ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 62-933.2:62-932.4:533.9

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОДСТАВКОЙ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

М. В. Чиркин, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7206-6928, e-mail: chirk.mikhail@yandex.ru
А. В. Молчанов, к.т.н., доцент, начальник отделения ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики», Москва, Россия;
orcid.org/0000-0001-8542-6876, e-mail: a.v.molchanov@mail.ru
В. В. Климаков, к.т.н., доцент кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7996-208X, e-mail: v.klimakov@mail.ru
В. Ю. Мишин, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4111-1658, e-mail: mishvalera@yandex.ru
А. Е. Серебряков, к.т.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-8593-7374, e-mail: sea89s@yandex.ru
Г. В. Давыдов, аспирант кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9314-1854, e-mail: georgiy.davydov.93@mail.ru

Разработана и апробирована система цифрового управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа, использующей для своей работы только первичные информационные сигналы кольцевого лазера. Система цифрового управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа включает в себя: двухкаскадный усилитель, биполярный регулируемый источник питания и ЦАП. Испытания разработанной системы показали, что она обеспечивает регулирование амплитуды колебаний кольцевого лазера в диапазоне от 1 до 3 угловых минут и ее ошумление по нормальному закону в пределах от 10 до 30 %. ***Цель работы*** *– создание цифровой системы управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа, использующей в качестве источника информации лишь первичные информационные сигналы кольцевого лазера.*

Ключевые слова: *лазерный гироскоп, вибрационная частотная подставка, кольцевой гелий-неоновый лазер, фаза Саньяка, ПЛИС, инерциальный датчик.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-72-3-12

Введение

В бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов в качестве датчиков угловых скоростей используются лазерные гироскопы [1]. Лазерный гироскоп состоит из: чувствительного элемента – кольцевого гелий-неонового лазера и сервисной электроники, обеспечивающей его работу как инерциального датчика.

Кольцевой лазер *1* генерирует два оптических пучка на длине волны 632,8 нм, распространяющихся во встречных направлениях внутри резонатора, образованного зеркалами *2* (рисунок 1). Лазерные пучки выводятся из резонатора и, смешиваясь в призме *3*, формируют интерференционную картину. Вращение гироскопа изменяет разность фаз ψ встречных лазерных пучков (фазу Саньяка), что сопровождается перемещением интерференционных полос. Для регистрации движений интерференционной картины используется фотодиод *6* с двумя чувствительными площадками. Центры чувствительных площадок разнесены на четверть интерференционной полосы. В результате на его выходе формируются квадратурные сигналы U_c и U_s.

Рассеяние лазерных пучков шероховатостями на отражающих поверхностях зеркал создает слабую связь, которая приводит к синхронизации: при малых угловых скоростях гироскоп не реагирует на вращение. Для устранения данного эффекта применяются различные способы [2-7], один из которых – механическая вибрационная частотная подставка, амплитуда которой промодулированна по случайному закону. Функционально система вибрационной частотной подставки должна обеспечивать регулирование и стабилизацию амплитуды колебаний, которая выбирается в зависимости от диапазона измеряемых угловых скоростей, и ее ошумление. В случае применения кольцевого лазерного гироскопа в авиационной бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС) базовые параметры для управления колебаниями на резонансной частоте следующие: амплитуда колебаний от 2 до 3-х угловых минут, стабилизация амплитуды на уровне не хуже 10 % от заданной, ошумление амплитуды по нормальному закону распределения с глубиной модуляции от 10 до 30 % [4-7]. Такой подход позволяет устранить явление синхронизации встречных волн, но ошумление приводит к появлению случайной ошибки в выходном сигнале кольцевого лазера.

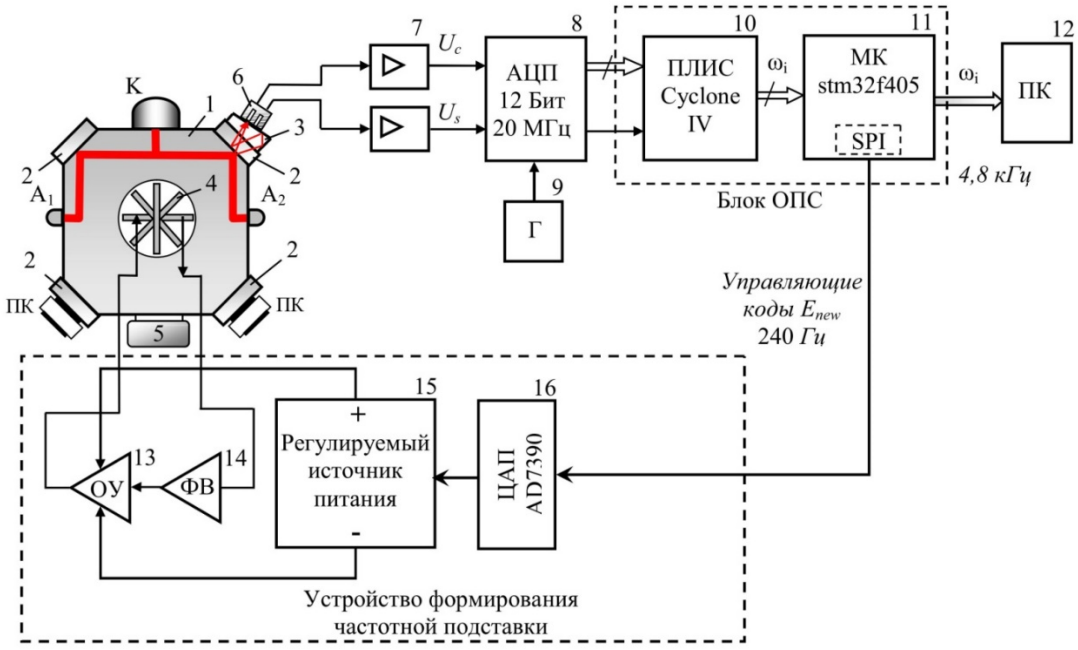

Рисунок 1 – Структурная схема лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины и цифровым управлением вибрационной частотной подставкой: 1 – кольцевой лазер, 2 – зеркала, 3 – смесительная призма, 4 – виброподвес, 5 – электромеханический датчик угловой скорости, 6 – информационный фотодиод, 7 – усилители первичных сигналов, 8 – двухканальный АЦП, 9 – генератор тактовых сигналов, 10 – ПЛИС, 11 – микроконтроллер, 12 – компьютер, 13 – усилитель, работающий в режиме с ограничением, 14 – фазовращатель, 15 – биполярный регулируемый источник питания, 16 – ЦАП с SPI интерфейсом

Figure 1 - Structural scheme of laser gyroscope with precision registration of interference pattern movements and digital dither control: 1 – ring laser, 2 – mirrors, 3 – mixer prism, 4 –mechanical dither, 5 – electromechanical angular velocity sensor, 6 – information photodiode, 7 – amplifiers of primary signals, 8 – two-channel ADC, 9 – timing source, 10 – FPGA, 11 – microcontroller, 12 – computer, 13 – amplifier operating in the restricted mode, 14 – phase shifter, 15 – bipolar regulated source, 16 – DAC with SPI interface

Для создания механических колебаний используется виброподвес *4*, обладающий собственной резонансной частотой f_p и достаточно высокой добротностью Q. При подаче на пьезоэлементы виброподвеса *4* переменного напряжения он сообщает кольцевому лазеру гармонические вращательные колебания на резонансной частоте с амплитудой, изменяющейся по случайному закону. Виброподвесом *4* управляет отдельная плата сервисной электроники, генерирующая в определенные моменты времени серию возбуждающих импульсов [5-7]. В ка-

честве сигнала обратной связи она использует сигнал, снимаемый с электромеханического датчика угловой скорости *5*. Также сигнал с датчика *5* используется для вычитания колебаний на частоте подставки из выходных отсчетов угловой скорости.

В работах [8, 9] была реализована система прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины путем дискретизации и цифровой обработки сигналов лазерного гироскопа, которая позволяет:

– выделять информацию о параметрах вибрационной частотной подставки (амплитуде и частоте);

– использовать цифровые фильтры в качестве альтернативы прямому вычитанию колебаний на частоте подставки;

– на порядок увеличить частоту отсчетов угловой скорости, формируемых на выходе ЛГ.

Основной блок этой системы, модуль обработки первичных сигналов (ОПС), был реализован на базе отладочной платы ПЛИС Terasic DE2-115 [9].

Конструкция виброподвеса *4* позволяет реализовать автоколебательный режим частотной подставки. Для замыкания петли обратной связи может быть использован сигнал, снимаемый с одной из пьезоэлектрических пластин, расположенной на корпусе виброподвеса. Автоколебательный режим работы подставки и цифровая обработка в ОПС создают условия для упрощения конструкции кольцевого лазера (исключения специального датчика *5* относительной угловой скорости).

Цель работы: создание цифровой системы управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа, использующей в качестве источника информации лишь первичные информационные сигналы кольцевого лазера.

Цифровое управление вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа

На рисунке 1 представлена структурная схема лазерного гироскопа с системой прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины, включающей разработанное устройство цифрового управления подставкой. Для экспериментов использован малогабаритный четырехзеркальный кольцевой гелий-неоновый лазер с длиной периметра 28 см и длиной волны 0,6328 мкм разработки ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики» [1].

Аналоговые квадратурные сигналы с информационного фотодиода *6* кольцевого лазера поступают на усилители *7*, реализованные на OPA2222, которые согласуют их диапазон со входным диапазоном АЦП *8*. АЦП фирмы Texas Instrument ADS5231 тактируется от отдельного источника синхронизации *9*. Выход «Valid data» чипа используется для тактирования ПЛИС, входящего в блок ОПС.

Блок ОПС включает: ПЛИС *10* и вспомогательный микроконтроллер *11* stm32f405. Блок ОПС осуществляет:

– накопление первичных отсчетов квадратурных сигналов $U_{c,i}$, $U_{s,i}$;

– определение параметров первичных сигналов;

– восстановление временного ряда для отсчетов угловой скорости ω_i.

Подробно принцип работы блока ОПС на базе ПЛИС описан в [9]. Восстановленные отсчеты угловой скорости ω_i передаются в микроконтроллер stm32f405 по интерфейсу SPI. Микроконтроллер, осуществляет трансляцию этих данных по интерфейсу UART на ПК с частотой 4,8 кГц для последующей обработки. Параллельно в постпроцессоре по отсчетам восстановленного сигнала ω_i определяются параметры вибрационной частотной подставки: амплитуда ω_d и частота f. Для этого используется алгоритм оценки параметров гармонического сигнала по выборке конечной длины с использованием метода наименьших квадратов [11, 12]. Параметры колебаний ω_d и f вычисляются с частотой 240 Гц и используются далее в алгоритме управления подставкой.

Устройство управления частотной подставкой (рисунок 1) представляет собой двухкаскадный усилитель, первый каскад которого работает в режиме фазовращателя ФВ *14* (обес-

печивает выполнение фазовых условий автоколебаний), а второй каскад представляет собой усилитель *13*, работающий в режиме с ограничением ОУ. Амплитуда механических колебаний кольцевого лазера регулируется путем управления напряжением питания ОУ от биполярного регулируемого источника *15*. Управление регулируемым источником питания выполняется с помощью 12-битного цифро-аналогового преобразователя AD7390 *16* с SPI интерфейсом, который является источником опорного напряжения для регулируемого источника питания. В пределах от 3 до 30 В характеристика биполярного источника линейна. Устройство управления частотной подставкой было изготовлено в виде отдельной платы.

Алгоритм управления вибрационной частотной подставкой

Алгоритм управления вибрационной частотной подставкой был реализован в микроконтроллере *11* (МК) блока ОПС. Микроконтроллер осуществляет начальный запуск и калибровку колебательной системы, а также ошумляет амплитуду колебаний. Управляющие коды из микроконтроллера в ЦАП передаются по интерфейсу SPI. В качестве входных данных алгоритм использует измеренные значения амплитуды колебаний кольцевого лазера ω_d. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.

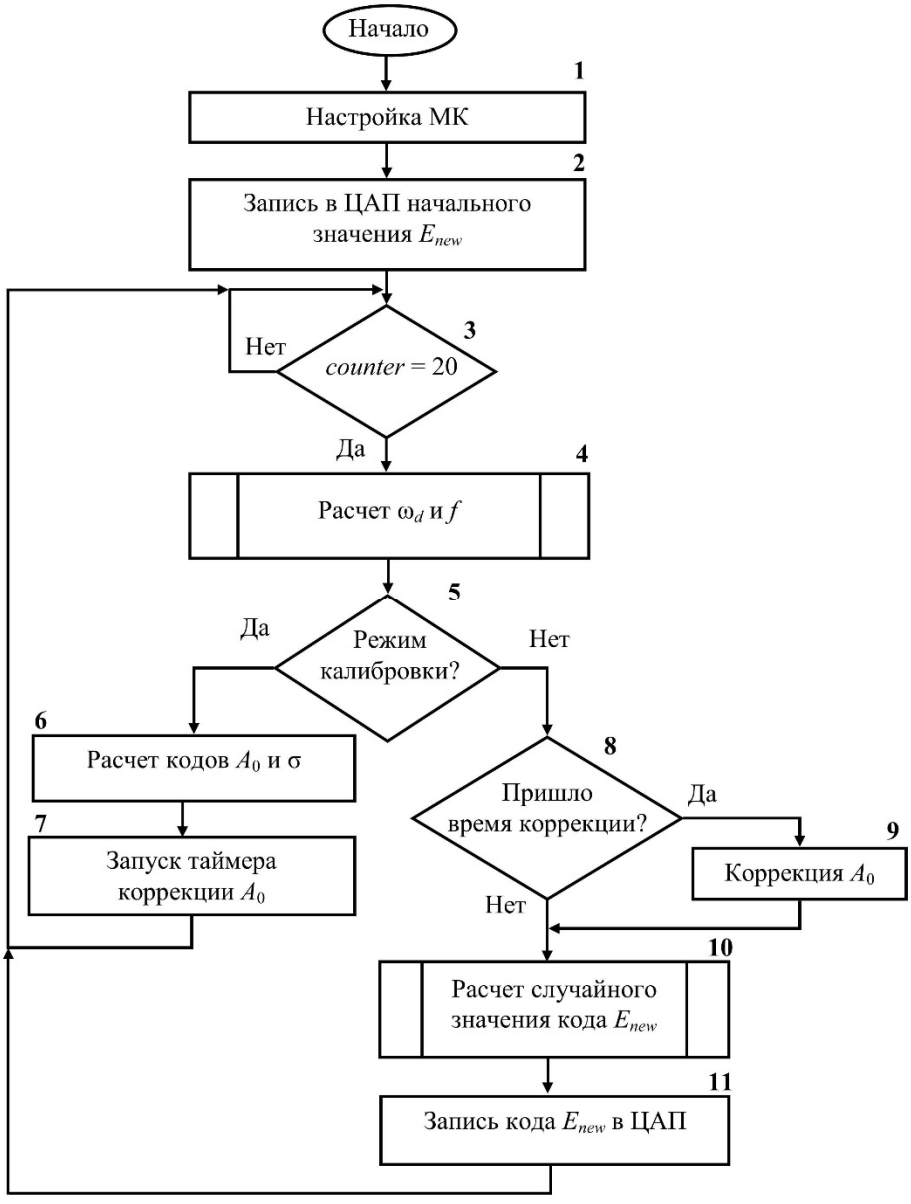

Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма управления вибрационной частотной подставкой
Figure 2 – Block-diagram of mechanical dither control algorithm

При первом запуске осуществляется настройка прерываний и режимов работы портов микроконтроллера (блок 1). В ЦАП записывается код, соответствующий максимальной амплитуде колебаний (блок 2), и осуществляется переход в цикл ожидания (блок 3). Переменная *counter* характеризует количество отсчетов угловой скорости ω_i, полученных от ПЛИС по интерфейсу SPI и записанных в массив. Эта процедура выполняется в обработчике прерывания для SPI. Там же выполняется пересылка принятых отсчетов ω_i по интерфейсу UART на ПК. Как только количество принятых отсчетов достигнет 20, запускается подпрограмма расчета амплитуды и частоты подставки (блок 4). Данный алгоритм подробно описан в работе [11]. В блоке 5 выполняется проверка режима работы микроконтроллера МК: режим калибровки или режим ошумления. Если используется режим калибровки, то по данным ω_d вычисляются коды ЦАП A_0 и σ, соответствующие номинальному значению амплитуды колебаний угловой скорости КЛ, равному 100 °/с, и среднеквадратическому разбросу амплитуды 12 °/с. Запускается таймер коррекции кода A_0 (интервал коррекции 5 минут). После калибровки запускается алгоритм ошумления амплитуды колебаний.

При получении очередного кода ω_d амплитуды колебаний рассчитывается квазислучайное число с нормальным распределением E_{new} (блок 10) с использованием центральной предельной теоремы:

$$E_{new} = \frac{\sqrt{2}\cdot\sigma\left(\sum_{i=1}^{26} x_i - 12{,}5\right)}{1{,}99661} + A_0,$$

где x_i – случайные числа, имеющие равномерное распределение в диапазоне от 0 до 1, генерируются с помощью стандартных библиотек языка *C*.

Периодически раз в 5 минут, по данным, поступающим от ОПС, проводится коррекция кода A_0 (блок 9).

Испытания устройства управления частотной подставкой

Были выполнены испытания разработанного устройства управления частотной подставкой. Для этого была собран рабочий стенд, который включал:

– кольцевой лазер, размещенный в корпусе;

– плату усилителей аналоговых квадратурных сигналов;

– плату аналого-цифрового преобразования ADS5231;

– отладочную плату ПЛИС Terasic DE2-115;

– плату постпроцессора на базе микроконтроллера stm32f405. Для взаимодействия платы DE2-115 и платы контроллера использовался SPI интерфейс с тактовой частотой 2 МГц;

– плату устройства управления частотной подставкой;

– высоковольтный источник питания;

– низковольтный источник питания;

– персональный компьютер для хранения восстановленных отсчетов угловой скорости ω_i. Отсчеты угловой скорости поступали с частотой 4,8 кГц в формате IEEE-754.

Кольцевой лазер был размещен внутри герметичной ванны трехосного стандартного блока лазерных гироскопов (БЛГ), закрепленного на технологической раме через четыре стандартных амортизатора. Ось чувствительности датчика была направлена вверх. При таком расположении выходной сигнал кольцевого лазера $\Omega_{изм}$ будет содержать следующую информацию:

$$\Omega_{изм} = \Omega_З + \Omega_{подст} + \Omega_{сист}, \quad (1)$$

где $\Omega_З$ – проекция угловой скорости вращения Земли на вертикальную ось, $\Omega_{подст}$ – реверсивные вращательные колебания (частотная подставка), $\Omega_{сист}$ – некоторая систематическая ошибка (дрейф кольцевого лазера). Кольцевой лазер совершал вращательные колебания на собственной резонансной частоте 411 Гц. Среднее значение амплитуды колебаний угловой скорости выбиралось равным 100 °/с. Этому значению соответствовала амплитуда колебаний

кольцевого лазера 2,3 угловых минуты. В двух соседних ваннах БЛГ располагались два кольцевых лазера, которые совершали колебания на собственных резонансных частотах.

Была проведена серия испытаний, в процессе которых на компьютер записывались реализации отсчетов угловой скорости ω_i, различной длительности.

В процессе испытаний глубина модуляции изменялась в диапазоне от 10 до 30 %. На рисунке 3 представлен характерный участок одной из записанных реализаций угловой скорости (зеленая кривая). На этом же рисунке показаны отсчеты восстановленной амплитуды колебаний кольцевого лазера (красная кривая). Эта процедура выполнялась в режиме «оффлайн» с помощью алгоритма [11].

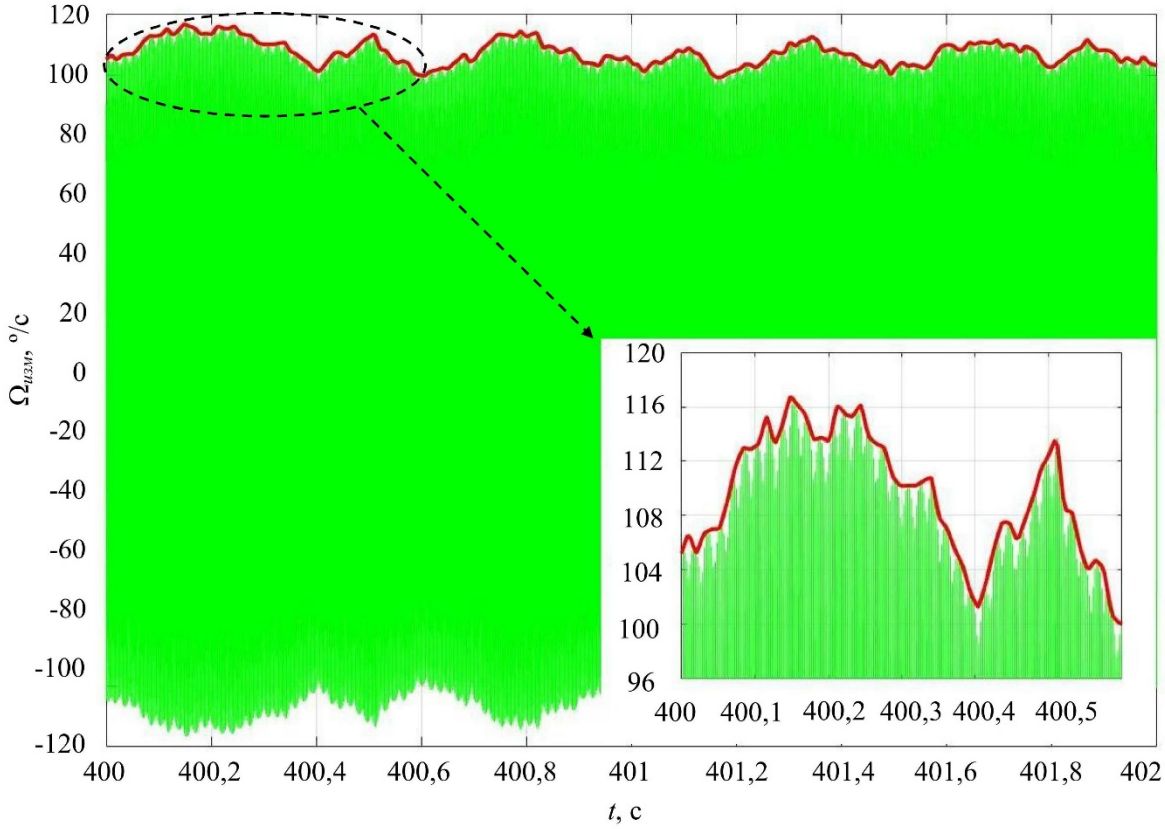

Рисунок 3 – Участок реализации угловой скорости (зеленая кривая) и восстановленная амплитуда колебаний (красная кривая)
Figure 3 – Section of angular velocity implementation (green curve) and restored oscillation amplitude (red curve)

На рисунке 4 построена гистограмма распределения амплитуд колебаний. Качественно она совпадает с нормальным распределением. Также на рисунке построена кривая – аппроксимация гистограммы распределения функцией Гаусса, построенная по отсчетам восстановленной амплитуды колебаний кольцевого лазера ω_d. Среднее значение амплитуд колебаний угловой скорости на частоте подставки составляет 108 °/с. Этому значению соответствует амплитуда колебаний кольцевого лазера 2,5 угловых минуты. Ошибка установки амплитуды на заданном уровне не превышает 10 % от заданной величины.

На рисунке 5 приведен спектр восстановленных колебаний угловой скорости (кривая 1). На рисунке приведена также зависимость (кривая 2), полученная в условиях клиппирования первичных сигналов и прямого вычитания колебаний на частоте подставки, зарегистрированных электромеханическим датчиком угловой скорости колебаний кольцевого резонатора относительно корпуса лазерного гироскопа [13]. По оси абсцисс отложены нормированные частоты (f_0 – частота колебаний кольцевого лазера). Спектры получены для случая одновременной работы трех лазерных гироскопов.

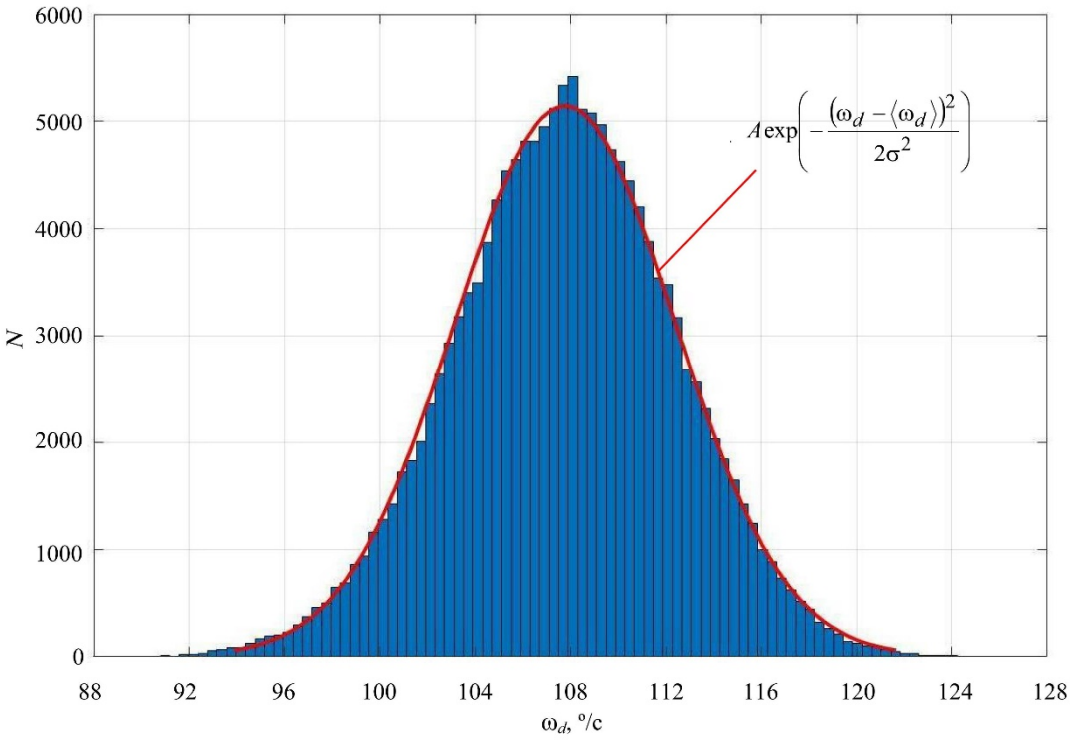

Рисунок 4 – Гистограмма распределения амплитуд колебаний угловой скорости, среднее значение 108 °/с, глубина модуляции 18 %. Красная кривая – аппроксимация гистограммы распределения функцией Гаусса, построенная по отсчетам восстановленной амплитуды колебаний кольцевого лазера ω_d. *A* – параметр аппроксимации, $\langle\omega_d\rangle = 108$ °/с – точечная оценка среднего значения отсчетов ω_d, σ = 4,6 °/с – точечная оценка среднеквадратического отклонения отсчетов ω_d. Точечная оценка коэффициента эксцесса 3,046. Точечная оценка коэффициента асимметрии -0,0781

Figure 4 – Histogram of angular velocity oscillation amplitude distribution, mean value being 108 deg/s, modulation depth – 18 %. Red curve – approximation of the distribution histogram by the Gaussian function, constructed from samples of the reconstructed oscillation amplitude of the ring laser ω_d. *A* – approximation parameter, $\langle\omega_d\rangle = 108$ deg/s – point estimate of mean value of samples ω_d, σ = 4,6 deg/s – point estimate standard deviation of samples ω_d. Point estimate of kurtosis coefficient 3,046. Point estimate of the asymmetry coefficient -0,0781

Анализ полученных спектров колебаний угловой скорости показывает, что разработанное устройство управления частотной подставкой обеспечивает более узкий спектр колебаний угловой скорости (кривая 1). Так, на уровне $S(f) = 10^5$, ширина спектра колебаний угловой скорости уменьшается в 7 раз, а на уровне $S(f) = 10^4$ – в 3 раза. Это, в свою очередь, создает условия для удаления колебаний на частоте подставки с помощью методов цифровой фильтрации.

После удаления колебаний на частоте подставки в соответствии с подходом, реализованным в работе [9], выходной сигнал ЛГ представляет собой отсчеты проекции угловой скорости вращения Земли на вертикаль, значение которой для географической широты Рязани составляет 12,23 градуса/час. В режиме с ошумленной вибрационной частотной подставкой зарегистрировано среднее значение угловой скорости 12,19 градуса/час со среднеквадратичным разбросом 0,01 градуса/час при интервале времени усреднения, равном 100 с. Небольшое отличие обусловлено наличием систематической ошибки (1) в выходном сигнале лазерного гироскопа.

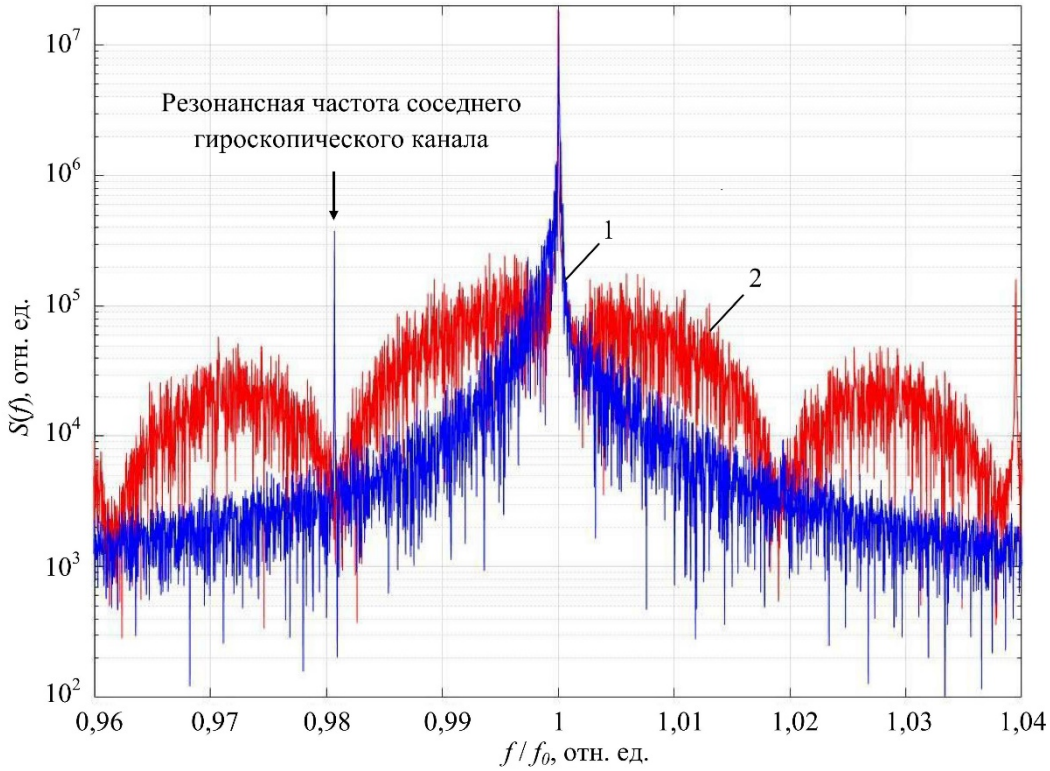

Рисунок 5 – Спектры восстановленных колебаний угловой скорости
Figure 5 – The spectrum of the restored oscillations of the angular velocity

Заключение

Цифровое управление вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа на основе прецизионной регистрации квадратурных сигналов кольцевого лазера позволило:

1. Отказаться от использования специального датчика угловой скорости.
2. Обеспечить:

– регулировку и стабилизацию амплитуды на уровне единиц угловых минут не хуже 10 %;

– ошумление колебаний по амплитуде с модуляцией в диапазоне от 10 до 30 %;

– более узкий спектр колебаний угловой скорости при сохранении нормального закона распределения.

Полученные результаты демонстрируют возможность применения данного подхода при разработке цифровой сервисной электроники лазерного гироскопа.

Библиографический список

1. **Кузнецов А. Г., Молчанов А. В., Чиркин М. В., Измайлов Е. А.** Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78-88.

2. **Broslavets Y. Y., Kalmykova N. S., Fomitchev A. A., Ambartsumyan D. M., Polukeev E. A.** Controlling the coupling of counterpropagating waves in a laser gyroscope with a nonplanar cavity when working with a Zeeman dither //Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 28-30 May 2018. Saint Petersburg, Russia. Pp. 310-313.

3. **Azarova V. V., Golyaev Y. D., Savelyev I. I.** Zeeman laser gyroscopes // Quantum Electronics. 2015, vol. 45, no. 2, pp. 171-179.

4. **Aronowitz F.** Fundamentals of the ring laser gyro, RTO-AG-339 AC/323 (SCI) TP/9, Optical Gyro and their application. May, 1999, pp. 3-1-3-45.

5. **Chesnokov G. I., Polikovsky E. F., Molchanov A. V, Kremer V. I.** Some ways of improving the technical and operational characteristics of strapdown inertial navigation systems // Proceedings of 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 26-28 May 2003. Saint Petersburg, Russia. Pp. 277-285.

6. **Поликовский Е. Ф., Молчанов А. В., Кремер В. И.** Исследование случайного дрейфа лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой // Материалы 3-го Международного симпозиума «Аэрокосмические приборные технологии». 2-4 июня 2004, Санкт-Петербург, Россия. С. 28-30.

7. **Молчанов А. В., Суминов В. М., Чиркин М. В.** Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. № 9.2004. С. 12-19.

8. **Molchanov A. V., Belokurov V. A., Chirkin M. V., Koshelev V. I., Mishin V. Yu., Morozov D. A.** Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing // Proceedings of 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 25-27 May 2015. Saint Petersburg, Russia, pp. 307-314.

9. **Koshelev V. I., Belokurov V. A., Chirkin M. V., Mishin V. Y.** FPGA-based signal processing module for digital laser gyroscope // Proceedings of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017. 11-15 June 2017. Bar, Montenegro, pp.74-77.

10. Заявка № 2019124294, Российская Федерация. Инерциальное измерительное устройство с цифровым средством управления / **Мишин В. Ю., Молчанов А. В., Климаков В. В., Морозов Д. А., Чиркин М. В., Серебряков А. Е.** (РФ); заявитель ПАО «МИЭА»; заявлено 31.07.2019

11. **Кошелев В. И., Белокуров В. А.** Использование метода наименьших квадратов для повышения точности определения движения датчика угловой скорости //DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6. № 3. С. 550-551.

12. **Stoica P.** Spectral analosis of nonuniformly sampled data: a new approach versus the periodogram / IEEE Transactions on signal processing. March 2009, vol. 57, no. 3, pp. 843-858.

13. **Чиркин М. В., Мишин В. Ю., Морозов Д. А., Молчанов А. В., Захаров М. А.** Цифровая обработка сигналов кольцевого лазера при оценке характеристик лазерного гироскопа // Сборник трудов XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2010. С. 53-55.

UDC 62-933.2:62-932.4:533.9

LASER GYROSCOPE MECHANICAL DITHER DIGITAL CONTROL SYSTEM

M. V. Chirkin, Dr. Sc. (Phys. and Math.), full professor, Head of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-7206-6928, e-mail: chirkin.m.v@rsreu.ru
A. V. Molchanov, Ph.D. (Tech.), assistant professor, Head of the Department, Moscow Institute of Electromechanics and Automtics, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0001-8542-6876, e-mail: a.v.molchanov@mail.ru
V. V. Klimakov, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-7996-208X, e-mail: v.klimakov@mail.ru
V. Yu. Mishin, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-4111-1658, e-mail: mishvalera@yandex.ru
A. E. Serebryakov, Ph.D. (Tech.), assistant professor of the Department electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-8593-7374, e-mail: sea89s@yandex.ru
G. V. Davydov, postgraduet student of the Department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-9314-1854, e-mail: georgiy.davydov.93@mail.ru

The system for digital control of laser gyroscope mechanical dither making use for its operation of ring laser primary signals has been developed and tested. The digital control system of the mechanical dither of the laser gyroscope includes: a two-stage amplifier, a bipolar adjustable power source and a DAC. Tests of the developed system showed that it provides the regulation of the oscillation amplitude of a ring laser in the range from 1 to 3 arc minutes and its noise according to the normal law in the range from 10 to 30 %. ***The***

aim of the work *is to construct a digital system to control laser gyro mechanical dither using only primary signals of ring laser as the source of information*

Key words: *laser gyroscope, mechanical dither, ring helium-neon laser, Sagnac phase, FPGA, inertial sensor.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-72-3-12

References

1. **Kuznetsov A. G., Molchanov A. V., Chirkin M. V., Izmailov E. A.** Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. *Quantum Electronics*. 2015, vol. 45, no. 1, pp. 78-88.

2. **Broslavets Y. Y., Kalmykova N. S., Fomitchev A. A., Ambartsumyan D. M., Polukeev E. A.** Controlling the coupling of counterpropagating waves in a laser gyroscope with a nonplanar cavity when working with a Zeeman dither. *Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 28-30 May 2018. Saint Petersburg, Russia, pp. 310-313.

3. **Azarova V. V., Golyaev Y. D., Savelyev I. I.** Zeeman laser gyroscopes. *Quantum Electronics*. 2015, vol. 45, no. 2, pp. 171-179.

4. **Aronowitz F.** Fundamentals of the ring laser gyro, RTO-AG-339 AC/323 (SCI) TP/9, Optical Gyro and their application. May, 1999, pp. 3-1-3-45.

5. **Chesnokov G. I., Polikovsky E. F., Molchanov A. V, Kremer V. I.** Some ways of improving the technical and operational characteristics of strapdown inertial navigation systems. *Proceedings of 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 26-28 May 2003. Saint Petersburg, Russia. Pp. 277-285.

6. **Polikovskij E. F., Molchanov A. V., Kremer V.I.** Issledovanie sluchajnogo drejfa lazernogo giroskopa s vibracionnoj chastotnoj podstavkoj. *Materialy 3-go Mezhdunarodnogo simpoziuma «Ajerokosmicheskie pribornye tehnologii»*. 2-4 ijunja 2004, Sankt-Peterburg, Rossija, pp. 28-30. (in Russian).

7. **Molchanov A. V., Suminov V. M., Chirkin M. V.** Formirovanie dominirujushhej pogreshnosti lazernogo giroskopa. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2004, no. 9, pp. 12-19. (in Russian).

8. **Molchanov A. V., Belokurov V. A., Chirkin M. V., Koshelev V. I., Mishin V. Yu., Morozov D. A.** Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing. *Proceedings of 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 25-27 May 2015. Saint Petersburg, Russia, pp. 307-314.

9. **Koshelev V. I., Belokurov V. A., Chirkin M. V., Mishin V. Y.** FPGA-based signal processing module for digital laser gyroscope. *Proceedings of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017*. 11-15 June 2017. Bar, Montenegro, pp.74-77.

10. Zajavka № 2019124294, Rossijskaja Federacija. *Inercial'noe izmeritel'noe ustrojstvo s cifrovym sredstvom upravlenija*. **Mishin V.Ju., Molchanov A.V., Klimakov V.V., Morozov D.A., Chirkin M.V., Serebrjakov A.E.** (RF); zajavitel' PAO «MIJeA»; zajavleno 31.07.2019. (in Russian).

11. **Koshelev V. I., Belokurov V. A.** Ispol'zovanie metoda naimen'shih kvadratov dlja povyshenija tochnosti opredelenija dvizhenija datchika uglovoj skorosti. *DSPA: Voprosy primenenija cifrovoj obrabotki signalov*. 2016, vol. 6, no. 3, pp. 550-551. (in Russian).

12. **Stoica P.** Spectral analosis of nonuniformly sampled data: a new approach versus the periodogram. *IEEE Transactions on signal processing*. March 2009, vol. 57, no. 3, pp. 843-858.

13. **Chirkin M. V., Mishin V. Yu., Morozov D. A., Molchanov A. V., Zakharov M. A.** Ring laser digital signal processing in evaluating laser gyro characteristics. *Proceedings of 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 31 May – 02 June 2010. Saint Petersburg, Russia. Pp. 60-62.