

УДК 621.373.8

С. Ю. АЛЕКСЕЕВ, М. В. ЧИРКИН, В. Ю. МИШИН, Д. А. МОРОЗОВ,
М. В. БОРИСОВ, А. В. МОЛЧАНОВ, М. А. ЗАХАРОВ

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОГА СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРОВ

Исследован способ регистрации порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере, основанный на цифровой обработке квадратурных сигналов лазерного гироскопа. Найдены требования к механическому вращению, обеспечивающие приемлемую погрешность измерений. Способ не требует прецизионного поворотного устройства, нечувствителен к особенностям оборудования, легко реализуем и исключает человеческий фактор.

Введение

Серийный выпуск бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на лазерных гироскопах требует адекватно оценивать характеристики их деталей и узлов на разных стадиях технологического процесса. Ключевую роль для организации производства играют методики и аппаратура, с помощью которой измеряют параметры, регламентируемые требованиями технической документации.

Один из основных источников погрешности лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой – случайная модуляция механических колебаний кольцевого резонатора, применяемая для преодоления динамического захвата. В результате у регистрируемой угловой скорости существует неопределенность, прямо пропорциональная отношению порога синхронизации встречных волн, генерируемых кольцевым лазером, к квадратному корню из времени усреднения данных [1]. Порог синхронизации (порог захвата) – важная характеристика, определяющая возможность использования лазерного гироскопа в качестве датчика БИНС. Величина порога чувствительна к расположению внутри кольцевого резонатора поверхностей, рассеивающих оптическое излучение, –

Алексеев Сергей Юрьевич. Инженер ООО “НПК Электрооптика”, г. Раменское, Московская область.

Чиркин Михаил Викторович. Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Рязанского государственного радиотехнического университета.

Мишин Валерий Юрьевич. Аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета.

Морозов Дмитрий Александрович. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Рязанского государственного радиотехнического университета.

Борисов Михаил Владимирович. Аспирант Московского авиационного института.

Молчанов Алексей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, начальник отделения Московского института электромеханики и автоматики.

Захаров Михаил Аскольдович. Начальник отдела Московского института электромеханики и автоматики.

Статья по докладу на XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

смещения зеркал, неизбежные при функционировании системы автоматического регулирования периметра резонатора, способны изменить ее на порядок [2].

В процессе промышленного производства соответствующие контрольные операции выполняются на разных этапах изготовления кольцевого лазера. Перед сборкой кольцевого резонатора контролируют полное интегральное рассеяние зеркал, применяя для этого интегрирующую сферу [3]. Однако более важна величина амплитудного коэффициента обратного рассеяния, поскольку интерференция излучения, рассеянного зеркалами кольцевого резонатора в направлении встречного лазерного пучка, определяет величины коэффициентов связи встречных волн и порога синхронизации. Методика регистрации коэффициентов связи в пассивном кольцевом резонаторе развита в работе [4]; используемые при ее реализации измерительные процедуры требуют наличия специальной установки и прецизионного оборудования.

Измерение порога синхронизации осуществляется после завершения технологического процесса изготовления лазера. Традиционный способ основан на постепенном уменьшении (увеличении) скорости вращения лазера вплоть до исчезновения (появления) выходных сигналов. Однако полученный результат корректен лишь при строго равномерном вращении прибора, которое необходимо обеспечить в условиях, когда угловая скорость составляет сотые доли градуса в секунду.

Альтернативный подход заключается в косвенных измерениях, основанных на регистрации переменных составляющих у мощностей встречных волн, генерируемых вращающимся кольцевым лазером [5–7]. Определить величины коэффициентов связи и порога синхронизации возможно, измерив глубину модуляции оптических сигналов и разность фаз их колебаний. Для реализации методики достаточно имеющихся в составе лазерного гироскопа пьезодвигателя, создающего вибрационную подставку, и фотоприемников, регистрирующих мощности выведенных из кольцевого резонатора лазерных пучков. Также требуется знание величин потерь в пассивном резонаторе и коэффициента усиления активной среды, что увеличивает время измерений и создает предпосылку для накопления погрешностей, снижающих точность конечного результата.

Цель настоящей работы – создать методику измерения порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере, основанную на извлечении необходимой информации лишь из первичных сигналов лазерного гироскопа и исключающую необходимость поддерживать равномерное вращение.

Характеристики кольцевых лазеров

В работе исследованы кольцевые гелий-неоновые лазеры, изготовленные на основе моноблоков из ситалла СО-115М, внутри которых высверлены каналы, наполненные смесью изотопов $^3\text{He}:^{20}\text{Ne}:^{22}\text{Ne} = 40:1:1$ до давления 750 Па; длина волны излучения $\lambda = 632,8$ нм. Активная среда возбуждается двухплечевым газовым разрядом постоянного тока. Оптический резонатор периметром 28 см образован двумя плоскими и двумя сферическими зеркалами, расположенными в вершинах квадрата. Сферические зеркала размещены на пьезоэлектрических преобразователях, что позволяет изменять их положения.

Поскольку порог синхронизации зависит не только от рассеивающих свойств, но и от расположения зеркал в кольцевом резонаторе, были выполнены предварительные эксперименты, в процессе которых осуществлены косвенные

измерения порога синхронизации в соответствии с методикой, основанной на модуляции мощностей генерируемых встречных волн [5–7]. На рис. 1 показана зависимость величины порога от положений сферических зеркал для двух кольцевых лазеров. Зеркала перемещались так, чтобы сохранить неизменной длину оптической оси резонаторов; в качестве управляющего параметра использована разность напряжений ΔU , поданных на пьезоэлектрические преобразователи. Для последующих исследований выбраны конфигурации, обозначенные вертикальными стрелками.

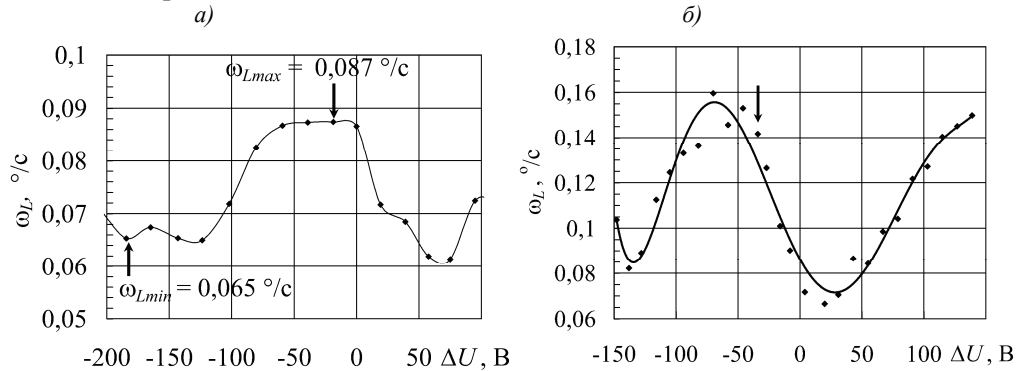


Рис. 1. Результат косвенных измерений порога синхронизации в кольцевых лазерах № 1 (а) и № 2 (б) по методике, основанной на регистрации колебаний мощностей встречных волн. Стрелки показывают разности напряжений на пьезопреобразователях, при которых выполнены дальнейшие эксперименты

Выделение информации о фазе Саньяка

Вращение кольцевого лазера с угловой скоростью Ω вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора, изменяет разность фаз встречных волн (фазу Саньяка) ψ , что отражает дифференциальное уравнение [1]

$$\frac{d\psi}{dt} = K [\Omega(t) - \omega_L \sin(\psi + \gamma)], \quad K = \frac{8\pi A}{\lambda L}, \quad (1)$$

где L – периметр резонатора; A – площадь фигуры, ограниченной внутри резонатора лазерными лучами; ω_L – порог синхронизации; угловая скорость выражена в рад/с.

Первичные информационные сигналы $U_c(t)$, $U_s(t)$ отражают вызванное вращением движение интерференционной картины, сформированной лазерными пучками, выведенными из кольцевого резонатора. Приемные секции фотодиода, регистрирующего этот процесс, разнесены на четверть интерференционной полосы, в результате квадратурные сигналы имеют вид:

$$U_c(t) = U_{c,0} + U_{c,m} \cdot \cos(\psi(t)), \quad U_s(t) = U_{s,0} + U_{s,m} \cdot \sin(\psi(t) + \psi_0), \quad (2)$$

где ψ_0 – дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный несовершенством системы регистрации; $U_{c,0}$, $U_{s,0}$ – смещения; $U_{c,m}$, $U_{s,m}$ – амплитуды колебаний.

Для преобразования отсчетов первичных сигналов (2) использован алгоритм цифровой обработки [8], позволяющий перейти к значениям фазы Саньяка. Применение аналогичного подхода к обработке квадратурных сигналов в лазерных интерферометрах обеспечило сочетание высокой чувствительности к линейным перемещениям (порядка нанометра) с широким динамическим диапазоном измерений (до десятков метров) [9, 10]. Поскольку на плоскости пере-

менных U_c , U_s соотношения (2) задают эллипс, имеется возможность определить значения параметров, исходя из условия наилучшей аппроксимации множества пар отсчетов $U_{c,i}$, $U_{s,i}$. Задача сводится к определению значений параметров $c_1 \div c_5$, соответствующих минимуму суммы квадратов отклонений δ_i экспериментальных точек от кривой второго порядка [9]

$$c_1 - U_{c,i}^2 - c_2 U_{s,i}^2 + c_3 U_{c,i} U_{s,i} + c_4 U_{c,i} + c_5 U_{s,i} = \delta_i, \quad \sum_i \delta_i^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Необходимое условие существования экстремума приводит к системе линейных алгебраических уравнений, коэффициенты которой выражаются через комбинации отсчетов $U_{c,i}$, $U_{s,i}$.

На рис. 2 приведены участки квадратурных сигналов после предварительного усиления, полученные в условиях однонаправленного вращения кольцевого лазера, а также результаты их дискретизации в виде точек на плоскости переменных (U_c, U_s) и аппроксимация отсчетов эллипсом. Минимальное количество пар отсчетов, необходимое для аппроксимации, соответствует одному обороту на плоскости (U_c, U_s) , при меньшем количестве данных процедура (3) может привести к иной кривой второго порядка. Увеличенная вставка в центре рисунка показывает изменения положения центров эллипсов для различных участков реализаций. Флуктуации параметров эллипса обусловлены возмущениями квадратурных сигналов, в частности присутствием шумов и помех.

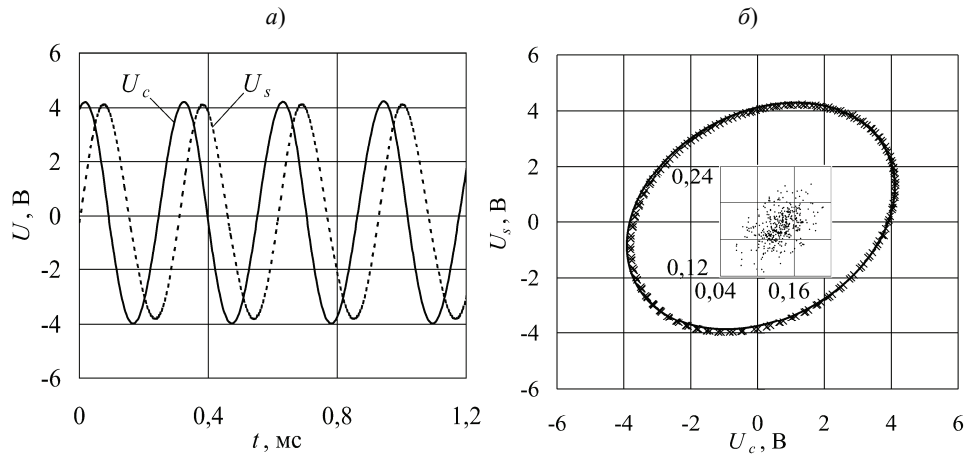


Рис. 2. Квадратурные сигналы лазерного гироскопа: а) участок временных реализаций; б) эллипс на плоскости переменных U_c , U_s . Постоянная составляющая угловой скорости вращения 3°/с. На увеличенной вставке показаны изменения положения центра эллипса, вызванные возмущениями квадратурных сигналов

Параметры первичных сигналов (2) однозначно выражаются через величины $c_1 \div c_5$, что дает возможность восстановить временной ряд для значений фазы Саньяка ψ_i :

$$\cos \psi_i = \frac{U_{s,i} - U_{s,0}}{U_{s,m}}, \quad \sin \psi_i = \frac{U_{c,i} - U_{c,0}}{U_{c,m} \cos \psi_0} - \frac{U_{s,i} - U_{s,0}}{U_{s,m}} \cdot \tan \psi_0. \quad (4)$$

Численное дифференцирование последовательности ψ_i позволяет выделить и устранить скачки фазы Саньяка на 2π .

Измерения порога синхронизации при однонаправленном вращении кольцевого лазера

Кольцевой лазер № 1 (см. рис. 1, а) с отключенной вибрационной подставкой был размещен на поворотном устройстве, обеспечивавшем вращение с заданной постоянной составляющей угловой скорости Ω_0 . Первичные сигналы были оцифрованы и зафиксированы с помощью АЦП с частотой дискретизации $f_s = 96$ кГц и разрядностью 16 Бит. Эксперименты выполнены в диапазоне угловых скоростей вращения, исключающем наличие в спектрах квадратурных сигналов составляющих с частотами, превышающими $0,5 f_s$.

Численное дифференцирование восстановленного ряда значений фазы Саньяка и усреднение полученных результатов во времени приводят к величине, согласующейся с постоянной составляющей угловой скорости

$$\left\langle \frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} \right\rangle = \Omega_0. \quad (5)$$

Выделенный временной ряд для производной $d\psi/dt$ содержит переменные составляющие, частотный спектр $S(f)$ которых представлен на рис. 3. Гармоники с частотами, кратными 48 Гц, отражают неравномерность механического вращения. Составляющие правее разрыва на оси частот соответствуют второму слагаемому в правой части уравнения (1), пропорциональному порогу синхронизации, и отражают связь встречных волн в кольцевом резонаторе. Вместо дискретной гармоники на частоте $f_0 = K\Omega_0/2\pi$, положение которой помечено стрелкой, в спектре присутствует сплошная полоса, что свидетельствует о сложной модуляции фазы Саньяка.

Для выделения переменной составляющей, отражающей вклад связи встречных волн в изменения фазы Саньяка, использовано синхронное детектирование полученных сигналов, результаты которого позволяют найти величину порога синхронизации:

$$\omega_L = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_s^2}, \quad \begin{pmatrix} \omega_c \\ \omega_s \end{pmatrix} = \frac{2}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} - \Omega_0 \right] \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi(t) \\ \sin \psi(t) \end{pmatrix} dt. \quad (6)$$

Результаты измерений порога синхронизации с помощью модуляционной методики (способ 1) и синхронного детектирования (способ 2) сведены в таблицу на рис. 4. В случае настройки резонатора на максимальное значение порога способ 2 дает результат, завышенный в 1,5 раза.

Причина расхождения установлена путем моделирования, основанного на численном интегрировании уравнения (1) при заданной величине порога синхронизации, по результатам которой сформированы первичные сигналы (2). Угловая скорость вращения $\Omega(t)$ содержит постоянную Ω_0 и переменную составляющие в соответствии с реальными амплитудами низкочастотных колебаний угловой скорости, зафиксированными экспериментально. Сформированные сигналы были подвергнуты процедуре выделения информации о фазе Саньяка, описанной в предыдущем разделе, и синхронному детектированию (6). Результат моделирования в форме относительной разности восстановленного и заданного значений порога синхронизации $\delta\omega_L/\omega_L$ показан на рис. 4. Расхождение значений порогов синхронизации, измеренных разными способами в случае реального кольцевого лазера, находится в разумном соответствии с выявленной методической погрешностью. Зависимости относительной погрешности от по-

стоянной составляющей угловой скорости Ω_0 при различных амплитудах ее колебаний показывают, что слишком медленное вращение кольцевого лазера приводит к завышенному результату, что находится в соответствии с приведенной в работе [11] зависимостью результатов измерения порога синхронизации от постоянной составляющей угловой скорости вращения кольцевого лазера. Приемлемая точность измерений достигается, если постоянная составляющая угловой скорости превышает 2 °/с, а амплитуда вибраций оказывается при этом равной 0,36 °/с (кривая 2).

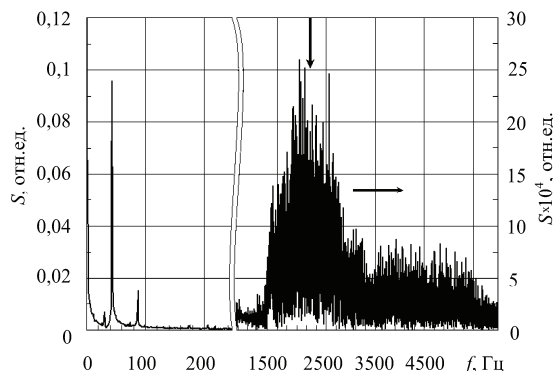


Рис. 3. Частотный спектр производной от фазы Саньяка. Амплитуда переменной составляющей угловой скорости 0,36 °/с, постоянная составляющая $\Omega_0 = 1,11$ °/с

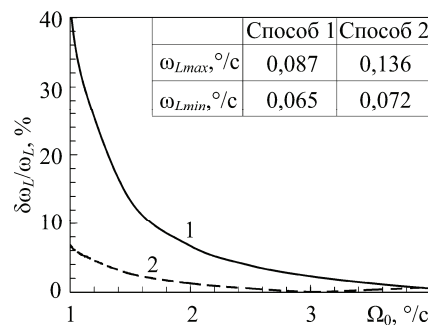


Рис. 4. Результаты моделирования влияния составляющих угловой скорости на методическую погрешность измерения порога захвата. Амплитуда переменной составляющей угловой скорости, °/с: 1) 0,71, 2) 0,36

Особенности синхронного детектирования в случае кольцевого лазера с вибрационной частотной подставкой

Результаты исследований квадратурных сигналов при однонаправленном вращении указывают на возможность получить информацию о величине порога синхронизации при вращательных гармонических колебаниях кольцевого лазера, соответствующих вибрационной частотной подставке

$$\Omega(t) = \omega_D \sin 2\pi f t. \quad (7)$$

Чтобы уменьшить методическую погрешность, синхронное детектирование необходимо осуществлять лишь на интервалах времени, в пределах которых угловая скорость близка к экстремальным значениям. Поскольку первичные сигналы в условиях частотной подставки занимают широкий частотный диапазон, использован двухканальный АЦП с частотой дискретизации $f_s = 1$ МГц и разрядностью 16 Бит. Частота колебаний угловой скорости составляла $f = 400$ Гц, амплитуда ω_D варьировалась в пределах 25–70 °/с. Для каждого интервала времени $[t_n, t_n + \tau]$, на котором определены параметры квадратурных сигналов ($\tau = 0,2$ мс), производная $K^{-1} d\psi/dt$ аппроксимирована полиномом четвертой степени $p(t)$. Синхронное детектирование осуществлено лишь в пределах тех интервалов, для которых аппроксимация $p(t)$ содержит локальный экстремум:

$$\left(\frac{\omega_c}{\omega_s} \right)_n = \frac{2}{\tau} \int_{t_n}^{t_n + \tau} \delta\psi(t) \cdot \begin{pmatrix} \cos\psi(t) \\ \sin\psi(t) \end{pmatrix} dt, \quad \delta\psi(t) = \frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} - p(t). \quad (8)$$

Для апробации разработанной методики использован кольцевой лазер № 2, результаты измерения порога синхронизации которого с помощью методики, основанной на регистрации колебаний мощностей встречных волн, отражены на рис. 1, б. На рис. 5 показаны графики зависимостей от времени для $K^{-1}d\psi/dt$, $p(t)$, их разности $\delta\psi(t)$, а также $\sin\psi(t)$; рис. 6 отражает частотные спектры двух последних величин. Близость пиков на частотах около 125 кГц подтверждает, что разностный сигнал $\delta\psi$ содержит информацию о взаимодействии встречных волн и пороге синхронизации, которая выделяется путем синхронного детектирования. Поскольку в данном случае время интегрирования τ невелико, необходимо усреднять результаты по большому количеству интервалов. Порог синхронизации, определенный путем цифровой обработки первичных сигналов и синхронного детектирования с усреднением по 800 интервалам, находится в диапазоне $0,146 \div 0,150$ °/с в зависимости от амплитуды колебаний угловой скорости; случайная составляющая погрешности имеет порядок 10^{-3} °/с.

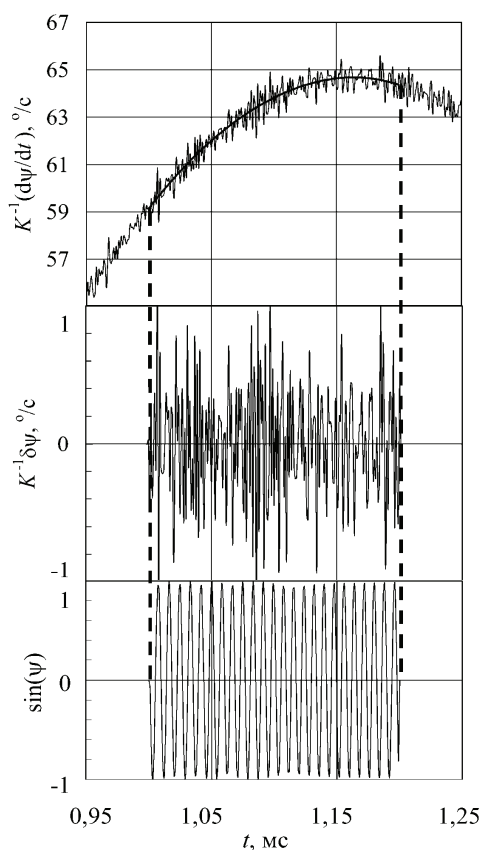


Рис. 5. Скорость изменения фазы Саньяка в случае гармонической вибрационной подставки (а), разностный сигнал $\delta\psi$ (б) и временной ряд для $\sin\psi$ (в). Штриховыми линиями выделены пределы интегрирования $[t_n, t_n + \tau]$

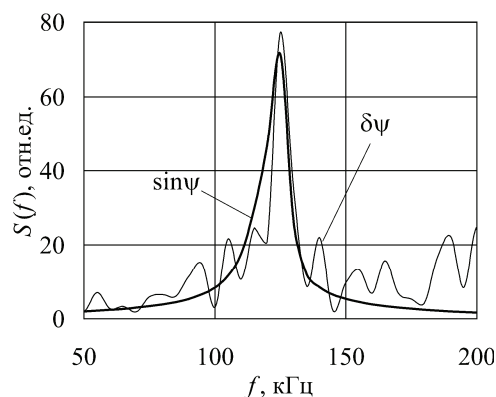


Рис. 6. Спектры разностного сигнала $\delta\psi(t)$ и $\sin\psi(t)$

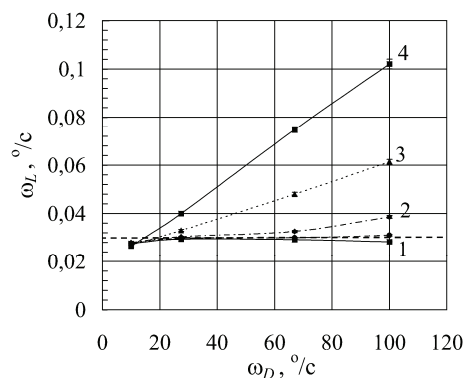


Рис. 7. Влияние амплитуды вибрационной подставки на восстановленную величину порога синхронизации: результаты моделирования при разных уровнях ошумления первичных сигналов. Отношение сигнал/шум, дБ: 1) 60, 2) 54, 3) 48, 4) 43

Для проверки влияния на точность измерения порога синхронизации аддитивного шума, неизбежно присутствующего в первичных сигналах, в случае кольцевого лазера, совершающего гармонические вращательные колебания, использована математическая модель, описанная в предыдущем разделе, в которой задана угловая скорость вращения, изменяющаяся по гармоническому закону (7). В синтезированные первичные сигналы $\cos\psi$ и $\sin\psi$ включены аддитивные некоррелированные шумы.

На рис. 7 показана зависимость восстановленного значения порога синхронизации от амплитуды колебаний угловой скорости ω_D при различных отношениях сигнал/шум; заданное при моделировании значение порога составляет 0,03 °/с (выделено горизонтальной штриховой линией). В случае если в первичных сигналах лазерного гироскопа отношение сигнал/шум оказывается меньше 60 дБ, наблюдается монотонный рост систематической ошибки измерения порога синхронизации при увеличении амплитуды вибрационной подставки, что делает результаты измерений малых порогов синхронизации недостоверными.

Выводы

1. В случае однонаправленного вращения исследованных кольцевых лазеров с постоянной составляющей угловой скоростью более 1 °/с спектр производной от фазы Саньяка содержит диапазон частот, отражающий лишь взаимодействие встречных волн, вызванное обратным рассеянием лазерного излучения в кольцевом резонаторе. Обнаруженный эффект дает возможность регистрировать порог синхронизации на основе цифровой обработки квадратурных сигналов лазерного гироскопа.

2. Найдены требования к однонаправленному механическому вращению, обеспечивающие приемлемую методическую погрешность при измерениях порога синхронизации. Разработанная методика дает возможность определить порог синхронизации без использования прецизионного поворотного устройства, нечувствительна к слабой неравномерности вращения и исключает человеческий фактор при измерениях и обработке результатов. Для ее практической реализации необходимо обеспечить вращение кольцевого лазера с угловой скоростью 2 – 7 °/с.

3. Показана возможность модификации разработанной методики для случая гармонических вращательных колебаний кольцевого лазера, соответствующих вибрационной частотной подставке. Однако ошумление первичных квадратурных сигналов, при котором отношение сигнал/шум оказывается меньше 60 дБ, ограничивает возможность объективных измерений величин порога синхронизации, типичных для прецизионных кольцевых лазеров (0,03 °/с и менее).

4. Модификация методики в условиях вращательных колебаний кольцевого лазера не требует специального стенда и позволяет регистрировать порог синхронизации даже на стадии эксплуатации лазерного гироскопа. При ее использовании необходима лишь гармоническая частотная подставка и двухканальный 16-разрядный АЦП для синхронной дискретизации первичных квадратурных сигналов с их записью и последующей компьютерной обработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aronovitz F.** Fundamentals of the ring laser gyro // Optical Gyros and their Application. - RTO-AG-339. - 1999. - P. 3-1-3-45, 1999.
2. **Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Morozov D.A., Stepanov A.Yu., Chirkin M.V.** Estimation of random error of laser gyro with adjustable beam path geometry in imperfect ring cavity/ 14th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. - St. Petersburg, Russia, 28-30 May, 2007. - P. 44-46.
3. **Schiff T.F.** System for measuring the total integrated scatter of a surface. US Patent № 5,661,556, G01J 1/04, 26.08.1997.
4. **Krenz G., Bux S., Slama S., Zimmermann C., Courteille P.W.** Controlling mode locking in optical ring cavities // Applied Physics B. - 2007. - Vol. 87. - P. 643-647.
5. **Васин, И.А.** Восстановление характеристик обратного рассеяния по отклику излучения кольцевого лазера на искажение оптической оси / И.А.Васин [и др.] // Сб. научных трудов I Межд. конференции «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». МРФ-2008. Т. 3. - Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ. 2008. - С. 285 - 288.
6. **Молчанов, А.В.** Статистические характеристики подложек зеркал и случайная погрешность лазерного гироскопа / А.В.Молчанов, А.Ю.Степанов, М.В.Чиркин // Авиакосмическое приборостроение. - 2008. - № 3. - С. 9-16.
7. **Dovbeshko A.A., Kaminska I.V.** Self-adapting laser gyroscope // Symposium on Gyro Technology. - Stuttgart, Germany, 2001. - P. 7.0-7.11.
8. **Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Morozov D.A., Zakharov M.A.** Ring laser digital processing in evaluating laser gyro characteristics / 17th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. - St. Peterburg, Russia, 31 May - 02 June, 2010. - P. 60-62.
9. **Zumberge M.A., Berger J., Dzieciuch M.A., Parker R.L.** Resolving quadrature fringes in real time // Applied Optics. - 2004. - Vol. 43, No. 4. - P. 771-775.
10. **Pozar T., Mozina J.** Enhanced Ellipse Fitting in a Two-Detector Homodyne Quadrature Laser Interferometer // Measurement Science and Technology. 2011. - Vol. 22, 0853.
11. **Алексеев, С.Ю.** Определение порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере при обработке первичных квадратурных сигналов / С.Ю.Алексеев [и др.] // Радиотехника. - 2012. - № 3. - С. 165-170.

Abstract. We have investigated a technique of registering the synchronization threshold of counter propagating waves in a ring laser based on digital processing of laser gyro quadrature signals. We have worked out requirements on mechanical rotation providing a reasonable error of measurements. The process does not require any precision rotating unit. It is insensitive to equipment characteristics, is easy to implement, and excludes human factor.

Key words: ring laser, synchronization threshold, Sagnac phase, synchronous detection