

УДК 531.383

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Головач С. В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
г. Киев, Украина*

Приведен метод исследования характеристик лазерного гироскопа, который заключается в сочетании алгоритмов вейвлет-преобразования и вариации Аллана. Этот метод предназначен для оценки параметров стохастических процессов высокоточного лазерного гироскопа и состоит из предварительной обработки данных, которая заключается в исключении шума квантования из выходного сигнала датчика, полученного при проведении статических испытаний лазерного гироскопа и вычислении вариации Аллана. Выделение шумовой составляющей сигнала осуществляется с помощью вейвлет-преобразования. Вычисление вариации Алана производится для сигнала без шума квантования и выделенной шумовой составляющей отдельно.

***Ключевые слова:** лазерный гироскоп, вариация Аллана, вейвлет-преобразование, шум квантования, стохастические процессы.*

Введение

Выходной сигнал гироскопа имеет две основные группы ошибок. Первая группа представляет собой детерминированные ошибки, такие как постоянное смещение нулевого сигнала или нелинейность. Эти ошибки могут быть исправлены калибровкой, основанной на лабораторных измерениях. Вторая группа ошибок содержит непредсказуемые стохастические процессы, такие как шум квантования, случайное блуждание угла, нестабильность нулевого сигнала, случайное блуждание угловой скорости и дрейф угловой скорости. Они проявляются в гироскопе как шум или медленное изменение параметров во времени. Вклад этих ошибок в определенный момент времени не может быть точно предсказан, что вызывает ухудшение оценки работы гироскопа.

Появление новых направлений в теории и технике обработки сигналов дает возможность для более глубокого анализа характеристик исследуемых систем. Одной из таких теорий является теория вейвлетов. Несмотря на то, что она является относительно новой, к нынешнему времени она уже нашла применение в изучении характеристик микромеханических гироскопов. В частности вейвлет преобразование (ВП) применялось для сглаживания их сигналов перед обработкой с помощью фильтра Калмана [1, 2]. Однако в данной работе целью применения этой теории в изучении характеристик лазерного гироскопа (ЛГ) будет выделение из исходного сигнала погрешности шума квантования с целью упрощения анализа стохастических характеристик.

Для анализа стохастических процессов применительно к гироскопам используются главным образом два метода. Они определены в стандарте IEEE 952-1997 [3]. Первый и более сложный – спектральная плотность мощности. Второй метод – вариация Аллана (ВА).

ВА – метод анализа стохастических процессов во временной области. Метод был первоначально разработан для статистики атомных стандартов частоты [4] однако из-за схожести задач, ВА был применен для исследования сигналов ЛГ [5].

Стохастические характеристики ЛГ

Теоретически на выходной сигнал гироскопа влияние оказывают четыре основных типа шумов – случайное блуждание угла (angle random walk – ARW), нестабильность нулевого сигнала (bias instability–BI), случайное блуждание угловой скорости (rate random walk–RRW) и дрейф угловой скорости (rate ramp – RR). В сигнале ЛГ так же присутствует шум квантования (quantization noise – QN), который возникает вследствие погрешности преобразования аналогового сигнала в цифровой. Если источники этих шумов являются статистически независимыми, то их параметры позволяет определять ВА, которая в этом случае будет суммой квадратов каждого типа ошибок:

$$\sigma^2(\tau) = \sigma_{QN}^2(\tau) + \sigma_{ARW}^2(\tau) + \sigma_{BI}^2(\tau) + \sigma_{RRW}^2(\tau) + \sigma_{RR}^2(\tau)$$

Из-за различных асимптотических свойств они будут иметь различные наклоны на графике ВА с логарифмическим масштабом по оси времени (рис. 1).

Однако наличие в исследуемом образце системы коррекции его периметра способствует к практически полному отсутствию таких стохастических процессов, как случайное блуждание и дрейф угловой скорости (RRW и RR). В таком случае, основной целью практического применения ВА является определение коэффициентов доминирующих шумов случайного блуждания угла (ARW) и шума квантования (QN), которым на рис. 1 соответствуют прямые с наклоном -1/2 и -1 дБ/декаду.

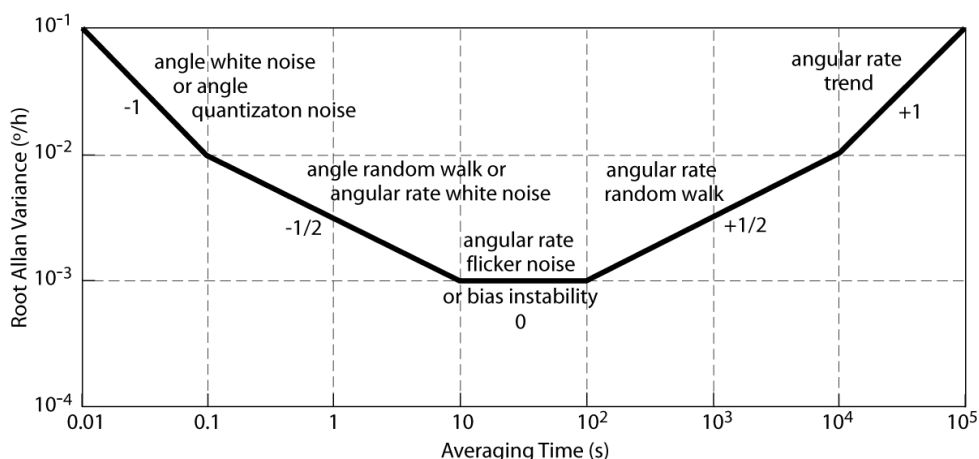


Рис. 1. Гипотетическая ВА для сигналов угловой скорости гироскопа согласно со стандартом IEEE 952-1997

На рис. 2 представлен график вычислений ВА по данными образца ЛГс периметром 28 см. На этом графике участки, соответствующие процессам QN и

ARW имеют нечеткие границы, что вызывает неопределенность при оценивании их параметров (рис. 2).

Для устранения такой неопределенности была произведена предварительная обработка сигнала с помощью программных средств, входящих в пакет прикладных программ MATLAB.

Краткое описание процессов вейвлет-преобразований

Вейвлеты представляют собой особые функции в виде коротких волн (всплесков) с нулевым интегральным значением и с локализацией по оси независимой переменной (времени или частоты), способных к сдвигу по этой оси и масштабированию (растяжению/сжатию). Любой из наиболее часто используемых типов вейвлетов порождает полную ортогональную систему функций.

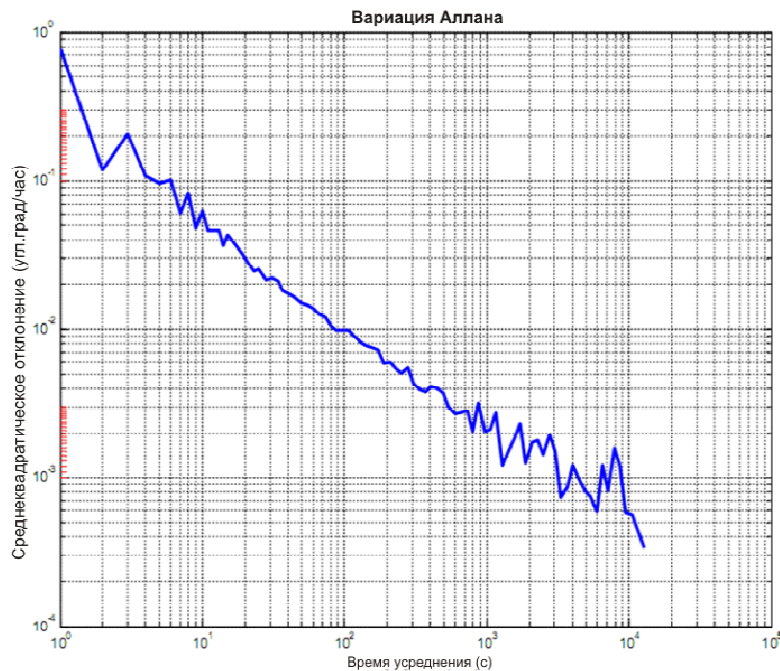


Рис. 2. ВА по исходным данным ЛГ с периметром 28 см

В случае вейвлет-анализа сигнала в связи с изменением масштаба вейвлеты способны выявить различие в характеристиках процесса на различных шкалах, а посредством сдвига можно проанализировать свойства процесса в различных точках на всем исследуемом интервале [6].

ВП одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций:

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Такие базисные функции сконструированы из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во

времени (b) и изменения временного масштаба (a) (рис. 3). Множитель $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего числа a .

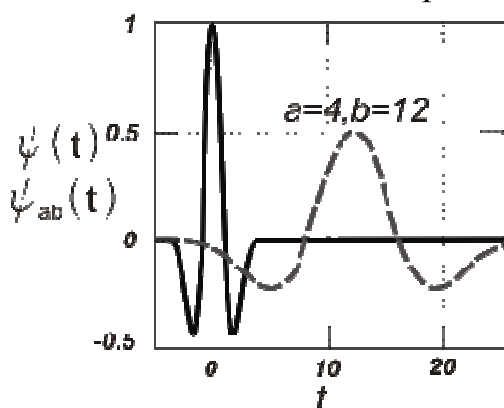


Рис. 3

Таким образом, для заданных значений параметров a и b функция $\psi_{ab}(t)$ и есть вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом $\psi(t)$.

Так как компьютеризированная система регистрации сигналов ЛГ является дискретной системой наблюдения, то для обработки данных ЛГ необходимо использовать дискретное вейвлет-преобразование (ДВП).

Подобно дискретному преобразованию Фурье (ДПФ), ДВП оперирует вектором данных. Также подобно ДПФ, ВП обратимо. И ДПФ, и ДВП, следовательно, могут рассматриваться как отображения, действующие из пространства входного сигнала (области времени) в пространство изображений. Для Фурье-преобразования функциями базиса является семейство синусов и косинусов. В ВП функции базиса – масштабирующие функции ("father functions") и вейвлеты ("mother functions")[7].

Дискретное преобразование произвольного сигнала записывается в виде:

$$\psi_{a_0^j, nb_0}(t) := \frac{1}{\sqrt{|a_0^j|}} \psi\left(\frac{t - kb_0}{a_0^j}\right),$$

где $j \in \mathbb{Z}$ и $a_0 > 1$.

В отличие от преобразования Фурье, ВП допускает использование фактически, бесконечного многообразия различных всплесковых базисов. Различные всплески отличаются друг от друга локализацией в пространстве и тем, как они сглаживают исходный сигнал.

Выбор анализирующего вейвлета, как правило, определяется тем, какую информацию нужно извлечь из обрабатываемого сигнала. Каждый всплеск имеет характерные особенности во временной и частотной области, поэтому иногда с помощью разных всплесков можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемых данных.

Для анализа сигналов исследуемого ЛГ был использован близкий к симметричным вейвлет из семейства Симлетов (рис. 4).

Применение в ВП такого материнского вейвлета (рис. 4) дает возможность произвести анализ нестационарного зашумленного сигнала ЛГ, в результате чего можно определить и вычесть шум квантования. Для подтверждения корректности результатов при выделении шума квантования из исходного сигнала ЛГ, выделенный шум был проинтегрирован. Результаты представлены на рис. 5.

Следующим этапом исследования характеристик ЛГ при таком подходе будет вычисление ВА уже для двух составляющих от исходного сигнала ЛГ, полученных путем ВП и определение параметров шумов рис. 5.

Определенные на основе графиков (рис. 5) значения параметров QN и ARW по серии испытаний ЛГ приведены в табл. 1.

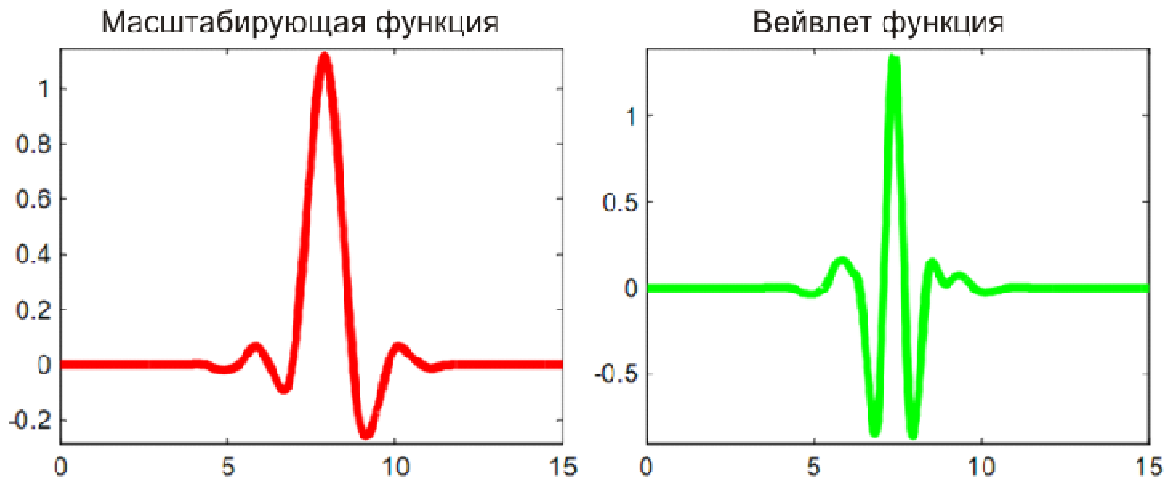


Рис. 4. Масштабирующая функция и вейвлет Симлета "sym8"

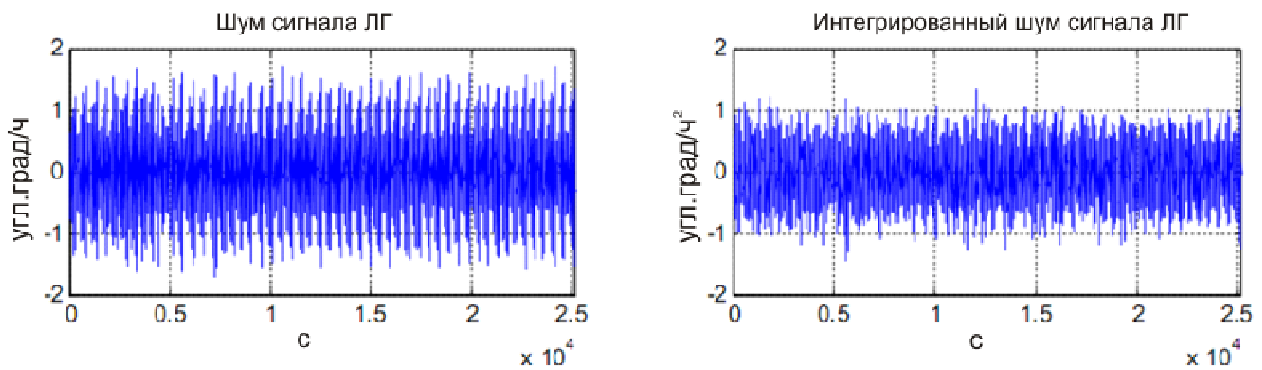


Рис. 5. Шум квантования, выделенный из исходного сигнала ЛГ с помощью ВП и интеграл от этого шума

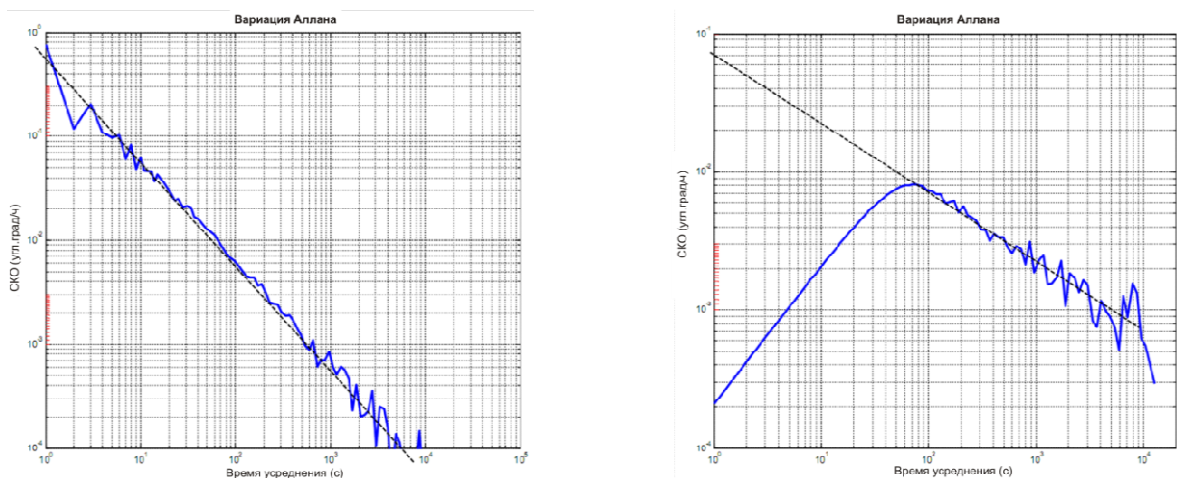


Рис. 6. Определение параметров шума квантования и случайного блуждания угла по графикам ВА

Таблиця 1. Значення параметрів QN и ARW

№ испытания	QN (угл.сек)	ARW ($^{\circ}/\sqrt{ч}$)
1	0.35	0.0012
2	0.35	0.0010
3	0.34	0.0008
4	0.35	0.0010
5	0.34	0.0008
СКО	0.005	0.0002

Выводы

Представленный способ практического применения вейвлет-преобразования при вычислении ВА дает возможность устранять неопределенность в оценке по графическим данным параметров шума квантования и случайного блуждания угла, которые в дальнейшем необходимы для создания адаптивных фильтров.

Так же, на основании данного метода оценивания характеристик ЛГ с помощью алгоритмов аппроксимации планируется заменить оценивание графическим способом рассматриваемых стохастических параметров по ВА на способ автоматических программных вычислений.

Литература

1. Walid Abdel-Hamid, Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications, 2005.
2. Wesley Teskey. Mohamed Elhabiby and Naser El-Sheimy // Sensors & transducers. – Vol.5, 2010. – PP. 61-75.
3. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros. IEEE Std 952-1997 (1998).
4. Allan D. Statistics of atomic frequency standards. Proceedings of the IEEE 54, 2 (feb. 1966), pp 221–230.
5. Tehrani M. Ring laser gyro data-analysis with cluster sampling technique // Proceedings of the SPIE the International Society for Optical Engineering, 412 (1983). – PP. 207 – 220.
6. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования / А. Н. Яковлев. – Учеб. пособие. – Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2003 – 104 с.
7. Юдин М. Н. Введение в вейвлет-анализ / М. Н. Юдин, Ю. А. Фарков, Д. М. Филатов.– Учеб.-практическое пособие. Моск. геологоразв.акад. – М., 2001. – 72 с.

Надійшла до редакції
23 грудня 2013 року

© Головач С. В., 2014