

А. В. Михеев, технический директор, am@mp-lab.ru;
С. А. Анчутин, вед. инженер, step305@mail.ru;
Е. С. Кочурина, канд. техн. наук, гл. метролог, ekochurina@mp-lab.ru;
А. С. Тимошенко, д-р техн. наук, ген. директор, at@mp-lab.ru
Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория Микроприборов", г. Москва, Зеленоград

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ОЦЕНКИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Поступила в редакцию 10.03.2021

Рассматривается использование вариации Аллана для оценки случайных погрешностей датчиков угловой скорости. Приведены результаты исследований изделий: построены диаграммы и рассчитаны численные значения погрешностей.

Ключевые слова: случайные погрешности, датчик угловой скорости, вариация Аллана

Введение

Случайные погрешности оказывают существенное влияние на достоверность измеряемой угловой скорости. Широкое применение получило использование вариации Аллана для оценки случайных погрешностей, практические рекомендации содержатся в стандартах Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), например, для волоконно-оптических гироскопов [1–3].

В данной работе рассматривается применение вариации Аллана для оценки случайных погрешностей МЭМС-датчиков угловой скорости МЭМС-ДУС серии ТГ и МЭМС-ДУС, входящих в состав геодезического инерциального модуля. Датчики разработаны в ООО "Лаборатория Микроприборов".

Виды погрешностей ДУС и их оценки

Все датчики, в том числе и датчики угловой скорости, характеризуются погрешностями, которые можно разделить на систематические и случайные. *Систематическая погрешность* — составляющая погрешности измерения, которая является постоянной или закономерно изменяющейся при повторных измерениях угловой скорости. Значение систематической погрешности одинаково во всех измерениях, проводимых одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

В *микромеханике* одним из примеров *систематической составляющей* погрешности является технологическая погрешность изготовления. Погрешность изготовления сказывается на статическом и динамическом небалансе подвеса дат-

чика угловой скорости (ДУС): разброс частот от чувствительного элемента (ЧЭ) к ЧЭ в составе пластины, погрешности сборки ЧЭ приводят к неоднородности магнитного поля, погрешностям от перекрестных угловых и линейных ускорений основания. К систематическим погрешностям ДУС можно отнести, например, масштабный коэффициент, смещение нуля, коэффициент нелинейности и др.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, значение которой различно при повторных измерениях угловой скорости. Эта погрешность обусловлена большим числом факторов, воздействие которых вычислить точно довольно сложно, они вызваны неочевидными источниками и требуют длительного времени для выяснения причины их возникновения. Для оценки случайных погрешностей широко используют вариацию Аллана, позволяющую определить источник ошибки и значение ее вклада [1, 2].

Берем T значений выходного сигнала, записанных с частотой f_s значений в секунду. Далее из набора точек T формируем $L = T/M$ кластеров, здесь M — количество значений на кластер [4].

$$\underbrace{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M}_{l=1}, \underbrace{\omega_{M+1}, \dots, \omega_{2M}}_{l=2}, \dots, \underbrace{\omega_{T-M}, \dots, \omega_T}_{l=L}$$

Рассчитываем среднее значение для каждого кластера [4]:

$$\bar{\omega}_L(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \omega_{(l-1)M+i} \quad l = 1, \dots, L. \quad (1)$$

Далее рассчитываем вариацию Аллана из средних значений кластера [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_M) &= \frac{1}{2} \langle (\bar{\omega}_{l+1}(M) - \bar{\omega}_l(M))^2 \rangle = \\ &= \frac{1}{2(L-1)} \sum_{l=1}^{L-1} (\bar{\omega}_{l+1}(M) - \bar{\omega}_l(M))^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\langle \rangle$ — обозначает среднее и $\tau_M = \frac{M}{f_s}$ — указанное время корреляции. Выражение (2) рассчитывается по среднему значению. Для двух

заданных средних значений кластера вариацию Аллана можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (\bar{\omega}_1 - AVG)^2 + (\bar{\omega}_2 - AVG)^2 = \\ &= \frac{1}{2} (\bar{\omega}_2 - \bar{\omega}_1)^2, \end{aligned}$$

где $AVG = \frac{1}{2} (\bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)/2$ — среднее значение для двух выборок.

Выбирая длину кластера (время корреляции), можно построить зависимость вариации Аллана от времени корреляции. Этот метод на логарифмическом графике (квадратный корень из вариации Аллана в зависимости от времени корреляции) позволяет выделить вклады различных погрешностей путем анализа наклонов участков кривой на графике. По графику можно определить коэффициент шума квантования (Q), случайное угловое блуждание (N), нестабильность смещения нуля (B), случайное блуждание угловой скорости (K), тренд (R) и гармоническую помеху (частота f_0 и амплитуда Ω_0 гармонической помехи). Точность оценки дисперсии Аллана зависит от числа независимых кластеров в наборе данных. Погрешность оценки вариации Аллана увеличивается с уменьшением числа независимых кластеров в наборе: $\% error = \frac{100}{\sqrt{2(K-1)}} [4];$

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_M) &\approx \frac{3Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2B^2}{\pi} \ln 2 + K^2 \frac{\tau}{3} + \\ &+ \frac{R^2 \tau^2}{2} + \Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2(\pi f_0 \tau)}{\pi f_0 \tau} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Численные значения коэффициентов Q, N, B, K, R, f_0 и Ω_0 полинома (3) можно определить методом наименьших квадратов. Каждому типу случайной погрешности будет соответствовать специфический наклон на диаграмме Аллана. Диаграмма Аллана — график зависимости корня квадратного из вариации Аллана от времени корреляции, построенный в логарифмическом масштабе.

На основе экспериментальных исследований МЭМС-ДУС было выявлено, что наиболее существенный вклад вносят такие погрешности, как случайное угловое блуждание и нестабильность смещения нуля.

Случайное угловое блуждание (*angle random walk*) — это высокочастотный шум, который можно наблюдать как кратковременное изменение выходного сигнала. Случайное угловое блуждание характеризует белый шум МЭМС-ДУС, источником которого является и механическая и электронная части датчика. После интегрирования этот шум вызывает случайную ошибку в угле с распределением, которое пропорционально квадратному корню из времени корреляции. Наклон на диаграмме Аллана для данной погрешности равен $-0,5$ (рис. 1).

Из спектральных свойств белого шума и связи спектральной плотности шума и вариации Аллана известно [1]: $\log(\sigma_{ARW}) = -0,5\log(\tau) + \log(N)$ или

$$\sigma_{ARW}(\tau) = \frac{N}{\sqrt{\tau}} \quad (4)$$

$$\text{При } \tau = 1 \text{ с, } \log(1) = 0 \Rightarrow \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{(1 \text{ с})}} = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{\left(\frac{1}{3600} \text{ ч}\right)}}$$

$$\Rightarrow \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] = \frac{N [^\circ/\text{ч}]}{\sqrt{\text{ч}}} \frac{60}{\sqrt{\text{ч}}} \sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}] \text{ — значение}$$

составляющей графика с наклоном $-0,5$ из диаграммы Аллана при $\tau = 1$ с. То есть на графике (на диаграмме Аллана) нужно найти график с наклоном $-0,5$ (это белый шум). Продлеваем линию до пересечения с прямой $\tau = 1$ с. Смотрим значение вариации Аллана $\sigma_{ARW} [^\circ/\text{ч}]$ в точке пересечения. Делим на 60 — это и есть N — случайное угловое блуждание (*angle random walk*).

Нестабильность смещения нуля (bias instability) — медленное изменение выходного сигнала. Нестабильность нулевого сигнала вызвана преимущественно шумами в электронном блоке обработки сигнала ДУС, влияние механической части в меньшей степени. Этот тип шума также называют фликкер-шумом (розовый НЧ шум) или шумом $1/f$. Такой тип шума проявляется

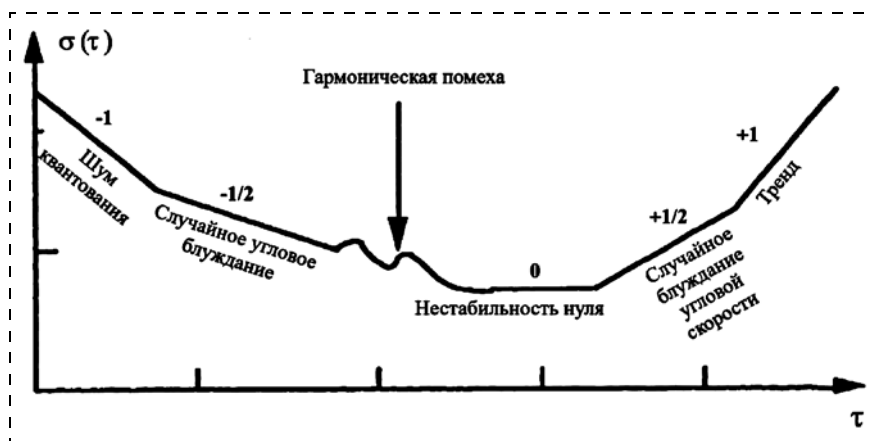


Рис. 1. Типовая диаграмма Аллана для ДУС [4]



Рис. 2. Диаграмма Аллана

практически у всех компонентов электронной техники (особенно у операционных усилителей, применяемых для усиления сигнала с чувствительного элемента ДУС). Эта шумовая составляющая обычно оказывает значительное влияние на низких частотах (связано с высоким значением коэффициента усиления в предварительных усилителях ДУС). Наклон на диаграмме Аллана для данной погрешности равен 0 (см. рис. 1). Вариация Аллана для нестабильности смещения нуля [1]:

$$\sigma_{BIAS}(\tau) = \sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}} B \quad (5)$$

Типовая диаграмма Аллана МДУС, входящего в состав геодезического инерциального модуля МГ-25 (производства ООО "Лаборатория Микроприборов"), показана на рис. 2.

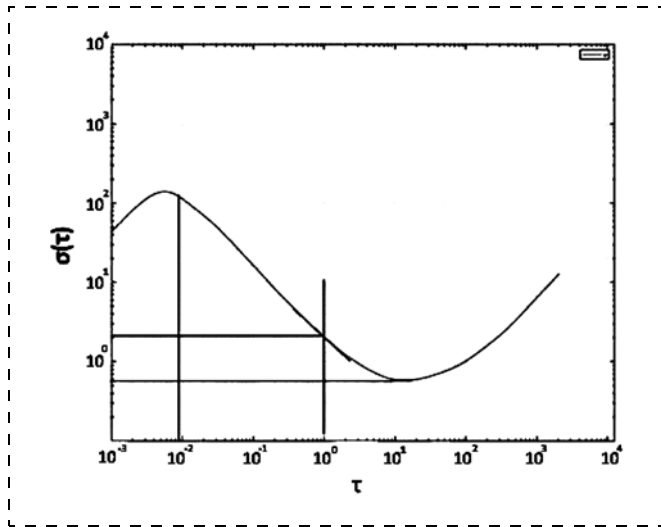


Рис. 3. Диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100

По диаграмме можно определить σ_{ARW} , в данном случае $\sigma_{ARW} = 1,6 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по пересечению графика линии $\tau = 1 \text{ с}$). С помощью формулы (4) можно рассчитать $N = 0,0035 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

Нестабильность смещения нуля в запуске $\sigma_{BIAS} = 0,12 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по минимальному значению графика). С учетом формулы (5) определяем $B = 0,18 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

Типовая диаграмма Аллана для МЭМС-ДУС ТГ-100 (производства ООО "Лаборатория Микроприборов") приведена на рис. 3.

По диаграмме можно определить σ_{ARW} , в данном случае $\sigma_{ARW} = 1,1 \text{ }^\circ/\text{ч}$ определяем по пересечению графика линии $\tau = 1 \text{ с}$). С помощью формулы (4) можно рассчитать: $N = 0,055 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Нестабильность смещения нуля в запуске $\sigma_{BIAS} = 0,58 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (определяем по минимальному значению графика). С учетом формулы (5) определяем $B = 0,88 \text{ }^\circ/\text{ч}$.

По диаграмме Аллана (по перегибу графика в области малых значений τ) также можно оценить полосу пропускания датчика. Связано это с тем, что для идеального датчика и белого шума

при уменьшении τ должно неограниченно возрастать значение σ . На практике полоса пропускания датчиков ограничена, белым шум можно представлять только в этой ограниченной полосе. И на диаграмме Аллана в момент времени τ , равном постоянной времени датчика, будет присутствовать перегиб (локальный экстремум) — полоса наблюдаемого спектра растет, шум при этом не увеличивается, происходит уменьшение спектральной плотности, а значит, и вариации Аллана. Полоса пропускания для двух датчиков, упомянутых в данной работе, составляет порядка 100 Гц (постоянная времени 10 мс, $\tau = 0,01 \text{ с}$).

Заключение

Вариация Аллана позволяет оценить случайные погрешности (случайное угловое блуждание, случайный дрейф нулевого сигнала) датчика угловой скорости. В работе приведены результаты исследований двух изделий производства ООО "Лаборатория Микроприборов": построены диаграммы и рассчитаны численные значения погрешностей. Показан способ косвенной оценки полосы пропускания датчика на основе диаграммы Аллана.

Список литературы

1. IEEE Std 1554—2005. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
2. IEEE Std 952—1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
3. Кутовой Д. А., Ситников П. В. Некоторые практические вопросы использования вариации Аллана при исследовании бесплатформенного инерциального блока // Навигация и управление движением. Материалы XV конференции молодых ученых. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2013. С. 246—252.
4. Lawrence C. Ng. On the Application of Allan Variance Method for Ring Laser Gyro Performance Characterization. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, 25 p.

A. V. Miheev, Technical Director, am@mp-lab.ru;
 S. A. Anchutin, Leading Engineer, step305@mail.ru;
 E. S. Kochurina, Chief Metrologist, ekochurina@mp-lab.ru;
 A. S. Timoshenkov, General Director, at@mp-lab.ru
 LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation

Corresponding author:

Kochurina Elena S., Chief Metrologist, LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation
 E-mail: ekochurina@mp-lab.ru,

The Use of Allan Variation in the Study of the Random Errors of Angular Rate Sensors

Received on March, 10, 2021

Accepted on April, 01, 2021

This paper describes the use of Allan variation in the study of the random errors of angular rate sensors. The results of the study are presented: Allan diagram, Angle Random Walk, Bias Instability.

Keywords: random errors, angular rate sensors, Allan variance

For citation:

Mihev A. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S. The Use of Allan Variation in the Study of the Random Errors of Angular Rate Sensors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 153–157.

DOI: 10.17587/nmst.23.153-157

References

1. **IEEE Std 1554—2005.** IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.

2. **IEEE Std 952—1997.** IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

3. **Kutovoj D. A., Sitnikov P. V.** Nekotorye prakticheskie voprosy ispol'zovaniya variacii Allana pri issledovanii besplat-formennogo inercial'nogo bloka, *Navigacija i upravlenie dvizheniem. Materialy XV konferencii molodyh uchenyh.* SPb.: CNII "Jelektropribor", 2013, pp. 246—252.

4. **Lawrence C. Ng.** On The Application of Allan Variance Method for Ring Laser Gyro Performance Characterization. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, 25 p.

УДК 621.362

DOI: 10.17587/nmst.23.157-161

Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., dzhamilya79@yandex.ru
ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет)", г. Владикавказ

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МИКРОПЛЕНОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ВОСПРОИЗВОДИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Поступила в редакцию 23.03.2021

Микропленочные преобразователи используют при обработке, хранении, передаче и представлении информации, особенно в процессе контроля и измерения физических величин, а также в технологии изготовления наукоемкой продукции. Использование технологических приемов микроэлектроники при создании микропленочных преобразователей позволяет значительно улучшить их эксплуатационные параметры.

Ключевые слова: преобразователь, конструкция, технология, сигнал, структура, размер, элемент, физическая величина, взаимосвязь, процесс

Введение

Значительный интерес к исследованию и созданию микропленочных преобразователей обусловлен ростом потребности в получении информации при обработке, хранении, передаче и

представлении информации [1—18], особенно в процессе контроля и измерения физических величин, а также в технологии изготовления наукоемкой продукции. Микропленочные преобразователи подвергаются воздействию контроли-