

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРИГИНАЛЬНОГО МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА БЕЗ ОШУМЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОДСТАВКИ

**Чиркин М. В.¹, Иваненко Ю. Р.², Серебряков А. Е.³,
Мишин В. Ю.⁴**

*(ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»,
Рязань),*

Молчанов А. В.⁵

*(ПАО «Московский институт электромеханики и
автоматики», Москва)*

Исследована устойчивость к изменению входных параметров метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата. Определено влияние квазибелого шума, изменения значений амплитуд первичных сигналов лазерного гироскопа (ЛГ) и сдвига фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на восстановленные отсчеты угловой скорости. Полученные результаты сравниваются с угловой скоростью, найденной в результате аналитического решения дифференциального уравнения ЛГ с нулевой зоной захвата.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, фаза Саньяка, динамический порог захвата, статический порог захвата, квазибелый шум.

1. Введение

В настоящее время в бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов в качестве датчиков угловой скорости используются малогабаритные

¹ Михаил Викторович Чиркин, д.ф.-м.н., профессор (chirkin.m.v@yandex.ru).

² Юлия Романовна Иваненко, аспирант (ivanenko.july@yandex.ru).

³ Андрей Евгеньевич Серебряков, к.т.н., доцент (sea89s@yandex.ru).

⁴ Валерий Юрьевич Мишин, к.т.н., доцент (mishvalera@yandex.ru).

⁵ Алексей Владимирович Молчанов, к.т.н., доцент (a.v.molchanov@mail.ru).

прецизионные лазерные гироскопы со знакопеременной частотной подставкой. Основой лазерного гироскопа (ЛГ) является кольцевой гелий-неоновый лазер, который генерирует встречные пучки оптического излучения с длиной волны 632,8 нм.

Вследствие обратного рассеяния лазерного излучения на шероховатых поверхностях зеркал и диафрагме возникает слабая связь между встречными оптическими волнами, генерируемыми кольцевым лазером. Данная связь приводит к синхронизации частот указанных выше волн, в результате чего ЛГ теряет чувствительность к малым угловым скоростям вращения – появляется методическая погрешность в измерении угловой скорости. Количественно такое явление характеризуется величиной статического порога захвата [1]. Способы подавления методической погрешности представлены рядом производственных [2-5], технологических [6-8] и аппаратно-алгоритмических [9-13] решений. В конкретных технических приложениях, как правило, используется комбинация из нескольких решений. Наименее затратными, а значит, наиболее предпочтительными в условиях серийного производства являются аппаратно-алгоритмические решения: их применение не затрагивает отлаженных технологических процессов.

Подавить явление статического захвата получается в случае использования в ЛГ гармонической частотной подставки. Тем не менее такой прием может привести к параметрической синхронизации, т.е. к возникновению зон динамического захвата, одна из которых находится в окрестности нуля, а остальные кратны угловой скорости, равной амплитуде подставки. Решить указанную проблему удастся, если частотная подставка имеет шумовой характер [14]. Как правило, используют знакопеременную частотную подставку в виде комбинации случайного и периодического процессов, например, хаотически изменяют амплитуду гармонического сигнала с глубиной модуляции от нескольких процентов до половины амплитуды полезного сигнала [1]. Однако такой прием приводит к появлению дополнительной шумовой составляющей

в выходном сигнале ЛГ. Цель настоящей работы заключается в исследовании устойчивости к изменению входных параметров оригинального метода цифровой обработки первичных сигналов ЛГ [9,10], который компенсирует «паразитные» скачки фазы Саньяка, являющиеся следствием динамического захвата, что создает условия для подавления случайной погрешности ЛГ.

2. Математическая модель для первичных сигналов лазерного гироскопа

Источником информации о вращении ЛГ являются сдвиги интерференционной картины, которую на поверхности смесительной призмы образуют лазерные пучки, выведенные из кольцевого резонатора. Первичные информационные сигналы на выходах сдвоенного фотодиода, регистрирующего движение интерференционных полос, имеют вид:

$$(1) \quad U_c(t) = U_{c,0} + U_{c,m} \cos(\psi(t) + \varphi_c);$$

$$(2) \quad U_s(t) = U_{s,0} + U_{s,m} \sin(\psi(t) + \varphi_s),$$

где $U_{c,0}$, $U_{s,0}$ – постоянные смещения квадратурных сигналов; $U_{c,m}$, $U_{s,m}$ – амплитуды квадратурных сигналов; $\psi(t)$ – разность фаз встречных волн, генерируемых кольцевым гелий-неоновым лазером (фаза Саньяка); φ_c , φ_s – дополнительные фазовые сдвиги, обусловленные несовершенством электрооптической системы.

Изменение фазы Саньяка при слабой связи встречных оптических волн в ЛГ с гармонической частотной подставкой описывается дифференциальным уравнением [15]:

$$(3) \quad \frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} = \Omega + \omega_d \sin(2\pi f t) - \omega_L \sin(\psi + \rho),$$

в котором K – масштабный коэффициент; Ω – угловая скорость вращения корпуса ЛГ; ω_d , f – амплитуда и частота подставки соответственно; ω_L , ρ – статический порог захвата и фазовый сдвиг соответственно, обусловленные обратным рассеянием лазерного излучения внутри кольцевого резонатора.

Если частотная подставка промодулирована псевдослучайным сигналом, то вместо второго слагаемого в приведенном выше уравнении можно использовать экспериментально зарегистрированный сигнал ЛГ с вибрационной частотной подставкой [16].

Для решения дифференциального уравнения (3) используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Чтобы устранить эффект «*aliasing*», который приводит к искажениям восстановленного во времени сигнала (при низкой частоте дискретизации высокочастотные составляющие накладываются на низкочастотные), шаг, с которым строится численное решение уравнения, должен быть достаточно мал. В работе [17] показано, что при решении уравнения (3) с шагом 0,2 мкс эффект «*aliasing*» не возникает. В данной статье увеличение значения шага до 0,4 мкс не приводит к возникновению указанного эффекта. Найденная зависимость фазы Саньяка от времени позволяет сформировать и рассчитать «идеальные» (без добавления шума) квадратурные сигналы $U_c(t) = \cos(\psi(t))$ и $U_s(t) = \sin(\psi(t))$. С целью приближения к условиям реального эксперимента к приведенным выше сигналам добавляется квазибелый шум.

В настоящее время наряду с основным методом расчета угловых перемещений ЛГ – реверсивным счетом импульсов – применяется альтернативный способ извлечения информации об угловой скорости вращения ЛГ – вычисление мгновенной фазы Саньяка (МФС) [18] – который включает в себя следующие этапы:

- дискретизацию первичных сигналов ЛГ;
- аппроксимацию эллипсом множества точек, соответствующих парам отсчетов первичных квадратурных сигналов U_c и U_s ;
- вычисление параметров первичных сигналов $U_{c,0}$, $U_{s,0}$, $U_{c,m}$, $U_{s,m}$, $\psi_0 = \varphi_c - \varphi_s$, соответствующих наилучшей аппроксимации;
- восстановление временного ряда для фазы Саньяка $\psi(t)$;

- удаление частотной подставки из отсчетов угловой скорости вращения ЛГ с помощью узкополосного режекторного фильтра.

3. Алгоритмическая компенсация «паразитных» скачков фазы Саньяка

Следствием динамического захвата являются «паразитные» скачки фазы Саньяка, которые возникают из-за связи встречных волн, обусловленной обратным рассеянием лазерного излучения внутри кольцевого резонатора. Схемное представление метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата (МФСК) [9,10] отражает рис. 1. Сигналы I_1 и I_2 , полученные с выходов фотодиодов ФД₁, ФД₂, регистрирующих мощность лазерного излучения в каждой из двух встречных волн, генерируемых кольцевым лазером, усиливаются таким образом, чтобы их амплитуды соответствовали амплитудам информационных сигналов U_c , U_s . С целью подавления противофазных помех переменные составляющие мощностных сигналов складываются. Далее осуществляется синхронное детектирование сигнала v_{ac} ($v_{ac} = v_1 + v_2$ — переменная составляющая суммы мощностных сигналов), при этом в качестве опорных сигналов ($\cos\psi$, $\sin\psi$) используются первичные квадратурные сигналы ЛГ. На выходе фильтра нижних частот (ФНЧ) получаем «косинусный» G и «синусный» Q сигналы, содержащие гармоники в низкочастотной области спектра.

Блок-схема метода МФСК представлена на рис. 2. Восстановление фазы Саньяка ψ_{retr} происходит по квадратурным сигналам с аддитивным шумом [10].

Сигналы G и Q используются для восстановления мгновенных значений статического порога захвата и фазового сдвига с помощью функции четырехквadrантного арктангенса [10]:

$$(4) \quad \omega_L = \sqrt{G^2 + Q^2};$$

$$(5) \quad \rho = \operatorname{atan2}\left(\frac{Q}{G}\right).$$

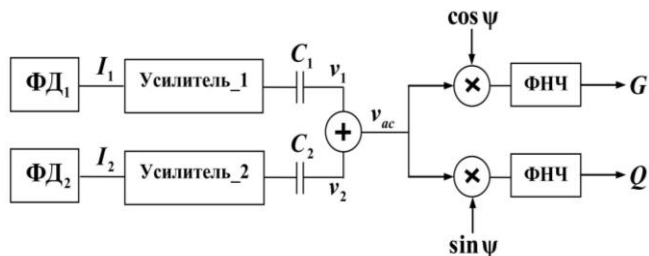


Рис. 1. Синхронное детектирование переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера (ψ – заданная фаза Саньяка, которая включает в себя три составляющие, связанные с постоянным вращением корпуса ЛГ, использованием частотной подставки и взаимодействием встречных волн; I_1, I_2 – мощностные сигналы).

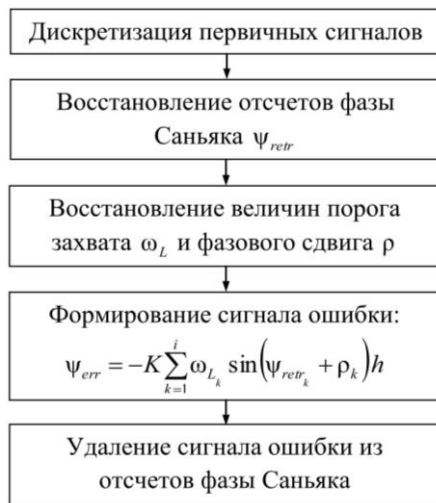


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации динамического порога захвата в выходном сигнале ЛГ (h – шаг интегрирования).

Компенсация динамического порога захвата в выходном сигнале ЛГ выполняется на заключительном этапе алгоритма, когда сформированный сигнал ошибки, вызванной связью

встречных волн, удаляется из отсчетов восстановленной фазы Саньяка [10]:

$$(6) \quad \psi_0 = \psi_{retr} - \psi_{err}.$$

С целью унификации процедуры вычета частотной подставки из отсчетов измеренной угловой скорости параметры режекторного фильтра, применяемого в методах МФС и МФСК, выбраны одинаковыми: коэффициент подавления – 60 дБ; полоса подавления – 40 Гц; центральная частота – 400 Гц; переходная область – 20 Гц.

4. Результаты математического моделирования

Тестовые первичные сигналы были сформированы в результате численного решения дифференциального уравнения (3). Полученные сигналы последовательно обрабатывались двумя методами: МФС и МФСК. В первом методе использовалась частотная подставка с ошумлением амплитуды колебаний, в методе МФСК модуляция гармонической частотной подставки псевдослучайным сигналом не производилась. Эксперимент проводился со следующими начальными условиями: $\omega_L = 0,01$ °/с; $\omega_d = 120$ °/с; $f = 400$ Гц; $\rho = 0,1$ рад; $\Omega_0 = 12$ °/ч – угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ; $f_s = 2,4$ МГц – частота дискретизации первичных квадратурных сигналов; $f_{out} = 2,4$ кГц – частота обновления выходной информации; $L = 0,28$ м – периметр четырехзеркального кольцевого резонатора; $\lambda = 632,8$ нм – длина волны излучения гелий-неонового лазера.

В случае даже равномерного вращения корпуса ЛГ «паразитные» скачки фазы Саньяка на фоне восстановленной угловой скорости не компенсируют друг друга, вследствие чего угловая скорость ЛГ измеряется с ошибкой (рис. 3). С целью компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка сформированный сигнал ошибки, обусловленной слабой связью встречных волн, удаляется из отсчетов восстановленной фазы Саньяка (см. формулу (6)).

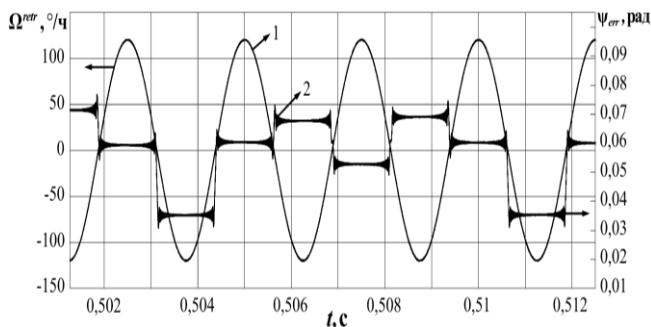


Рис. 3. Восстановленная угловая скорость ЛГ (без фильтрации колебаний гармонической частотной подставки и без коррекции динамического захвата) – кривая 1; «паразитные» скачки фазы Саньяка – кривая 2.

В первом эксперименте моделирование проводилось для идеальных – квадратурных сигналов ЛГ (U_c , U_s – «косинусного» и «синусного» соответственно) с амплитудой 1 В и переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера ($vacF$) с аналогичной амплитудой без добавления шума; во втором эксперименте в сигналы U_c , U_s , $vacF$ добавлялся квазибелый шум ($SNR = 50\text{ dB}$ – отношение сигнал/шум), при этом максимальное время моделирования в обоих случаях составляло $t_{max} = 1001\text{ с}$. Выяснено, что при работе с идеальными сигналами U_c , U_s , $vacF$ формирование сигнала ошибки ψ_{err} , которая вызвана связью встречных оптических волн, определяется точностью восстановления двух величин: статического порога захвата $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = 0,01 \pm 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{с}$ и фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = 0,1 \pm 9 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ [19]. Во втором эксперименте на формирование сигнала ошибки, наряду с указанной выше точностью восстановления величин ρ и ω_L , влияние оказывает квазибелый шум, добавляемый к U_c , U_s , $vacF$. В табл. 1 представлены ошибки измерений угловой скорости, рассчитанные как $|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|)$, где $\Omega_{\text{МФСК}}$ – угловая скорость, восстановленная по методу МФСК; Ω_0 – измеренная угловая скорость, найденная в результате аналитического решения дифференциального уравнения (ДУ),

описывающего быстроту изменения фазы Саньяка для ЛГ с нулевой зоной захвата [1]. Установлено, что квазибелый шум является причиной фазовой ошибки в сигнале $\Omega_{\text{МФСК}}$ в сравнении с Ω_0 : максимальное значение этой ошибки составляет $5 \cdot 10^{-3}$ рад.

Таблица 1

Ошибки при измерении угловой скорости

Идеальные сигналы U_c , U_s , $vacF$	Сигналы U_c , U_s , $vacF$ с добавлением шума
При посекундном осреднении, [°/ч]:	
$(8 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-4}$
При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
$(8 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$(9 \pm 6) \cdot 10^{-5}$
При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
$(8 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$	$(8 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$

В третьем эксперименте амплитуда «косинусного» сигнала изменялась с шагом 0,1 В, при этом амплитуды сигналов U_s , $vacF$ были равны 1 В (см. табл. 2). Максимальное время моделирования составляло $t_{\text{max}} = 101$ с; в сигналы U_c , U_s , $vacF$ добавлялся квазибелый шум ($SNR = 50$ dB).

Таблица 2

Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости

$U_{c,m} = 1$ В	$U_{c,m} = 1,1$ В	$U_{c,m} = 1,2$ В	$U_{c,m} = 1,3$ В	$U_{c,m} = 1,4$ В	$U_{c,m} = 1,5$ В
При посекундном осреднении, [°/ч]:					
$(6 \pm 5) \cdot 10^{-4}$	$(9 \pm 5) \cdot 10^{-3}$	$(1,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(2,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-2}$	$(3 \pm 1,7) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:					
$(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	$(2,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-3}$	$(4 \pm 2,1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 2,6) \cdot 10^{-3}$	$(6 \pm 3) \cdot 10^{-3}$

Ошибки измерений угловой скорости при увеличении амплитуды «косинусного» сигнала на 50% по сравнению с амплитудой «синусного» сигнала достигают максимальных значений ввиду некорректного восстановления величины

фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = 0,15 \pm 1,4 \cdot 10^{-3}$ рад. Максимальное значение фазовой ошибки в сигналах $\Omega_{\text{МФСК}}$ и Ω_0 составляет 0,9 рад, при этом амплитуда угловой скорости вращения ЛГ, восстановленной по методу МФСК, в 2,8 раза превышает амплитуду угловой скорости, найденной в результате аналитического решения ДУ.

В четвертом эксперименте сигналы U_c , U_s сдвигались относительно сигнала $\text{vac}F$ на заданное количество отсчетов вправо, т.е. квадратурные сигналы опережали по фазе сигнал переменной составляющей суммы мощностных сигналов, при этом один отсчет на частоте первичного сигнала 0,2 МГц, соответствующей максимальной амплитуде подставки, приближенно был равен 0,6 рад (см. табл. 3). В первом случае эксперимент проводился с идеальными сигналами U_c , U_s и $\text{vac}F$, во втором случае к указанным сигналам добавлялся квазибелый шум ($\text{SNR} = 50 \text{ dB}$). Максимальное время моделирования составляло $t_{\text{max}} = 1001 \text{ с}$, амплитуды квадратурных сигналов были равны 1 В. Установлено, что порядок величины ошибки, которая возникает при измерении угловой скорости, не изменяется при сдвиге квадратурных сигналов относительно $\text{vac}F$, начиная с пяти отсчетов. При сдвиге указанных сигналов на 10 отсчетов значащая часть ошибки в трех вариантах осреднения для идеальных сигналов и сигналов с добавлением шума совпадает. Неправильное восстановление порога захвата начинается при сдвиге рассматриваемых сигналов на 5, 8, 10 и 12 отсчетов независимо от наличия шума:

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,7 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (5 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,2 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (8 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (1,7 \pm 0,012) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (10 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,9 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (12 отсчетов).}$$

Неверное восстановление ρ происходит при сдвиге сигналов U_c , U_s относительно $\text{vac}F$ на 5 и 8 отсчетов независимо от добавления квазибелого шума: $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = 3 \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с}$ (5 отсчетов);

$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = 3 \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с}$ (8 отсчетов). Максимальное превышение амплитуды сигнала $\Omega_{\text{МФСК}}$ над амплитудой Ω_0 (с

добавлением шума) равно 1,1 раза при сдвиге рассматриваемых сигналов на 8 отсчетов.

Таблица 3

Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости

Количество отсчетов	Идеальные сигналы $U_c, U_s, vacF$	Сигналы $U_c, U_s, vacF$ с добавлением шума
0	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(8 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-4}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(8 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$(10 \pm 6) \cdot 10^{-5}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(8 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$	$(8 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$
1 отсч $\approx 0,6$ рад $\approx 34^\circ$	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(5 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(5 \pm 0,024) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$
2 отсч $\approx 1,2$ рад $\approx 69^\circ$	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(1,7 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(1,7 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(1,7 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$	$(1,7 \pm 0,009) \cdot 10^{-2}$
5 отсч ≈ 3 рад $\approx 172^\circ$	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(7 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(7 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	$(7 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$
	При посекундном осреднении, [°/ч]:	

8 отсч $\approx 4,8$ рад $\approx$ $\approx 275^\circ$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(6 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
10 отсч ≈ 6 рад $\approx$ $\approx 344^\circ$	$(6 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(4 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$
12 отсч $\approx 7,2$ рад $\approx$ $\approx 413^\circ$	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(4 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$
	При посекундном осреднении, [°/ч]:	
	$(4 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 10 с, [°/ч]:	
	$(4 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$
	При осреднении на интервале времени – 100 с, [°/ч]:	
	$(4 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$

На рис. 4 представлены передаточные характеристики ЛГ как зависимость восстановленной угловой скорости, не содержащей колебаний подставки и осредненной на интервале времени, равном 1 секунде, от заданной угловой скорости равномерного вращения корпуса ЛГ. Частота дискретизации полезного сигнала ЛГ равна 2,4 кГц. В численном эксперименте выбрано среднестатистическое значение статического порога захвата ($\omega_L = 0,01$ °/с) для серийно выпускаемых кольцевых лазеров, периметр четырехзеркального резонатора которых равен 28 см. Кривая 1 соответствует методу обработки первичных сигналов, заключающемуся в аппроксимации эллипсом последовательности пар отсчетов квадратурных сигналов в ЛГ с гармонической частотной подставкой; она имеет участок нулевых значений полезного сигнала – первую зону динамического захвата.

Кривая 2 соответствует методу обработки первичных сигналов с компенсацией «паразитных» скачков фазы Саньяка в ЛГ с гармонической частотной подставкой (она совпадает с идеальной передаточной характеристикой ЛГ). В данном случае

происходит искусственная компенсация динамического захвата в окрестности нулевого значения угловой скорости. Отсчеты угловой скорости, восстановленные при обработке первичных сигналов методом МФС в ЛГ с ошумленной подставкой, обозначены кривой 3. В третьем методе обработки квадратурных сигналов в области малых угловых скоростей появляется ошибка: кривая 3 отклоняется от идеальной передаточной характеристики ЛГ.

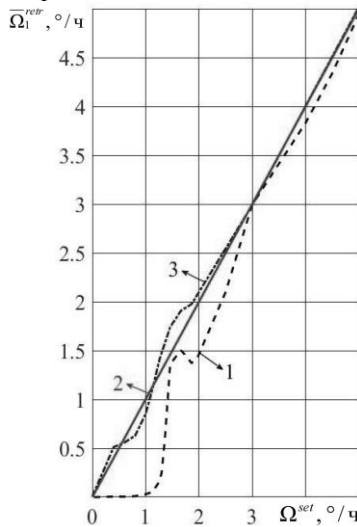


Рис. 4. Передаточные характеристики ЛГ при разных методах обработки первичных сигналов: кривая 1 – метод МФС в ЛГ с гармонической подставкой без ошумления; кривая 2 – метод МФСК в ЛГ с гармонической частотной подставкой; кривая 3 – метод МФС в ЛГ с ошумленной частотной подставкой.

5. Заключение

Формирование сигнала ошибки, вызванной связью встречных оптических волн, определяется точностью измерения порога захвата, фазового сдвига и квазибелым шумом в сигналах U_c , U_s , $vacF$. Последний фактор является причиной фазовой ошибки в сигнале угловой скорости вращения ЛГ, восстановленной по методу МФСК, в сравнении с сигналом

угловой скорости, найденной в результате аналитического решения ДУ с нулевым значением зоны захвата. Результаты третьего эксперимента свидетельствуют о некорректной работе метода МФСК в случае неравных значений амплитуд первичных квадратурных сигналов: возникают значительные амплитудные и фазовые ошибки в сигналах $\Omega_{\text{МФСК}}$ и Ω_0 . Предлагается предварительно использовать метод вычисления мгновенной фазы Санька [18], далее – проводить нормировку первичных сигналов по амплитуде и фазе, а на заключительном этапе – применять метод МФСК. Сдвиг квадратурных сигналов относительно сигнала переменной составляющей суммы мощностных сигналов, несмотря на неправильное восстановление ρ и ω_L , не влияет на измеренную угловую скорость. Следовательно, метод МФСК нечувствителен к фазовой ошибке, которая в натурном эксперименте может возникнуть между сигналами U_c , U_s и vacF .

Литература

1. Aronowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro. Optical gyros and their application. 1999. P. 3–45.
2. V. A. Petrukhin, A. S. Bessonov. Setup for measuring complex coupling parametrs in laser gyro cavity. // 27 ICINS 2020 – Proceedings, May 2020, 9133777.
3. E. A. Pertrukhin. Prediction of the lock-in threshold value in a ring cavity of the laser gyro. // XXIII ICINS 2016 – Proceeding, SPb May 2016, pp. 103 – 107.
4. S. Yu. Alekseev, M. V. Chirkin, V. Yu. Mishin, D. A. Morozov, M. V. Borisov, A. V. Molchanov, M. A. Zakharov. Technological aspects of precision ring laser production: synchronization threshold measurements in manufacture and operation. // XIX ICINS 2012 – Proceeding, SPb May 2012, pp. 54 – 56.
5. А. Е. Федоров, В. А. Зборовский, Д. А. Рекунов. Оценка точностных параметров резонатора лазерного гироскопа

- в производстве. // МКИНС 2014, Материалы под ред. В. Г. Пешехонова, СПб 2014. – С. 250 – 257.
6. A. S. Bessonov, A. P. Makeev, V. A. Petrukhin. Measurements of complex coupling coefficients in a ring resonator of laser gyroscope. // Quantum electronics 47(7) 675 – 682 (2017), doi: 10.1070/QEL16291.
 7. A. S. Bessonov, V. A. Petrukhin, V. Yu. Khodyrev. Set up for integral light scattering irregularities measurements on the surface of laser gyro mirrors. / XXIII ICINS 2016 – Proceeding, SPb May 2016, pp. 108 – 111.
 8. M. V. Chirkin, A. E. Serebryakov, A. V. Molchanov, M. A. Zakharov. Technological aspects of precision ring laser production: monitoring mirror surfaces of optical resonators. // XX ICINS 2013 – Proceeding, SPb May 2013, pp. 66 – 68.
 9. Sin-Woo Song et al. New random walk reduction algorithm in ring laser gyroscopes, Journal of Optics, 12 (2010) 115501, doi: 10.1088/2040-8978/12/11/115501.
 10. Jae-Cheul Lee, Hyun-Ju Cho, Ho-Soon Yang. Zero lock-in implementation by phase Wrapping/unwrapping in a ring laser gyroscope. // App. Optics v. 60, #34, 2021, 10529.
 11. С. В. Витязев, Д. В. Валуйский, В. Ю. Мишин, А. В. Молчанов, А. Е. Серебряков, М. В. Чиркин. Определение фазы Саньяка в цифровом лазерном гироскопе при применении DSP процессора. // Навигация и управление летательными аппаратами. №32, 2021. – С. 22 – 37.
 12. A. V. Molchanov, V. A. Belokurov, M. V. Chirkin, V. I. Koshelev, V. Yu. Mishin, D. A. Morozov. Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing. // XXII ICINS 2015 – Proceeding, SPb May 2015, pp. 307 – 314.
 13. В. Ю. Мишин, А. В. Молчанов, М. В. Чиркин. Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах. // Приборы, 2013, №1 (151). – С. 33 – 38.

14. Кробка Н.И., Свиридов М.В. Влияние случайной частотной подставки в кольцевом лазере на точность измерения вращения // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12, № 2. – С. 363–367.
15. 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.
16. Molchanov A. V., Belokurov V. A., Chirkin M. V., Kagalenko M. B., Koshelev V. I., Mishin V. Yu., Morozov D. A. The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes // XXIII ICINS 2016 – Proceedings, SPb, May 2016, pp. 120–122.
17. A. A. Golovan, V. Yu. Mishin, A. V. Molchanov, M. V. Chirkin. Method for analyzing the influence of the errors induced by the gyroscopic channel of a strapdown INS in the autonomous mode. // Journal of computer and systems sciences international, 2021, Vol. 60, № 4, pp. 627 – 638, doi: 10.1134/31064230721040043.
18. 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 // XXII ICINS 2015 – Proceedings, SPb, May 2015, pp. 307–314.
19. Чиркин М.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Молчанов А.В., Иваненко Ю.Р., Давыдов Г.В. Подавление случайной погрешности лазерного гироскопа без ошумления частотной подставки // XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 г. – СПб: «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2023. С. 225–228.

RESEARCH OF ORIGINAL METHOD TO DIGITALLY PROCESS LASER GYROSCOPE PRIMARY SIGNALS WITHOUT DITHER NOISING

Mikhail Chirkin, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (chirkin.m.v@yandex.ru).

Julia Ivanenko, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, PhD student (ivanenko.july@yandex.ru).

Andrey Serebryakov, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Cand.Sc., assistant professor (sea89s@yandex.ru).

Valery Mishin, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Cand.Sc., assistant professor (mishvalera@yandex.ru).

Alexey Molchanov, Moscow Institute of Electromechanics and Automatics, Moscow, Cand.Sc., assistant professor (a.v.molchanov@mail.ru).

Abstract. The stability to changes in input parameters of the method to calculate the instantaneous Sagnac phase to compensate for dynamic lock-in is studied. The influence of quasi-white noise, changes in laser gyroscope primary signal amplitudes and phase shift between quadrature signals and alternating component of power signal sum on the retrieved angular rate counts is determined. The results obtained are compared with the angular rate calculated by the analytical solution of differential equation for laser gyroscope having a zero lock-in zone.

Keywords: laser gyroscope, Sagnac phase, dynamic lock-in threshold, static lock-in threshold, quasi-white noise.

УДК 629.7

ББК 39.56

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...*

*Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...*

