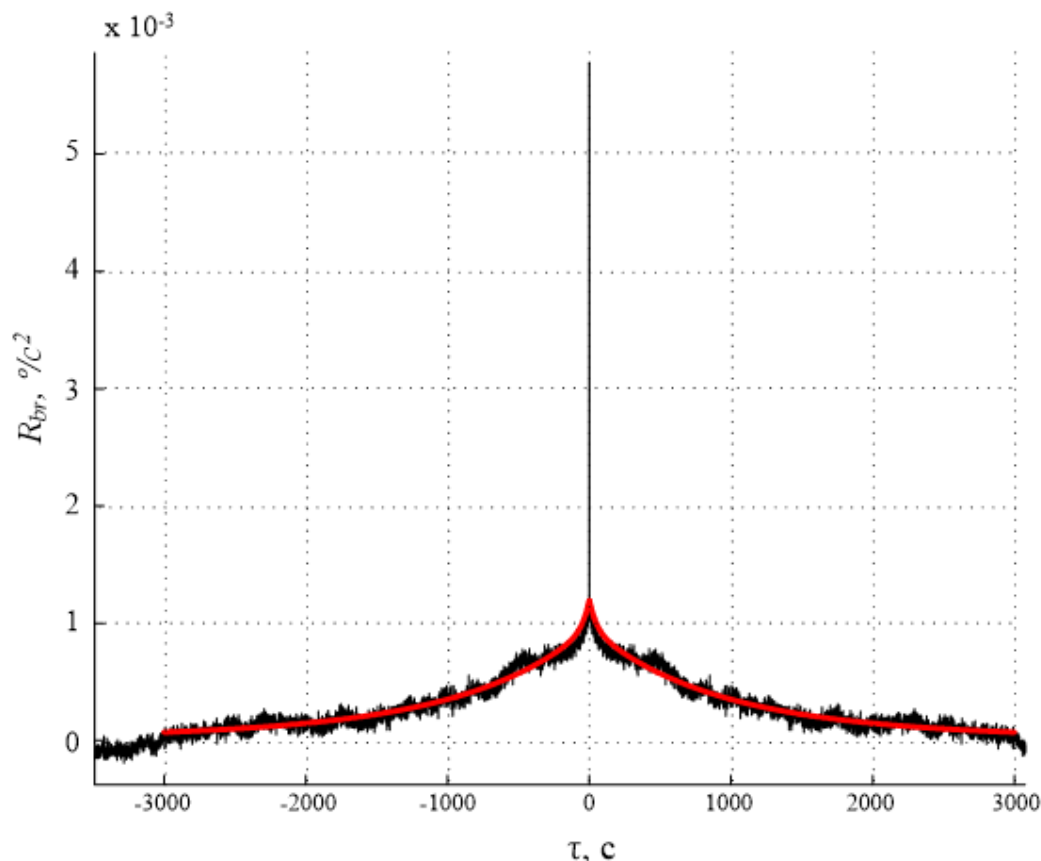


Рис. 4 – График автокорреляционной микромеханического гироскопа μ Nav фирмы Crossbow Technology, Inc (USA, California) с полосой пропускания 1 Гц [3]

Участок автокорреляционной функции на котором наличие коррелированного процесса $b_c(t)$ становится очевидным детально показан на рис. 5 [3].

График представляет собой сигнал на выходе ФНЧ с частотой среза $f_c = 1/2\pi\tau$, на вход которого подается белый шум $w(t)$ со спектральной плотностью мощности $Q_w = 2\sigma_s^2 / \tau$, где σ_s^2 дисперсия $s(t)$. Во временной

области процесс может быть описан дифференциальным уравнением первого порядка [3]:

$$\dot{s}(t) = -\frac{1}{\tau}s(t) + w(t), \quad (14)$$

где τ - постоянная времени (время корреляции) и $w(t)$ – белый шум.

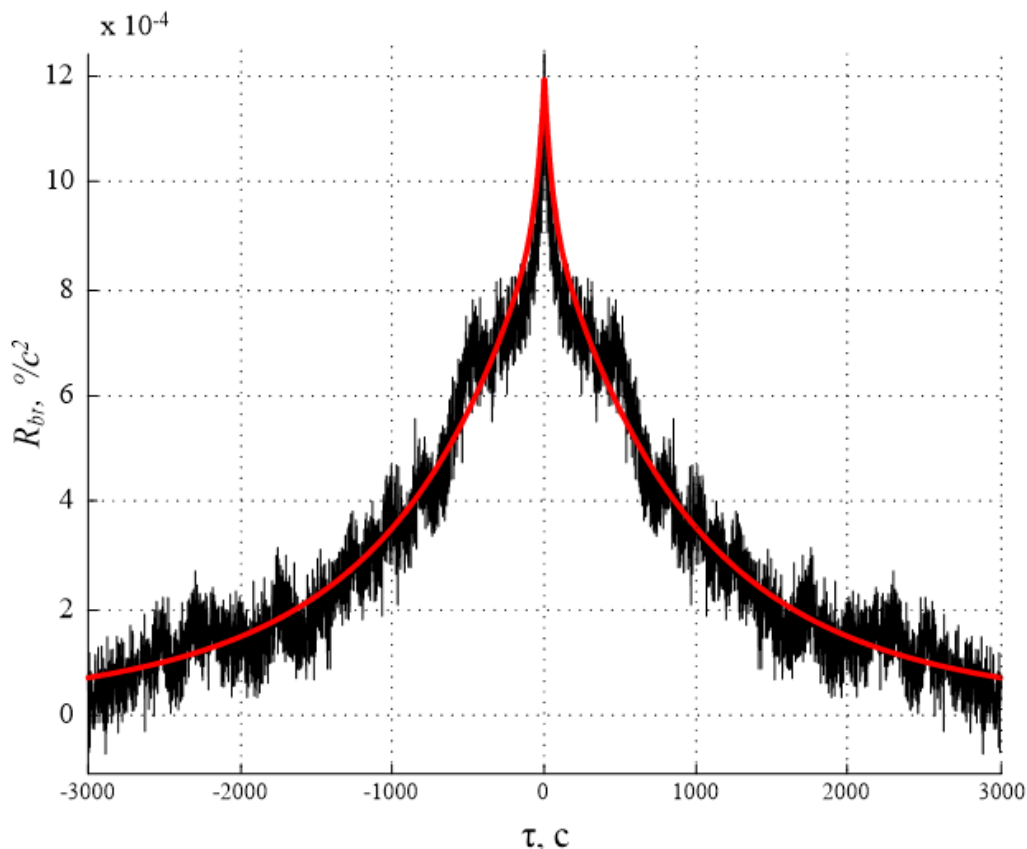


Рис. 5 – График автокорреляционной микромеханического гироскопа μ Nav фирмы Crossbow Technology, Inc (USA, California) с полосой пропускания 1 Гц, масштаб данных увеличен, чтобы детально показать коррелированный процесс [3]

Автокорреляционная функция этого процесса (рис. 6) имеет вид:

$$R_s(\Delta t) = \sigma_s^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}} \quad (15)$$

Автокорреляционная функция Гаусса-Марковского процесса второго порядка (рис. 6, б) описывается уравнением [3]:

$$R_s(\Delta t) = \sigma^2 e^{-\beta^2 |\tau|} (1 + \beta_2 |\tau|) \quad (16)$$

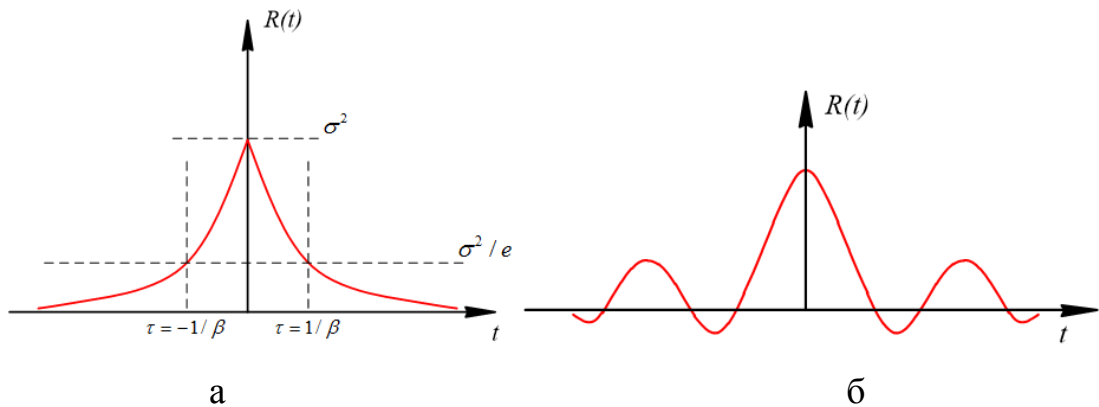


Рис. 6 – Автокорреляционная функция Гаусса-Марковского процесса
а) первого и б) второго порядков [3]

Из рис.5 и рис.6 видно, что характер процесса возможно описать только при использовании функций порядка более высокого уровня или суммы из нескольких процессов первого уровня с различными постоянными времени. Опытным путем установлено, наиболее точная автокорреляционная функция $R_c(\Delta t)$ описывается суммой трех функций первого порядка [3].

$$R_c(\Delta t) = 0,2\sigma_c^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{50}} + 0,6\sigma_c^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{800}} + 0,2\sigma_c^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{2000}} \quad (17)$$

где $\sigma_c^2 = 12 \cdot 10^{-4} (\text{°/с})^2$ это дисперсия коррелированного процесса $b_c(t)$.

Согласно уравнению (11) стохастическая модель случайных и остаточных погрешностей (после калибровки) имеет следующий вид [3]:

$$b_R(t) = b_w(t) + b_c(t) = b_w(t) + \sum_{i=1}^N b_i(t) \quad (18)$$

где $b_w(t)$ – широкополосный случайный процесс, $b_c(t)$ – коррелированный процесс представляющий сумму нескольких $b_i(t)$, где $b_i(t)$ – i коррелированный процесс.

Анализа по дисперсии Аллана

Данный способ оценивает временные последовательности. С его помощью можно установить характеристики шумов в функции усредненного времени [1]. Этот прием используется в спутниковой и навигационной области для нахождения влияния нестабильности часов, а также для оценки шума датчиков угловой скорости.

Если стохастические ошибки статистически независимы друг от друга, то общая дисперсия Аллана для инерциальных датчиков может быть выражена как [3]:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_{ARW}^2 + \sigma_{BI}^2 + \sigma_{RRW}^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{RR}^2 + \sigma_{CN}^2, \quad (19)$$

На рис. 7 приведена вариация Аллана для одного гироскопа μ Nav. «Коррелированные и некоррелированные части погрешностей отделены и построены отдельно» [3].

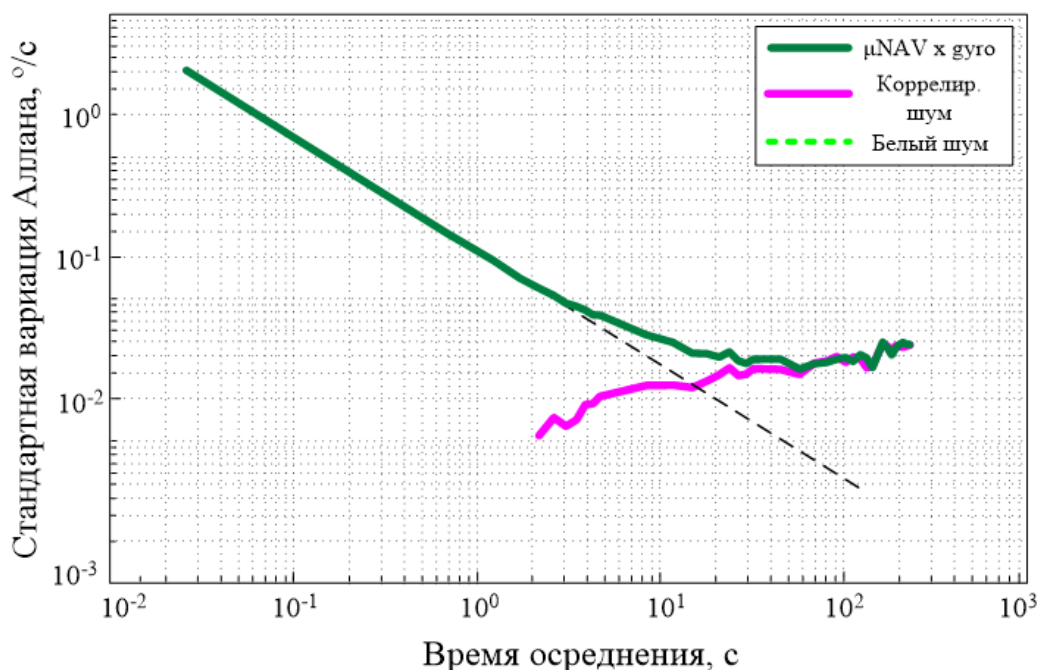


Рис. 7 – Вариация Аллана для гироскопа μ Nav, белого и коррелированного шума [3]

В работах посвященных исследованиям ММГ «подобное изменение кривой при нулевом наклоне моделировалось, как фликкер шум или нестабильность нуля» [3].

Согласно информации выше $b_R(t)$ – сумма широкополосного случайного сигнала, «который является основным источником погрешности для малого τ_a » и нескольких коррелированных стохастических процессов, «которые начинают преобладать при больших значениях τ_a » [3]. Таким образом, модель для $b_R(t)$ после калибровки примет такой же вид, как в уравнении (11) [3]:

$$b_R(t) = b_w(t) + b_c(t), \quad (20)$$

где $b_w(t)$ – широкополосный случайный процесс, $b_c(t)$ – коррелированный процесс.

Основные типы шумов инерциальных датчиков [6–9]:

- шум квантования (Quantization noise);
- случайное блуждание угла (Angle random walk – ARW);
- нестабильность нуля (фликкер-шум) (Bias instability);
- случайное блуждание скорости (Rate random walk – RRW).

Шум квантования

Возникновение этого шума связано «с дискретной природой датчика». «Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и разрешающая способность датчика конечна» [6–9]. Поэтому данные с датчика и эти данные, преобразованные АЦП, отличаются «из-за возникновения округления сигнала или усечения сигнала» [6–9].

Согласно уравнению (7) СПМ шумов квантования выражена через передаточную функцию формирующего фильтра следующим соотношением [3]:

$$G_{qn}(j\omega) = j\omega Q\sqrt{T} \quad (21)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение шумов квантования имеет вид [3]:

$$d_{qn}(t) = Q\sqrt{T}u(t), \quad (22)$$

где $u(t)$ - единичный белый шум.

Т.е. если шум квантования непосредственно включить в уравнения ошибки INS, он будет являться источником шума, который описывается производной от белого шума. Согласно теории фильтра Калмана оптимальная оценка может быть выполнена только по дифференциальным уравнениям белого шума. Таким образом, шум квантования не может быть непосредственно включен в уравнения ошибки INS [3].

Тем не менее, существует способ включить шум квантования в уравнения ошибок INS косвенно. Запишем уравнение ошибки INS для угла ψ [3]:

$$\begin{aligned} \delta\dot{n} &= \delta v - \omega_{en} \cdot \delta n \\ \delta\dot{v} &= -(\omega_{in}^n + \omega_{ie}^n)\delta v - \psi f^b + \delta g^n + C_b^n \nabla^b, \\ \dot{\psi} &= -\omega_{in}^n \psi + C_b^n \varepsilon^b \end{aligned} \quad (23)$$

где $\delta\alpha_q^b$ – шум квантования гироскопа, δv_q^b – шум квантования акселерометра.

Хотя шум квантования является производной от белого шума в плане угловой скорости и ускорения, с точки зрения пространственной ориентации и скорости шум квантования является белым шумом. Уравнения ошибок скорости и пространственной ориентации с учетом шума квантования примут следующий вид [3]:

$$\delta\hat{v} = \delta v - C_b^n \delta v_q^b \quad (24)$$

$$\hat{\psi} = \psi - C_b^n \delta\alpha_q^b$$

Продифференцируем обе части уравнения (24) и подставим в уравнение (23), принимая во внимание [3]:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n (\omega_{in}^b) - (\omega_{in}^b) C_b^n \quad (25)$$

В результате получаем уравнения ошибок INS [2]:

$$\begin{aligned} \delta\dot{n} &= \delta\dot{v} - \omega_{en} \cdot \delta n + C_b^n \delta v_q^b \\ \delta\dot{v} &= -(\omega_{in}^n + \omega_{ie}^n) \delta v - \hat{\psi} f^b + \\ &\delta g^n + C_b^n (\nabla^b - \delta v_q^b) + C_b^n f^b \cdot \delta\alpha_q^b - \\ &[(\omega_{ie}^n) C_b^n + C_b^n (\omega_{ib}^b)] \delta v_q^b \\ \dot{\hat{\psi}} &= -\omega_{in}^n \hat{\psi} + C_b^n (\varepsilon^b - \delta\dot{\alpha}_q^b) - C_b^n (\omega_{ib}^b) \delta\alpha_q^b \end{aligned} \quad (26)$$

При помощи уравнения (26) шумы квантования гироскопа и акселерометра учтены в уравнениях ошибки INS. В уравнении (27) шум квантования эквивалентен белому шуму для уравнений ошибок координаты, скорости и пространственной ориентации [3]:

$$\begin{aligned} &C_b^n \delta v_q^b \\ C_b^n f^b \times \delta\alpha_q^b &- [(\omega_{ie}^n \times) C_b^n + C_b^n (\omega_{ib}^b \times)] \delta v_q^b \\ &- C_b^n (\omega_{ib}^b \times) \delta\alpha_q^b \end{aligned} \quad (27)$$

После преобразования (27) шумы квантования гироскопов и акселерометров могут быть включены в уравнения ошибок INS.

Случайное блуждание угла

Основную компоненту белого шума выходных данных МЭМС-датчиков называют случайным блужданием угла или дрейфом угла. Представляет собой отклонение выходного сигнала от предполагаемого произвольным образом. Также воздействует на «результат интегрирования

(для получения угла поворота путем преобразования измеряемой датчиком угловой скорости)» [6–10]. Например, если ДУС находится в состоянии покоя, вследствие интегрирования выходной сигнал должен иметь нулевое значение, однако из-за влияния белого шума данные гироскопа изменяются случайным образом, вследствие чего дисперсия пропорциональна времени.

У гироскопов блуждание угла характеризует «точность прибора, которая ограничена уровнем белого шума в выходном сигнале угловой скорости гироскопа и измеряется в $^{\circ}/\sqrt{ч}$ » [6–9].

Основным источником этой ошибки являются спонтанные электронные колебания в датчике, а также остальные высокочастотные составляющие шума, которые имеют время корреляции значительно меньше чем время выборки. ARW имеет рациональный спектр и моделируется как белый шум.

Дифференциальное уравнение ARW имеет вид [3]:

$$arw(t) = Nv(t) \quad (28)$$

В уравнении 28 N – коэффициент вариации Аллана для ARW; $v(t)$ – единичный белый шум [3].

$$R_{xx}(\tau) = P_{xx} \delta\tau \quad (29)$$

$$S_{xx}(\omega) = P_{xx}, \quad (30)$$

где P_{xx} – автоковариационная функция [3]:

$$P_{xx}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (x(t_i) - \bar{x})(x(t_i + \tau) - \bar{x})^T \quad (31)$$

Таким образом, формирующий фильтр ARW имеет вид приведенный на рис. 8.

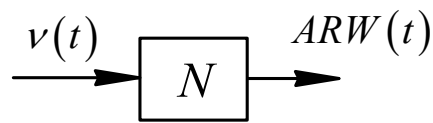


Рис. 8 – Формирующий фильтр ARW [3]

Нестабильность нуля

Данный вид шума появляется в «электронных компонентах датчика, подверженных случайному «мерцанию» («flickering») и имеет спектральную мощность, пропорциональную f^{-1} (розовый шум)» [6–9]. Этот шум оказывает воздействие на низких частотах, а при росте частоты интенсивность уменьшается (перекрывается белым шумом): «график мощности шума в логарифмическом масштабе равномерно убывает» [6–9].

Для связи методов стохастического анализа по вариации Аллана и автокорреляционного целесообразно использовать модель ГМП 1-го порядка. Дифференциальное уравнение для шумов неустойчивости нуля имеет следующий вид: [3]

$$\dot{f}_n(t) = -\beta f_n(t) + \beta B v(t)$$

или

(32)

$$\dot{x}(t) = -\alpha x + \sigma \sqrt{2\alpha} w(t),$$

где β является обратной постоянной времени, которая может быть определена автокорреляционным анализом; B - коэффициент неустойчивости нуля по вариации Аллана и $v(t)$ - единичный белый шум.

Нестабильность нуля на СПМ построенной в логарифмическом масштабе имеет наклон -1 для частот ниже частоты среза и нулевой наклон на более высоких частотах [3].

$$R_{xx}(\tau) = P_{xx} e^{-|\tau|/T}$$

$$\psi(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}$$

(33)

$$S_{xx}(\omega) = \frac{2P_{xx} / T}{\omega^2 + (1/T)^2}, \quad (34)$$

$$\Psi(\omega) = \frac{2\sigma^2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}$$

Таким образом, формирующий фильтр для неустойчивости нуля имеет вид, приведенный на рис. 9 [3].

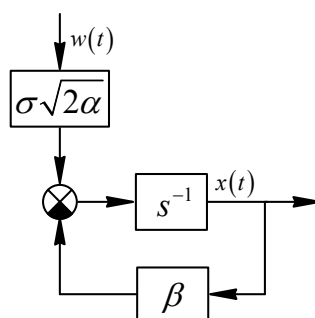


Рис. 9 – Формирующий фильтр неустойчивости нуля [3]

Случайное блуждание скорости

Эта ошибка определяется «на больших интервалах времени» и фиксируется, как «незначительное отклонение скорости от истинной величины» [6–9]. Данная погрешность имеет «значительное время корреляции» [6–9]. Для вычисления ее каким-нибудь методом «аппроксимации, нужно получить с гироскопов большое количество данных» [6–9]. Но следует учитывать, что на значительных интервалах времени ДУСы зависимы от воздействия окружающей среды (особое действие – изменение температуры).

RRW имеет рациональный спектр так, что его модель может быть получена при помощи спектральной плотности мощности [3]:

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2} \quad (35)$$

Дифференциальное уравнение для RRW может быть сформулировано, как уравнение [3]:

$$r\dot{r}w(t) = Kv(t) \quad (36)$$

В уравнениях (35), (36), K – коэффициент вариации Аллана RRW и $v(t)$ – единичный белый шум.

RRW на СПМ построенной в логарифмическом масштабе имеет наклон -2. Формирующий фильтр для RRW имеет вид приведенный на рис. 10.

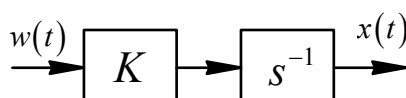


Рис. 10 – Формирующий фильтр RRW [3]

Заключение

В данной работе были рассмотрены некоторые виды погрешностей ММГ, а также методы определения этих погрешностей: анализ спектральной плотности мощности (Power spectral density (PSD)), автокорреляционный метод (Autocorrelation technique) и метод вариации Аллана (Allan Variance). Данные исследования помогут измерить погрешности ДУС ТГ-8А производства ООО «Лаборатория Микроприборов» в дальнейшем.

Литература

1. Матвеев В.В., Погорелов М.Г., Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариаций Аллана // Известия ТулГУ. Технические науки, 2015, Вып. 3, с. 123–135.
2. Vittorio M.N. Passaro, Antonello Cuccovillo, Lorenzo Vaiani, Martino De Carlo and Carlo Edoardo Campanella, Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective // Sensors 2017, 17, 2284.
3. Архипов А.В., Тимошенко А.С., Методы оценки случайных погрешностей микромеханических датчиков // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5247>

4. Naser El-Sheimy, Haiying Hou, Xiaoji Niu, Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, VOL. 57, NO. 1, pp. 140-149.

5. Xin Zhang, Yong Li, Peter Mumford, Chris Rizos, Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-based GPS/INS System, University of New South Wales, Australia, pp. 127–133.

6. Claudia C. Meruane Naranjo, Analysis and modeling of MEMS based inertial sensors // Stockholm 2008, pp. 16-17, 30-40.

7. Литвин М.А., Малюгина А.А., Миллер А.Б., Степанов А.Н., Чикрин Д.Е., Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы, 2014, Том 14, № 4, с. 326–339.

8. Leslie Barreda Pupo, Characterization of errors and noises in MEMS inertial sensors using Allan variance method // Barcelona, 2016, pp. 21-23, 25-33.

9. Shaochen Li, Xiaojing Du and Junyi Zhai, Random Error Analysis of Inertial Sensors output Based on Allan Variance, 2016, Atlantis Press, pp. 345-349.

10. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона. 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398

References

1. Matveev V.V., Pogorelov M.G. Tehnicheskie nauki, 2015, Edit. 3, pp. 123–135.

2. Vittorio M.N. Passaro, Antonello Cuccovillo, Lorenzo Vaiani, Martino De Carlo and Carlo Edoardo Campanella. Sensors 2017, 17, 2284.

3. Arhipov A.V., Timoshenkov A.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus) 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5247



4. Naser El-Sheimy, Haiying Hou, Xiaoji Niu. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, VOL. 57, NO. 1, pp. 140–149.
5. Xin Zhang, Yong Li, Peter Mumford, Chris Rizos, Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-based GPS/INS System, University of New South Wales, Australia, pp. 127–133.
6. Claudia C. Meruane Naranjo. Analysis and modeling of MEMS based inertial sensors. Stockholm 2008, pp. 16-17, 30-40.
7. Litvin M.A., Maljugina A.A., Miller A.B., Stepanov A.N., Chikrin D.E. Informacionnye process, 2014, Tom 14, № 4, pp. 326–339.
8. Leslie Barreda Pupo, Characterization of errors and noises in MEMS inertial sensors using Allan variance method. Barcelona, 2016, pp. 21–23, 25–33.
9. Shaochen Li¹, Xiaojing Du and Junyi Zhai. 2016, Atlantis Press, pp. 345-349.
10. Lomakin M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398