

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА К ВОЗМУЩЕНИЯМ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

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)

Сформирована математическая модель для первичных сигналов лазерного гироскопа, которая учитывает связь встречных оптических волн, механическое вращение корпуса лазерного гироскопа и аддитивный шум. Исследована чувствительность к возмущениям входной информации метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата на базе лазерного гироскопа с гармонической частотной подставкой без ошумления. Для анализа корректности работы метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата полученные результаты сравниваются с угловой скоростью, найденной в результате аналитического решения дифференциального уравнения лазерного гироскопа с нулевой зоной захвата. Зафиксированы фазовые ошибки между исследуемым и эталонным сигналами угловой скорости вращения лазерного гироскопа. Определено влияние квазибелого шума, изменения значений амплитуд первичных сигналов и сдвига фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на зарегистрированные отсчеты угловой скорости вращения корпуса лазерного гироскопа.

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

¹ Михаил Викторович Чиркин, д.ф.-м.н., профессор (chirk.mikhail@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).

1. Введение

В настоящее время в бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов в качестве датчиков угловой скорости используются лазерные гироскопы со знакопеременной частотной подставкой [4]. Основой лазерного гироскопа (ЛГ) является кольцевой гелий-неоновый лазер, активная среда которого поддерживается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока.

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. Количественно такое явление характеризуется величиной статического порога захвата [13]. Для подавления методической погрешности, вызванной статическим захватом, применяют производственные [9, 12, 19, 22, 25, 26], технологические [1, 2, 7] или аппаратно-алгоритмические [6, 10, 11, 16, 17, 21, 27] решения. В конкретных технических приложениях, как правило, используются комбинации 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. Однако 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 [5, 8, 14, 15, 18]. Как правило, используют знакопеременную частотную подставку в виде комбинации случайного и периодического процессов. Например, случайным образом изменяют амплитуду гармонического сигнала с глуби-

ной модуляции от нескольких процентов до половины амплитуды полезного сигнала [13]. Рандомизация выходного сигнала ЛГ приводит к появлению дополнительной шумовой составляющей – случайным блужданиям регистрируемого углового положения («*angle random walk*»). В данной статье для цифровой обработки первичных сигналов ЛГ с гармонической частотной подставкой предлагается использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата (МФСК) [6, 16, 21, 27]. Указанный метод компенсирует «паразитные» скачки фазы Саньяка, которые являются следствием динамического захвата, что создает условия для подавления случайной погрешности ЛГ вследствие отказа от модуляции частотной подставки псевдослучайным сигналом. Цель настоящей работы заключается в исследовании чувствительности метода МФСК к возмущениям входной информации, т.е. к изменениям входных параметров построенной математической модели для первичных сигналов ЛГ. Использование метода МФСК для цифровой обработки информационных сигналов ЛГ делает возможным построение бесплатформенных инерциальных навигационных систем авиационного применения с точностью не хуже чем 0,9 км за час полета.

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 [3]

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

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

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 [23]

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

в котором K – масштабный коэффициент; Ω_{const} – угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ; ω_d, f – амплитуда и частота подставки соответственно; ω_L, ρ – статический порог захвата и фазовый сдвиг, 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 [24].

Дифференциальное уравнение (3) решается численно с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка. Чтобы устранить эффект наложения частот («aliasing»), который приводит к искажениям восстановленного во времени полезного сигнала (при низкой частоте дискретизации высокочастотные составляющие накладываются на низкочастотные), шаг, с которым строится численное решение уравнения, должен быть достаточно малым. В статье [20] показано, что при решении дифференциального уравнения (3) с шагом 0,2 мкс «aliasing» не возникает. В настоящей работе установлено, что увеличение значения шага до 0,42 мкс также не приводит к возникновению указанного эффекта. Полученная в результате решения уравнения (3) временная зависимость фазы Саньяка позволяет рассчитать квадратурные сигналы ЛГ.

В настоящее время наряду с основным методом расчета угловых перемещений ЛГ – реверсивным счетом импульсов [10] – применяется альтернативный способ извлечения информации об угловой скорости вращения ЛГ – вычисление мгновенной

фазы Саньяка [6, 20, 24]. В обозначенных методах в отличие от метода МФСК для устранения динамического захвата требуется модулировать частотную подставку псевдослучайным сигналом, что приводит к увеличению случайной погрешности ЛГ.

3. Алгоритмическая компенсация «паразитных» скачков фазы Саньяка

Следствием динамического захвата являются «паразитные» скачки фазы Саньяка, которые возникают из-за слабой связи встречных волн, обусловленной обратным рассеянием лазерного излучения на элементах кольцевого резонатора.

В методе МФСК «паразитные» скачки фазы Саньяка компенсируются алгоритмически (рис. 1, рис. 2) [6, 16, 21, 27].

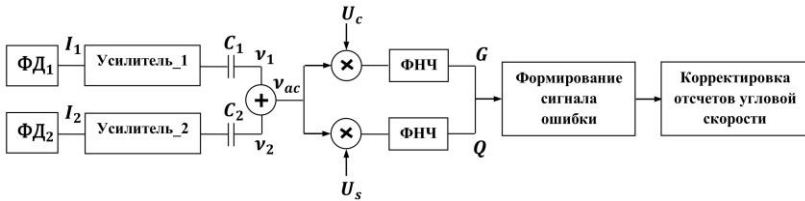


Рис. 1. Синхронное детектирование переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера ($v_{ac} = v_1 + v_2$)

Фотодиоды ФД₁ и ФД₂ регистрируют мощность лазерного излучения в каждой из двух встречных волн, генерируемых кольцевым гелий-неоновым лазером (рис. 1). Мощностные сигналы I₁ и I₂, полученные соответственно с выходов ФД₁, ФД₂, усиливаются таким образом, чтобы их амплитуды соответствовали амплитудам информационных сигналов U_c, U_s. С целью подавления противофазных помех переменные составляющие мощностных сигналов v₁ и v₂ складываются. Далее осуществляется синхронное детектирование сигнала v_{ac} – переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера, при этом в качестве опорных сигналов используются первичные сигналы ЛГ (U_c, U_s).

Переменная составляющая суммы мощностных сигналов, пропорциональная мощности лазерного излучения, вычисляется по формуле [21]

$$(4) \quad v_{ac}(t) = 2A_1A_2E_0 \sin(\psi(t) + \rho),$$

где A_1, A_2 – амплитуды оптических волн, распространяющихся внутри кольцевого резонатора по часовой и против часовой стрелки соответственно; E_0 – параметр, пропорциональный заданному значению ω_L , рассчитывается следующим образом [21]:

$$(5) \quad E_0 = \sqrt{\left[\left(\frac{r_1A_2}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{r_2A_2}{A_1} \right)^2 + 2r_1r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]},$$

где r_1, r_2 – амплитуды коэффициентов связи встречных оптических волн; β_1, β_2 – фазы коэффициентов связи встречных волн.

Фазовый сдвиг, используемый в выражении (4), определяется по формуле [21]

$$(6) \quad \rho = \operatorname{arctg} \left[\frac{\frac{r_2A_2}{A_1} \sin(\beta_2) - \frac{r_1A_1}{A_2} \sin(\beta_1)}{\frac{r_2A_2}{A_1} \cos(\beta_2) + \frac{r_1A_1}{A_2} \cos(\beta_1)} \right].$$

Восстановление фазы Саньяка ψ_{retr} происходит либо по «идеальным» (без добавления шума) квадратурным сигналам ЛГ, либо по «неидеальным» (с аддитивным шумом) квадратурным сигналам (рис. 2).

На выходе фильтра нижних частот (ФНЧ) получены «синусный» Q и «косинусный» G сигналы, содержащие гармоники в низкочастотной области спектра (рис. 1). Указанные сигналы используются для восстановления мгновенных значений статического порога захвата и фазового сдвига с помощью функции четырехквadrантного арктангенса [21]:

$$(7) \quad \omega_L = \sqrt{G^2 + Q^2};$$

$$(8) \quad \rho = \operatorname{atan} 2 \left(\frac{Q}{G} \right).$$

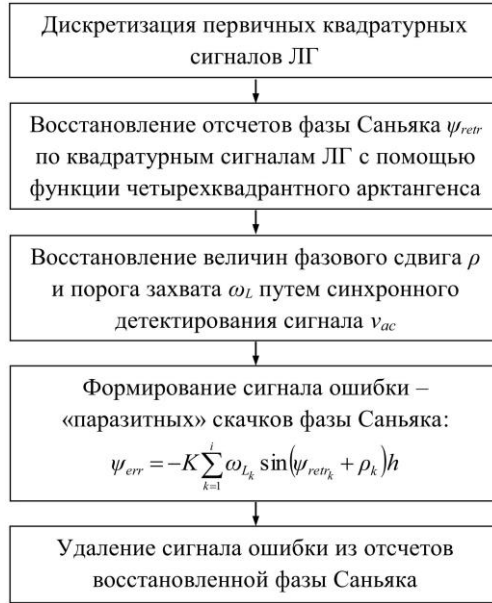


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка в выходном сигнале ЛГ (h – шаг интегрирования)

В данной работе в качестве ФНЧ используется двухсекционный эллиптический фильтр с бесконечной импульсной характеристикой со следующими параметрами: частота среза – 100 Гц; частота заграждения – 200 Гц; уровень допустимых пульсаций в полосе пропускания – 1 дБ; уровень затухания в полосе подавления – 60 дБ.

Компенсация динамического захвата в выходном сигнале ЛГ выполняется на заключительном этапе алгоритма, когда сформированный сигнал ошибки ψ_{err} , вызванной слабой связью встречных оптических волн, удаляется из отсчетов восстановленной фазы Саньяка [21]:

$$(9) \quad \psi_0 = \psi_{retr} - \psi_{err}.$$

С целью подавления гармонической частотной подставки в отсчетах угловой скорости применен режекторный фильтр со следующими параметрами: центральная частота – 400 Гц; поло-

са подавления – 40 Гц; переходная область – 20 Гц; коэффициент подавления – 60 дБ.

4. Результаты математического моделирования

Даже в случае 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). В данной работе с целью компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка применяется метод МФСК, в результате угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ восстанавливается более корректно.

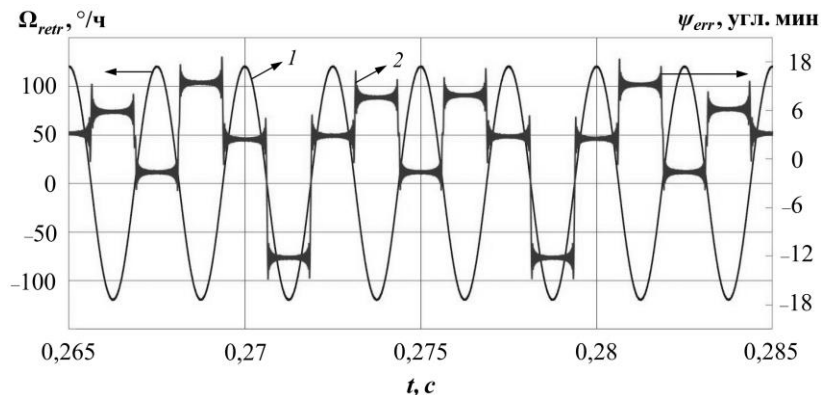


Рис. 3. Восстановленная угловая скорость ЛГ (без фильтрации колебаний гармонической частотной подставки и без коррекции динамического захвата) – кривая 1; «паразитные» скачки фазы Саньяка – кривая 2

При численном решении дифференциального уравнения (3) были сформированы тестовые первичные сигналы ЛГ, которые впоследствии обрабатывались методом МФСК. В указанном методе модуляция гармонической частотной подставки псевдослучайным сигналом не производилась. С целью приближения к условиям реального эксперимента к сформированным «идеаль-

ным» квадратурным сигналам и к сигналу переменной составляющей суммы мощностных сигналов добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ – отношение сигнал/шум). Численные эксперименты проводились со следующими начальными условиями: $\omega_L = 0,01$ °/с; $\omega_d = 120$ °/с; $f = 400$ Гц; $\rho = 0,1$ рад; $A_1 = A_2 = 1$ В; $r_1 = r_2 = 5,69 \cdot 10^{-8}$ отн. ед.; $\beta_1 = -1$ рад; $\beta_2 = 1$ рад; $\Omega_{const} = 12$ °/ч; $f_s = 2,4$ МГц – частота дискретизации первичных квадратурных сигналов; $f_{out} = 2,4$ кГц – частота обновления выходной информации; $t_{max} = 1001$ с – максимальное время моделирования; $L = 0,28$ м – периметр четырехзеркального кольцевого резонатора; $\lambda = 632,8$ нм – длина волны излучения гелий-неонового лазера. После компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка гармоническая частотная подставка удалялась из отсчетов угловой скорости, восстановленной на частоте 2,4 кГц. Далее происходило осреднение мгновенных значений измеренной угловой скорости вращения ЛГ на трех временных интервалах: $t_{av} = 1$ с; $t_{av} = 10$ с и $t_{av} = 100$ с (t_{av} – время осреднения).

Исследование метода МФСК осуществлялось на базе трех серий численных экспериментов. В первой серии экспериментов последовательно были выполнены следующие действия:

1. Моделирование «идеальных» сигналов ЛГ, т.е. квадратурных сигналов (U_c , U_s – «косинусный» и «синусный» соответственно) с амплитудой 1 В и усиленного до ± 1 В сигнала переменной составляющей суммы мощностных сигналов (v_{ac}).

2. Цифровая обработка «идеальных» сигналов U_c , U_s , v_{ac} методом МФСК.

3. Моделирование сигналов U_c , U_s , v_{ac} , каждый из которых имеет амплитуду 1 В, с добавлением квазибелого шума в указанные сигналы ($SNR = 50$ дБ).

4. Цифровая обработка «неидеальных» сигналов U_c , U_s , v_{ac} методом МФСК.

Выяснено, что при работе с «идеальными» сигналами U_c , U_s , v_{ac} формирование сигнала ошибки ψ_{err} , которая вызвана связью встречных оптических волн, определяется точностью восстановления двух величин: статического порога захвата $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$ °/с и фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (10,00 \pm 0,09) \cdot 10^{-2}$ рад [16]. В случае работы с

«неидеальными» сигналами U_c, U_s, v_{ac} на формирование сигнала ошибки, наряду с указанной выше точностью восстановления величин ρ и ω_L , влияние оказывает квазибелый шум, добавляемый к моделируемым сигналам. В таблице 1 представлены ошибки измерений угловой скорости ЛГ, рассчитанные как $\Delta\Omega = \langle |\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \rangle \pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|)$, где $\Omega_{\text{МФСК}}$ – угловая скорость, восстановленная по методу МФСК; Ω_0 – измеренная угловая скорость, найденная в результате аналитического решения дифференциального уравнения, описывающего быстроту изменения фазы Саньяка для ЛГ с нулевой зоной захвата (см. уравнение (3)) [13]. Установлено, что квазибелый шум является причиной фазовой ошибки в сигнале $\Omega_{\text{МФСК}}$ в сравнении с эталонным сигналом Ω_0 . Наибольшее значение фазовой ошибки составляет $5 \cdot 10^{-3}$ рад $\approx 0,29^\circ$. Фазовая ошибка между исследуемым ($\Omega_{\text{МФСК}}$) и эталонным (Ω_0) сигналами – это разность фаз, которая возникает между этими сигналами. В данной работе фазовые ошибки определяются после вычета частотной подставки из отсчетов восстановленной угловой скорости ЛГ (до процедуры осреднения).

Таблица 1. Ошибки измерений угловой скорости ЛГ

«Идеальные» сигналы U_c, U_s, v_{ac}	Сигналы U_c, U_s, v_{ac} с добавлением шума
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч	
$(8 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-4}$
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч	
$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$(9 \pm 6) \cdot 10^{-5}$
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч	
$(8,0 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$

По данным таблицы 1 построены две зависимости. Линиями 1 и 2 на рис. 4 изображены области разброса значений измеренной угловой скорости ($\pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|)$) относительно значений средней абсолютной ошибки ($\langle |\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \rangle$), обозначенных графическими символами 3, 4. Более узкая область разброса угловых скоростей наблюдается при работе с

«идеальными» сигналами U_c , U_s , v_{ac} во временном интервале от 1 с до 100 с. Установлено, что квазибелый шум не вносит значительных ошибок в измерение угловой скорости вращения ЛГ методом МФСК: при $t_{av} = 100$ с полученные значения средней абсолютной ошибки восстановленной угловой скорости в случае работы с «идеальными» и «неидеальными» сигналами совпадают, при этом разброс значений угловой скорости при добавлении шума увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

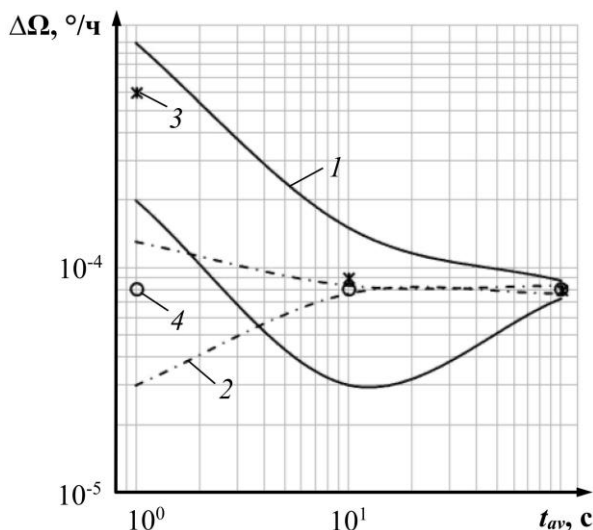


Рис. 4. Ошибки измерений угловой скорости ЛГ:
 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно; 3, 4 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно

План действий второй серии численных экспериментов представлен ниже:

1. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,5 В с шагом 0,1 В, при этом амплитуды сигналов U_s , v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

2. Цифровая обработка описанных в п. 1 сигналов методом МФСК.

3. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,5 В с шагом 0,1 В, при этом амплитуды сигналов U_s, v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ).

4. Цифровая обработка описанных в п. 3 сигналов методом МФСК.

Результаты, полученные в ходе второй серии экспериментов, представлены в таблице 2. При увеличении амплитуды «косинусного» сигнала на 50% по сравнению с амплитудой «синусного» сигнала наблюдается некорректное восстановление величины фазового сдвига $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (15,0 \pm 0,14) \cdot 10^{-2}$ рад, при этом параметр статического захвата восстанавливается с такой же точностью, как и в первой серии численных экспериментов $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$ %/с. Максимальное значение фазовой ошибки в сигнале $\Omega_{\text{МФСК}}$ в сравнении с эталонным сигналом Ω_0 составляет 0,9 рад $\approx 51,6^\circ$.

Из рис. 5 видно, что абсолютная ошибка измеренной угловой скорости ЛГ пропорционально возрастает с увеличением амплитуды «косинусного» сигнала, при этом, начиная с $U_{c,m} = 1,1$ В, рассчитанные значения указанной ошибки для «идеальных» и «неидеальных» сигналов ЛГ совпадают.

Согласно результатам второй серии экспериментов при $t_{av} = 100$ с изменение амплитуды «неидеального» «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,1 В приводит к росту $\Delta\Omega$ примерно в 14 раз. При дальнейшем увеличении амплитуды «косинусного» сигнала с шагом 0,1 В до значения 1,5 В абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости возрастает приблизительно в 5 раз, а разброс значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 6). Следовательно, разность амплитуд первичных квадратурных сигналов ЛГ оказывает на погрешность измерения угловой скорости ($\Delta\Omega$) большее влияние, чем наличие шумов в указанных сигналах. С целью минимизации $\Delta\Omega$ требуется введение обязательной нормировки амплитуд квадратурных сигналов.

Таблица 2. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ

Амплитуда «косинусного» сигнала	«Идеальные» сигналы U_c, U_s, v_{ac}	Сигналы U_c, U_s, v_{ac} с добавлением шума
$U_{c,m} = 1,1 \text{ В}$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-3}$	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,2 \text{ В}$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(2,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$	$(2,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(2,2 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$	$(2,2 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,3 \text{ В}$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(1,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-2}$	$(1,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(4,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-3}$	$(4,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(3,0 \pm 0,27) \cdot 10^{-3}$	$(3,0 \pm 0,27) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,4 \text{ В}$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(2,3 \pm 1,8) \cdot 10^{-2}$	$(2,3 \pm 1,8) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,5 \text{ В}$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(2,8 \pm 2,2) \cdot 10^{-2}$	$(2,8 \pm 2,2) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-3}$	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100 \text{ с, } ^\circ/\text{ч}$	
	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$

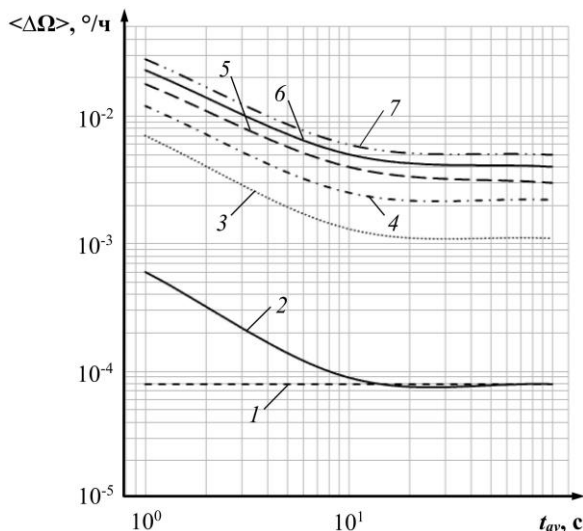


Рис. 5. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ($U_{c,m} = 1 \text{ В}$) соответственно; 3, 4, 5, 6, 7 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами с последовательным изменением амплитуды «косинусного» сигнала $U_{c,m} = 1,1 \text{ В}$, $U_{c,m} = 1,2 \text{ В}$, $U_{c,m} = 1,3 \text{ В}$, $U_{c,m} = 1,4 \text{ В}$, $U_{c,m} = 1,5 \text{ В}$ соответственно

Корректная работа метода МФСК реализуется только в условиях равенства амплитуд и фаз мощностных и информационных сигналов ЛГ. В реальном эксперименте мгновенное значение амплитуды сигнала v_{ac} в 100 раз меньше мгновенной амплитуды «косинусного» или «синусного» сигнала. Разработка и изготовление фотоусилителей для мощностных сигналов с такими большими коэффициентами усиления и одинаковыми ФЧХ являются нетривиальной задачей.

На базе построенной математической модели ЛГ проводились исследования чувствительности метода МФСК не только к добавлению шума в сигналы U_c , U_s , v_{ac} , изменению амплитуд

квадратурных сигналов, но и к сдвигу фаз между первичными сигналами и сигналом v_{ac} .

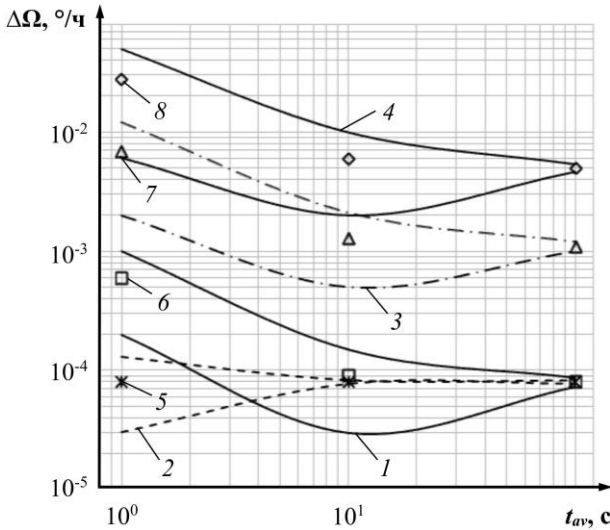


Рис. 6. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами ($U_{c,m} = 1 \text{ В}$) соответственно; 3, 4 – разброс значений измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для $U_{c,m} = 1,1 \text{ В}$ и $U_{c,m} = 1,5 \text{ В}$ соответственно; 5, 6 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ($U_{c,m} = 1 \text{ В}$) соответственно; 7, 8 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для $U_{c,m} = 1,1 \text{ В}$ и $U_{c,m} = 1,5 \text{ В}$ соответственно

В третьей серии численных экспериментов использовался следующий план действий:

1. Сдвиг сигналов U_c, U_s относительно сигнала v_{ac} на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) влево, т.е. квадратурные сигналы опережают по фазе сигнал переменной

составляющей суммы мощностных сигналов, при этом амплитуды сигналов U_c , U_s , v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

2. Цифровая обработка описанных в п. 1 сигналов методом МФСК.

3. Сдвиг сигналов U_c , U_s относительно сигнала v_{ac} на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) влево, при этом амплитуды сигналов U_c , U_s , v_{ac} равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ($SNR = 50$ дБ).

4. Цифровая обработка описанных в п. 3 сигналов методом МФСК.

Один отсчет, на который осуществляется сдвиг сигналов U_c , U_s относительно сигнала v_{ac} на частоте первичного сигнала 0,2 МГц, соответствующей максимальной амплитуде подставки, приближенно равен 0,6 рад (см. таблицу 3). Установлено, что порядок величины $\Delta\Omega$ не изменяется при сдвиге квадратурных сигналов относительно сигнала v_{ac} , начиная с двух отсчетов, независимо от наличия шума.

Таблица 3. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ

Количество отсчетов	«Идеальные» сигналы U_c , U_s , v_{ac}	Сигналы U_c , U_s , v_{ac} с добавлением шума
1 отсч \approx $\approx 0,6$ рад $\approx 34^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(5,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$	$(5,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(5,00 \pm 0,024) \cdot 10^{-3}$	$(5,00 \pm 0,028) \cdot 10^{-3}$
2 отсч \approx $\approx 1,2$ рад $\approx 69^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(1,70 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(1,70 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(1,700 \pm 0,009) \cdot 10^{-2}$	$(1,700 \pm 0,009) \cdot 10^{-2}$

Таблица 3 (продолжение)

5 отсч \approx ≈ 3 рад $\approx 172^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(7\pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(7\pm 5) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(7,0 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$	$(7,0 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(7,00 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	$(7,00 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$
8 отсч \approx $\approx 4,8$ рад $\approx 275^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(6,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$	$(6,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(6,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(6,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
10 отсч \approx ≈ 6 рад $\approx 344^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4,00 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$
12 отсч \approx $\approx 7,2$ рад $\approx 413^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$	$(4,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$	
	$(4,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$

Неправильное восстановление порога захвата происходит при сдвиге сигналов U_c , U_s относительно сигнала v_{ac} на 5, 8, 10 и 12 отсчетов (с добавлением или без добавления шума):

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,70 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (5 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,20 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (8 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (1,70 \pm 0,012) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (10 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,90 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{с} \text{ (12 отсчетов).}$$

Некорректное восстановление ρ наблюдается при сдвиге рассматриваемых сигналов на 5 и 8 отсчетов независимо от добавления квазибелого шума:

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,004) \text{ рад (5 отсчетов);}$$

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,005) \text{ рад (8 отсчетов).}$$

Из рис. 7 видно, что абсолютная ошибка измеренной угловой скорости максимальна при сдвиге фаз квадратурных сигналов на 3 рад (5 отсчетов) относительно фазы сигнала v_{ac} , т.е. рассчитанные значения указанной ошибки не находятся в прямой зависимости от значений разности фаз (количество отсчетов). Начиная с двух отсчетов, значения $\Delta\Omega$ при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ЛГ совпадают.

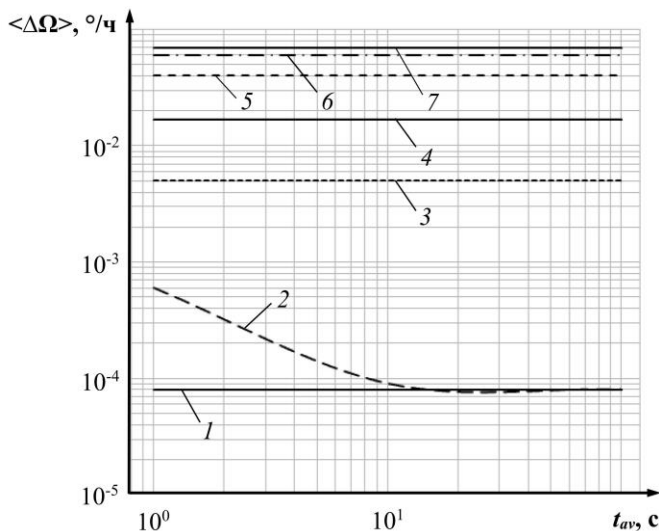


Рис. 7. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 3, 4, 5, 6, 7 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами с учетом увеличения сдвига фаз между сигналами U_c , U_s и v_{ac} на указанное в скобках число отсчетов соответственно (1, 2, 12 (10), 8, 5 отсчетов)

Согласно результатам третьей серии численных экспериментов при $t_{av} = 100$ с сдвиг фаз между «неидеальными» сигналами

лами U_c , U_s и v_{ac} на 0,6 рад (1 отсчет) приводит к увеличению абсолютной ошибки измеренной угловой скорости вращения ЛГ примерно в 63 раза, а разброса значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 8).

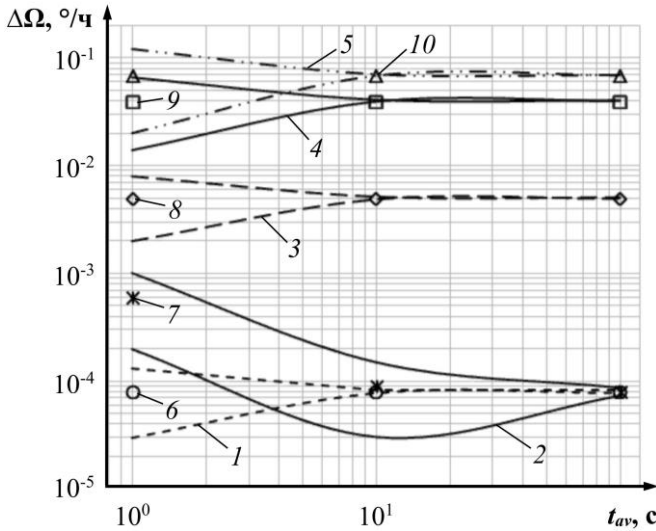


Рис. 8. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 3, 4, 5 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно; 6, 7 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 8, 9, 10 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно

При сдвиге исследуемых сигналов на 3 рад (5 отсчетов) абсолютная ошибка возрастает в 875 раз, а разброс ее значений – в 57 раз; при сдвиге на 7,2 рад (12 отсчетов) абсолютная ошибка увеличивается в 500 раз, а разброс значений – приблизительно в 29 раз. Следовательно, точность измерения угловой скорости методом МФСК не хуже чем $5 \cdot 10^{-3}$ °/ч при $t_{av} = 100$ с достигается, если разность фаз между квадратурными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

Корректная работа метода МФСК реализуется только в случае предварительной нормировки первичных сигналов ЛГ по амплитуде и фазе. Например, для этой цели можно использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с аппроксимацией первичных сигналов полиномиальным уравнением второго порядка [6, 20, 24].

5. Заключение

Метод МФСК имеет малую чувствительность к наличию квазиглобального шума в первичных квадратурных сигналах и сигнале переменной составляющей суммы мощностных сигналов ЛГ: средняя абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости вращения корпуса ЛГ не изменяется, однако разброс ее значений увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

Изменение разности амплитуд квадратурных сигналов ЛГ на 10% приводит к резкому – в 14 раз – увеличению ошибки измерений угловой скорости.

На интервале осреднения 100 с точность измерения угловой скорости методом МФСК 10^{-3} °/ч, требуемая для построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем четвертого поколения, достигается, если разность фаз между информационными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

Следовательно, корректная работа метода МФСК реализуется только в случае предварительной нормировки первичных квадратурных сигналов ЛГ по амплитуде и фазе. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с аппроксимацией первичных сигна-

лов ЛГ полиномиальным уравнением второго порядка [6, 20, 24].

Литература

1. АЗАРОВА В.В., ГОЛЯЕВ Ю.Д., КУЗНЕЦОВ Е.В. *Оптические технологии производства лазерных зеркал, разработанные в НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха* // Инновационные технологии, в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием, 5–12 апреля 2021. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет. – 2021. – Т. 1. – С. 194–197.
2. АЗАРОВА В.В., ИЩЕНКО П.И., КУЛАГИН А.В. и др. *Особенности получения высокоотражающих интерференционных лазерных зеркал* // XI международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, 26–28 января 2022. – М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – 2022. – С. 187–188.
3. БЕССОНОВ А.С. *Виртуальная модель квадратурных сигналов лазерного гироскопа* // Измерение, контроль, информатизация: материалы XX Международной научно-технической конференции, 23 мая 2019. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 2019. – С. 15–18.
4. БОЛОТНОВ А.С. *Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах* // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – №10(39). – С. 1–9.
5. ВАРЕНИК А.И., КУДРЯВЦЕВ А.С., САВЕЛЬЕВ И.И. *Способ десинхронизации динамических зон на частотной характеристике лазерного гироскопа* // Патент Российской Федерации № 2724306 С1. – 2020. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43903354> (дата обращения 17.12.2023).
6. ВИТЯЗЕВ С.В., ВАЛУЙСКИЙ Д.В., МИШИН В.Ю. и др. *Определение фазы Саньяка в цифровом лазерном гироскопе*

- при применении DSP процессора // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2021. – №1(32). – С. 22–37.*
7. ДАНИЛОВ А.С., АЗАРОВА В.В. *Методы защиты зеркал лазерных гироскопов от воздействия тлеющего разряда // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2022»): сборник докладов конференции, 5–10 декабря 2022. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет. – 2022. – С. 102–113.*
 8. КРЕМЕР В.И., ОСИПОВ А.М., ПОЛИКОВСКИЙ Е.Ф. *Компенсация погрешностей лазерного гироскопа, вызываемых действием вибрационной частотной подставки // Гироскопия и навигация. – 2001. – №1(32). – С. 14–19.*
 9. ПЕТРУХИН Е.А., СИНЕЛЬНИКОВ А.О., ХОХЛОВ И.Н. *Способ измерения порога статического захвата в лазерном датчике угловой скорости // Патент Российской Федерации № 2762951 С1. – 2021. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47488527> (дата обращения 20.12.2023).*
 10. СЕРЕБРЯКОВ А.Е., ТЕПЦОВ Д.Б., ВИТЯЗЕВ С.В. и др. *Алгоритм вычисления фазы Саньяка по квадратурным сигналам кольцевого лазера // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2023): доклады XXV Международной конференции, 29–31 марта 2023. – М: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. – 2023. – С. 106–109.*
 11. ЧИРКИН М.В., СЕРЕБРЯКОВ А.Е., ИВАНЕНКО Ю.Р. и др. *Компенсация динамического захвата в кольцевом лазерном гироскопе // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2022. – №3(38). – С. 12–27.*
 12. ALEKSEEV S.YU., MOROZOV D.A., BORISOV M.V. et al. *Technological aspects of precision ring laser production: synchronization threshold measurements in manufacture and operation // Proc. of the 19th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2012), 28–30 May 2012. – Saint Petersburg, 2012. – P. 54–56.*
 13. ARONOWITZ F. *Fundamentals of the ring laser gyro // Optical gyros and their application. – 1999. – P. 3–45.*

14. CHESNOKOV G.I., POLIKOVSKY E.F., MOLCHANOV A.V. et al. *Some ways of improving the technical and operational characteristics of strapdown inertial navigation systems* // Proc. of the 10th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2003), 26–28 May 2003. – Saint Petersburg, 2003. – P. 277–285.
15. CHIRKIN M.V., MISHIN V.Y., MOROZOV D.A., GOLOVAN A.A. et al. *Filtering output signals of a laser gyro triad* // Proc. of the 21st Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2014), 26–28 May 2014. – Saint Petersburg, 2014. – P. 388–390.
16. CHIRKIN M.V., MISHIN V.YU., SEREBRYAKOV A.E. et al. *Suppression of laser gyroscope random error without dithering* // Proc. of the 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS–2023), 29–31 May 2023. – Saint Petersburg, 2023. – P. 225–228.
17. CHOI W.-S., SHIM K.-M., CHONG K.-H. et al. *Sagnac effect compensations and locked states in a ring laser gyroscope* // Sensors (Basel). – 2023. – No. 23(3). – 1718 p.
18. EFIMOV B.V., KREMER V.I., MOLCHANOV A.V. et al. *Compensation of random drift of a laser gyroscope* // Proc. of the 8th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2001), 28–30 May 2001. – Saint Petersburg, 2001. – P. 113–114.
19. FYODOROV A.E., ZBOROVSKY V.A., REKUNOV D.A. *Estimation of RLG resonator accuracy parameters in the process of production* // Proc. of the 21st Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2014), 28–30 May 2014. – Saint Petersburg, 2014. – P. 303–311.
20. GOLOVAN A.A., MISHIN V.YU., MOLCHANOV A.V., CHIRKIN M.V. *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, No. 4. – P. 627–638.

21. JAE-CHEUL LEE, HYUN-JU CHO, HO-SOON YANG. *Zero lock-in implementation by phase wrapping/unwrapping in a ring laser gyroscope* // Applied Optics. – 2021. – Vol. 60, No. 34. – P. 10529–10538.
22. KHOKHLOV I., SINELNIKOV A. *A method for measuring the lock-in zone in laser gyro sensors* // Proc. of the 28th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS 2021), 31 May – 2 June 2021. – Saint Petersburg, 2021. – P. 1–3.
23. KUZNETSOV A.G., MOLCHANOV A.V., CHIRKIN M.V. et al. *Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation* // Quantum electronics. – 2015. – Vol. 45, No. 1. – P. 78–88.
24. MOLCHANOV A.V., BELOKUROV V.A., CHIRKIN M.V. et al. *The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes* // Proc. of the 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS–2016), 30 May – 1 June 2016. – Saint Petersburg: eedings. – 2016. – P. 120–122.
25. PETRUKHIN E.A., BESSONOV A.S. *A model for the formation of complex coupling coefficients in a ring resonator of a laser gyroscope* // Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 52, No. 4. – P. 391–401.
26. PETRUKHIN E.A., BESSONOV A.S. *Setup for measuring complex coupling parameters in laser gyro ring cavity* // Proc. of the 27th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2020), 25–27 May 2020. – Saint Petersburg, 2020. – P. 1–3.
27. SIN-WOO SONG, JA-CHEUL LEE, SUK-KYO HONG et al. *New random walk reduction algorithm in ring laser gyroscopes* // Journal of Optics. – 2010. – Vol. 12. – P. 115501–115509.

SENSITIVITY OF DIGITAL PROCESSING METHOD FOR LASER GYROSCOPE PRIMARY SIGNALS TO INPUT PERTURBATIONS

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

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

Andrey Serebryakov, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Candidate of Technical Sciences, assistant professor (sea89s@yandex.ru).

Valery Mishin, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Candidate of Technical Sciences, assistant professor (mishvalera@yandex.ru).

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

Abstract. The mathematical model for laser gyroscope primary signals that includes coupling between counter-propagating optical waves, mechanical rotation of laser gyroscope body and additive noise is formed. The sensitivity of the method to calculate the instantaneous Sagnac phase with compensation for dynamic lock-in to input perturbations is studied on the basis of laser gyroscope having the harmonic dither unnoised. To analyze the method to calculate the instantaneous Sagnac phase with compensation for dynamic lock-in, the results obtained are compared with the angular rate being the analytical solution of differential equation for laser gyroscope with zero lock-in zone. Phase errors between a test signal and a reference signal of angular rotation rate of laser gyroscope are recorded. The effect of quasi-white noise, changes in primary signal amplitudes and phase shift between quadrature signals and the signal being the alternating component of power signal sum is determined on the registered counts of angular rotation rate of laser gyroscope body.

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

УДК 629.7

ББК 39.56

DOI: 10.25728/ubs.2024.109.11

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Б.Р. Андриевским.

Поступила в редакцию 29.01.2024.

Опубликована 31.05.2024.