

УДК 621.373.826

## КОМПЕНСАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАХВАТА В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

Георгий Витальевич ДАВЫДОВ<sup>1</sup>,

Юлия Романовна ИВАНЕНКО<sup>1</sup>,

Валерий Юрьевич МИШИН<sup>1</sup>, к. т. н.

Алексей Владимирович МОЛЧАНОВ<sup>2</sup>, к. т. н., доцент,

Андрей Евгеньевич СЕРЕБРЯКОВ<sup>1</sup>, к. т. н.,

Михаил Викторович ЧИРКИН<sup>1</sup>, д. ф-м. н., профессор

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»,

<sup>2</sup> ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»

E-mail: inbox@aomiea.ru

*Статья содержит описание математической модели первичных сигналов лазерного гироскопа с учетом связи встречных волн, угловой скорости вращения и аддитивного шума в квадратурных сигналах. Рассмотрена возможность применения метода обработки первичных сигналов, позволяющего компенсировать влияние динамического захвата. Проанализирован случай использования синусоидальной вибрационной частотной подставки без ошумления. Представленные результаты моделирования позволяют: сравнить различные методы обработки первичных квадратурных сигналов, сопоставить способы задания вибрационной частотной подставки, оценить реализуемость и эффективность нового подхода.*

**Ключевые слова:** *лазерный гироскоп, динамическая зона захвата, вибрационная частотная подставка, фаза Саньяка, вариация Аллана, режекторный фильтр.*

## DYNAMIC LOCK-IN COMPENSATION IN A RING LASER GYRO

Georgy V. DAVYDOV<sup>1</sup>,  
Yuliya R. IVANENKO<sup>1</sup>,  
Valery Yu. MISHIN<sup>1</sup>, PhD in Engineering,  
Alexey V. MOLCHANOV<sup>2</sup>, PhD in Engineering,  
Andrey E. SEREBRYAKOV<sup>1</sup>, PhD in Engineering,  
Mikhail V. CHIRKIN<sup>1</sup>, chancellor, D. Sc.in Physics and Mathematics, professor  
<sup>1</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
<sup>2</sup> 'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC  
E-mail: inbox@aomiea.ru

*The article describes a mathematical model of the laser gyro primary signals, with consideration to coupling of counter-propagating waves, angular rate and additive noise in quadrature signals. The possibility of using the primary signals processing method to compensate the influence of dynamic lock-in is considered. The case of using a sinusoidal mechanical dither without noise is analyzed. The presented simulation results allow: to compare different methods of primary quadrature signals processing, to compare methods of setting the mechanical dither, to assess the feasibility and effectiveness of the new approach.*

**Keywords:** laser gyro, dynamic lock-in, mechanical dither, Sagnac phase, Allan variance, notch filter.

## Введение

В современной авиационной технике гироскопы на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров находят широкое применение в бесплатформенных инерциальных системах навигации [1–2]. Слабая связь генерируемых кольцевым лазером встречных волн приводит к методической погрешности в измерении угловой скорости, которая, в частности, проявляется в отсутствии чувствительности лазерного гироскопа к медленному вращению. Способы подавления этой погрешности достаточно хорошо проработаны и успешно представлены рядом технических решений [3–13], разделяющихся на технологические [4, 7–8], производственные [5–6, 9–10] и аппаратно-алгоритмические [11–13, 17–18]. Как правило, в конкретных технических приложениях используется комбинация из нескольких решений.

Аппаратно-алгоритмические решения являются наименее затратными, а, следовательно, наиболее предпочтительными в условиях серийного производства, так как не затрагивают отлаженных технологических процессов. Цель настоящей работы — оценка возможности использования оригинального решения, представленного в работах [11–12], которое позволяет с помощью цифровой обработки квадратурных сигналов с выхода смесительной призмы кольцевого лазера и специального алгоритма компенсировать влияние связи встречных волн в кольцевом резонаторе на зарегистрированные отсчеты угловой скорости.

Исследования выполнены методом математического моделирования лазерного гироскопа со знакопеременной частотной подставкой. Модель описывает:

- формирование разности фаз встречных волн, генерируемых кольцевым лазером (фазы Саньяка) [2–3],
- выделение информации о фазе Саньяка с помощью либо аппроксимации эллипсом последовательности пар отсчетов оцифрованных квадратурных сигналов [13–15], либо реверсивного счета импульсов [16],
- компенсацию влияния связи встречных волн на фазу Саньяка [11–12],
- удаление из отсчетов угловой скорости частотной подставки с помощью узкополосного режекторного фильтра.

Статья содержит описание математической модели первичных сигналов лазерного гироскопа, учитывающей связь встречных волн и угловую скорость вращения, а также аддитивный шум в квадратурных сигналах.

Представленные результаты моделирования позволяют: сравнить различные методы обработки первичных квадратурных сигналов, сопоставить различные методы задания вибрационной частотной подставки. В заключение приводятся выводы о реализуемости и эффективности рассмотренного алгоритма, а также о необходимости будущих работ.

### Математическая модель первичных сигналов лазерного гироскопа

В результате рассеяния лазерного излучения на шероховатостях зеркал, существует слабая связь между генерируемыми волнами, которая приводит к их синхронизации и, как следствие, к нечувствительности гироскопа к малым угловым скоростям вращения. Для устранения данного эффекта используются различные методы смещения из области около нулевых угловых скоростей [16, 22–24], один из которых — механическая вибрационная частотная подставка: кольцевой резонатор совершает колебания относительно корпуса на резонансной частоте виброподвеса с амплитудой колебаний, изменяющейся по случайному закону [20–21]. Ошумление колебаний устраняет эффект динамического захвата, однако усложняет схемотехническое исполнение устройства частотной подставки и вызывает появление дополнительной случайной составляющей в отсчетах угловой скорости. Развитие цифровых методов создает предпосылку для отказа от ошумления при компенсации влияния динамической зоны захвата на выходной сигнал лазерного гироскопа.

На выходе кольцевого лазера формируются квадратурные сигналы:

$$U_{\cos}(t) = U_{\cos,0} + U_{\cos,m} \cos(\psi + \varphi_c), \quad U_{\sin}(t) = U_{\sin,0} + U_{\sin,m} \sin(\psi + \varphi_s).$$

При слабой связи встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе изменения фазы Саньяка описывает дифференциальное уравнение [2]:

$$\frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} = \Omega + \omega_i(t) - \omega_L \sin(\psi + \rho), \quad (1)$$

где  $\Omega$  — постоянная угловая скорость вращения корпуса лазерного гироскопа,  $\omega_i$  — угловая скорость, с которой колеблется кольцевой лазер относительно корпуса (вибрационная частотная подставка),  $\omega_L$  и  $\rho$  — параметры статического порога захвата,  $K$  — масштабный коэффициент.

Третье слагаемое в правой части уравнения (1) отражает слабую связь встречных волн. Если кольцевой лазер совершает синусоидальные колебания, угловая скорость  $\omega_i(t)$  в уравнении (1) задается в форме:  $\omega_i(t) = \omega_d \sin(2\pi f t)$ , где:  $\omega_d$  и  $f$  — амплитуда и частота вибрационной частотной подставки соответственно.

В случае ошумленной подставки в качестве отсчетов относительной угловой скорости  $\omega_r(t)$ , с которой колеблется кольцевой лазер, можно использовать сигналы, экспериментально зарегистрированные для кольцевых лазеров с механическими вибрационными частотными подставками [14].

Дифференциальное уравнение (1) решается численным методом Рунге — Кутты четвертого порядка. Шаг, с которым строится решение, должен быть достаточно мал, чтобы избежать явления «элайзинга» (aliasing) в формируемых квадратурных сигналах. В работе [15] показано, что при решении уравнения (1) с шагом 0,2 мкс «элайзинг» отсутствует. Найденная зависимость фазы Саньяка от времени позволяет сформировать рассчитанные «идеальные» квадратурные сигналы  $U_{\cos}$  и  $U_{\sin}$ .

Основной подход, используемый до настоящего времени при расчете угловых перемещений лазерного гироскопа, заключается в процедуре реверсивного счета импульсов, сформированных на основе квадратурных сигналов (рис. 1) [16].

Процедура реверсивного счета импульсов (РСИ) включает следующие стадии:

- преобразование квадратурных сигналов в сигнал прямоугольной формы с помощью компаратора (клиппирование);
- преобразование спадающих и возрастающих участков клиппированных сигналов в импульсы счета;
- реверсивный счет импульсов в зависимости от фазового соотношения между квадратурными сигналами;
- подавление с помощью режекторного фильтра составляющей выходного сигнала, связанной с колебаниями кольцевого лазера (вибрационной подставкой).

Альтернативный подход извлечения информации об угловой скорости лазерного гироскопа развит в работах [14, 17, 18], представляет собой вычисление мгновенной фазы Саньяка (МФС) и включает следующие стадии:

- дискретизация первичных сигналов;
- аппроксимация кривой второго порядка множества точек, соответствующих первичным отсчетам на плоскости переменных  $U_{\cos}$ ,  $U_{\sin}$ ;
- определение параметров квадратурных сигналов  $U_{\cos,0}$ ,  $U_{\sin,0}$ ,  $U_{\cos,m}$ ,  $U_{\sin,m}$ ,  $\varphi_c$  и  $\varphi_s$  из аппроксимирующей кривой;
- определение разности фаз  $\psi$  встречных волн, генерируемых кольцевым лазером;
- подавление с помощью режекторного фильтра составляющей выходного сигнала, связанной с вибрационной подставкой.

Выходные данные модели представляют собой восстановленные отсчеты угловой скорости с частотой дискретизации 2400 Гц.

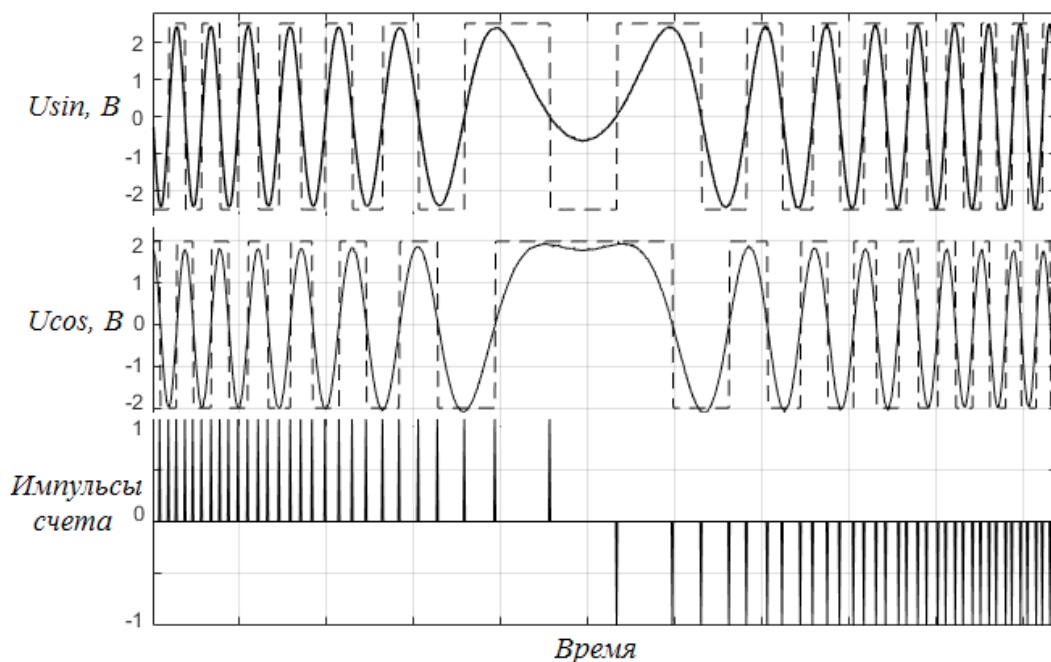


Рис. 1. Выделение импульсов счета из квадратурных сигналов лазерного гироскопа.

$U_{sin}$ ,  $U_{cos}$  — квадратурные сигналы лазерного гироскопа.  
Пунктирная кривая — сигнал на выходе компаратора

### Алгоритм компенсации порога динамического захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа

Авторы работ [11–12] предложили метод компенсации составляющей, связанной с динамическим порогом захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа. В качестве входных данных метод использует три сигнала: квадратурные сигналы  $U_{cos}$ ,  $U_{sin}$  и переменную составляющую  $vac$  суммы сигналов с фотодиодов, измеряющих мощность лазерного излучения. Метод включает следующие этапы:

- регистрация трех цифровых сигналов лазерного гироскопа  $U_{cos}$ ,  $U_{sin}$  и  $vac$ ;
- восстановление разности фаз встречных волн  $\psi$  по квадратурным сигналам;
- восстановление параметров порога захвата  $\psi_L$  и  $\rho$  путем синхронного детектирования сигнала  $vac$ ;
- формирование сигнала ошибки  $\psi_{err}$ ;
- вычитание сигнала ошибки  $\psi_{err}$  из восстановленной фазы  $\psi$ .

В результате выходной сигнал датчика очищается от случайной составляющей, связанной с явлением динамического захвата. Данный метод обработки позволяет вычислять мгновенную фазу Саньяка с компенсацией влияния динамического захвата (МФСК).

По рассчитанной разности фаз встречных волн формировались идеальные квадратурные сигналы:

$$U_s(t) = \sin(\psi), \quad U_c(t) = \cos(\psi). \quad (2)$$

Переменная составляющая сигнала, пропорциональная мощности лазерного излучения, рассчитывалась по формуле [12]:

$$vac(t) = 2A_1A_2E_0 \sin(\psi + \rho). \quad (3)$$

Параметры  $E_0$  и  $\rho$  имеют вид:

$$E_0 = \left[ \left( r_1 \frac{A_2}{A_1} \right)^2 + \left( r_2 \frac{A_1}{A_2} \right)^2 + 2r_1r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]^{0.5}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}(\rho) = \frac{r_2 \frac{A_2}{A_1} \sin(\beta_2) - r_1 \frac{A_1}{A_2} \sin(\beta_1)}{r_2 \frac{A_2}{A_1} \cos(\beta_2) + r_1 \frac{A_1}{A_2} \cos(\beta_1)},$$

где  $A_1, A_2$  – амплитуды первичных сигналов,  $r_{1,2}$  – амплитуды коэффициентов связи встречных волн,  $\beta_1, \beta_2$  – фазы коэффициентов связи встречных волн. Значения коэффициентов связи встречных волн ( $r_{1,2}$  и  $\beta_{1,2}$ ) были рассчитаны по заданным параметрам захвата  $\omega_L$  и  $\rho$ . Амплитуды первичных сигналов полагались равными 1. Параметр  $E_0$  пропорционален заданному порогу захвата  $\omega_L$ .

Для проверки алгоритма коррекции порога захвата также были рассчитаны идеальные сигналы. Аналитическое решение дифференциального уравнения (1), полученное при заданной величине  $\omega_L = 0$ :

$$\psi_{ideal} = K\Omega t - \frac{K\omega_d}{2\pi f} \cos(2\pi f t) + \frac{K\omega_d}{2\pi f}. \quad (5)$$

Эталонный сигнал ошибки  $\omega_{err\ ideal}$ , был получен путем вычитания из результата численного решения дифференциального уравнения (1) идеального сигнала  $\omega_{ideal}$ :

$$\Psi_{err\ ideal} = \Psi - \Psi_{ideal}. \quad (6)$$

По материалам работы [12] был написан алгоритм компенсации динамического порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанной программы.

Считываются массивы квадратурных сигналов  $U_{\cos}$ ,  $U_{\sin}$  и переменная составляющая  $vac$ . В блоках 1–4 по отсчетам квадратурных сигналов восстанавливается разность фаз встречных волн  $\psi$ . Восстановленная фаза  $\Phi$  (свернутая фаза) в блоке 1 содержит скачки фазы на  $2\pi$ . В блоках 2–4 выполняется коррекция скачков фазы («разворачивание» фазы).

В блоках 5–10 восстанавливается составляющая разности фаз встречных волн, связанная с порогом захвата — сигнал ошибки  $\psi_{err}$ . В блоках 5–8 выполняется демодуляция переменной составляющей мощности встречных волн  $vac$  с помощью квадратурных сигналов  $U_{\cos}$ ,  $U_{\sin}$ . В результате формируются синфазный  $I$  и квадратурный  $Q$  сигналы, которые несут в себе информацию о параметрах порога захвата

$$I \sim A_1 A_2 E_0 \cos(\rho), \quad Q \sim A_1 A_2 E_0 \sin(\rho).$$

В блоке 9 восстанавливаются мгновенные значения измеренных параметров  $\Omega_L$  и  $\rho$ . В блоке 10 рассчитывается сигнал ошибки. В блоке 11 выполняется компенсация составляющей, связанной с порогом захвата, путем вычитания из массива  $\psi$  сигнала ошибки  $\psi_{err}$ . В результате получаем фазу  $\psi_0$ . В алгоритм работы [12] внесена модификация, связанная с универсализацией процедуры вычета частотной подставки. Для удаления знакопеременной частотной подставки в алгоритм компенсации введен режекторный фильтр аналогичный используемому в методах РСИ и МФС.

Параметры фильтра:

- полоса подавления 40 Гц;
- переходная область 20 Гц;
- центральная частота 400 Гц;
- коэффициент подавления 60 Дб.

### Результаты моделирования

Использовалось соотношение (1), описывающее связь встречных волн и угловую скорость вращения на интервале времени 5400 с. Дифференциальное уравнение решалось численно методом Рунге – Кутты 4-го порядка. Были выбраны следующие параметры: периметр резонатора 28 см, амплитуда подставки, параметры захвата  $\omega_L = 0,01^\circ/\text{с}$ ,  $\rho = 0,15$  рад,  $\omega_d = 120^\circ/\text{с}$ ,  $f = 400$  Гц — амплитуда и частота гармонической вибрационной частотной подставки;  $\Omega = 12^\circ/\text{час}$  — заданная угловая скорость вращения. Частота дискретизации 5 МГц.



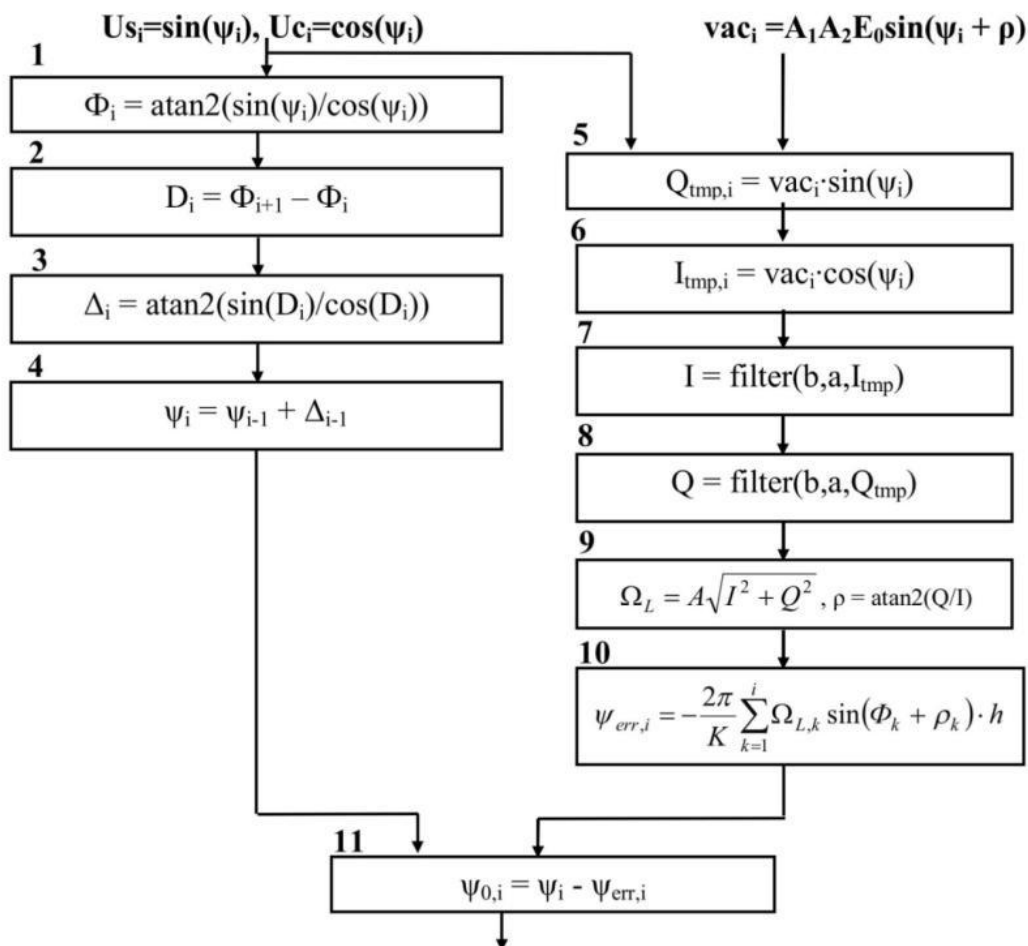


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации порога захвата в выходном сигнале лазерного гироскопа

Решение дифференциального уравнения (1) осуществлялось для двух случаев: синусоидальная вибрационная частотная подставка и синусоидальная вибрационная частотная подставка со случайным ошумлением амплитуды колебаний. По результатам решения дифференциального уравнения сформированы квадратурные сигналы (2) и переменная составляющая сигнала, пропорциональная мощности лазерного излучения (3).

К сформированным сигналам аддитивно добавлялся белый шум. Уровень шума выбирался таким образом, чтобы обеспечить отношение сигнал/шум 50 дБ.

Полученные сигналы последовательно обработаны тремя методами: методом РСИ, методом МФС и методом МФСК. Порог захвата в данном численном эксперименте принимался максимально допустимым с практической точки зрения и равным  $0,05^\circ/\text{с}$ .

Полученные результаты приведены на рисунке 3 в виде передаточных характеристик лазерного гироскопа, представляющих собой зависимость восстановленного значения угловой скорости вращения корпуса гироскопа  $\langle \Omega_{100} \rangle$ , усредненного на интервале времени 100 секунд, от заданного значения постоянной угловой скорости  $\Omega$ . Частота обновления выходных отсчетов 2400 Гц.

Кривая 3, полученная при синусоидальной частотной подставке, в области малых угловых скоростей содержит типичный участок, отражающий хорошо известное явление динамического захвата, порогом которого примерно в 60 раз меньше заданной величины статического порога захвата  $\omega_L$ . Эффект, достигнутый при помощи компенсации порога захвата с помощью алгоритма, представленного на рисунке 2, позволяет подавить явление динамического захвата, что отражает кривая 1. Для сравнения здесь же приведена передаточная характеристика, к которой приводит случайное ошумление подставки (кривая 2). Ошумление подставки также позволяет подавить динамический захват, причем по сравнению с МФСК восстановленная угловая скорость ближе к идеальной передаточной характеристике  $\langle \Omega_{100} \rangle = \Omega$ .

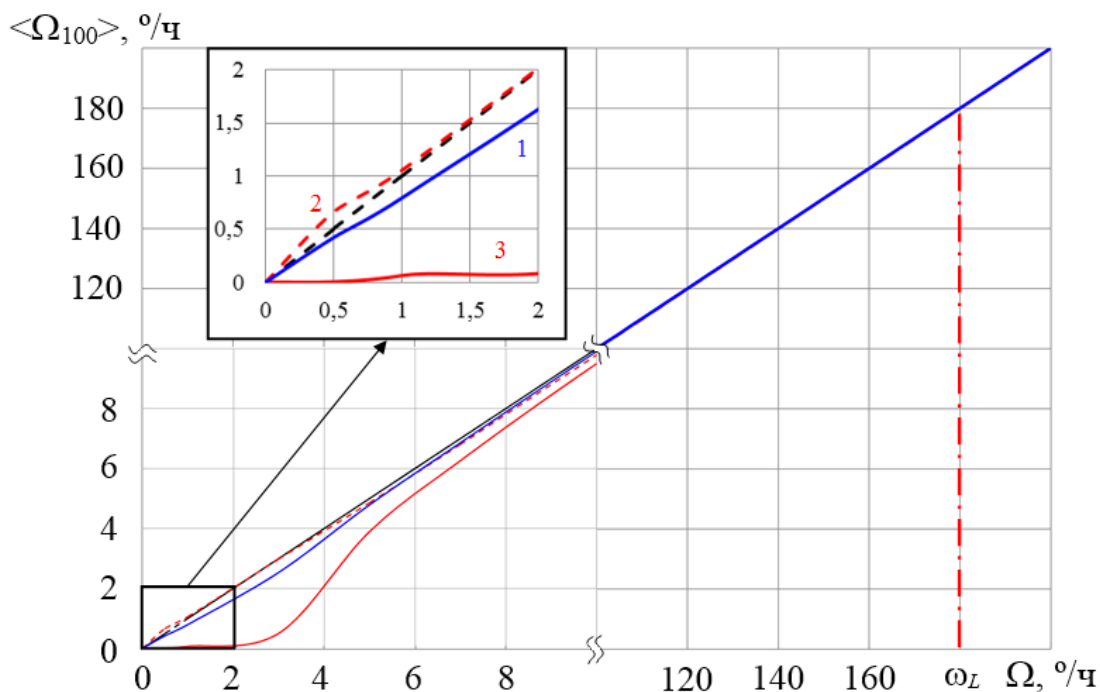


Рис. 3. Передаточная характеристика лазерного гироскопа при различных методах обработки первичных квадратурных сигналов: 1 — МФСК при синусоидальной подставке (синяя кривая), 2 — МФС при синусоидальной подставке со случайным ошумлением (красная штриховая кривая), 3 — МФС при синусоидальной подставке (красная сплошная кривая), 4 — идеальная характеристика (черная штриховая кривая)

На рисунке 4 приведены графики квадратного корня  $\sigma$  из вариации Аллана как функции времени усреднения  $T$  выходных отсчетов угловой скорости, соответствующие разным методам обработки сигналов лазерного гироскопа. Кривые для методов РСИ (сплошная кривая) и метода МФС (пунктирная кривая) — результаты обработки сигналов, соответствующих синусоидальной вибрационной частотной подставке со случайным ошумлением амплитуды колебаний.

Штрихпунктирная кривая, соответствующая методу МФСК, получена в результате решения дифференциального уравнения с синусоидальной вибрационной частотной подставкой. Порог захвата  $\omega_L$  во всех трех случаях принимался равным  $0,03^\circ/\text{с}$ , что является среднестатистической величиной для кольцевых лазеров, используемых для комплектации серийно выпускаемых БИНС. Отказ от ошумления подставки позволяет на порядок уменьшить величину  $\sigma$  для времен усреднения, превышающих 10 с. Завышенные значения  $\sigma$  для метода РСИ в случае времен усреднения менее 1 с обусловлены шумом квантования в восстановленных отсчетах угловой скорости.

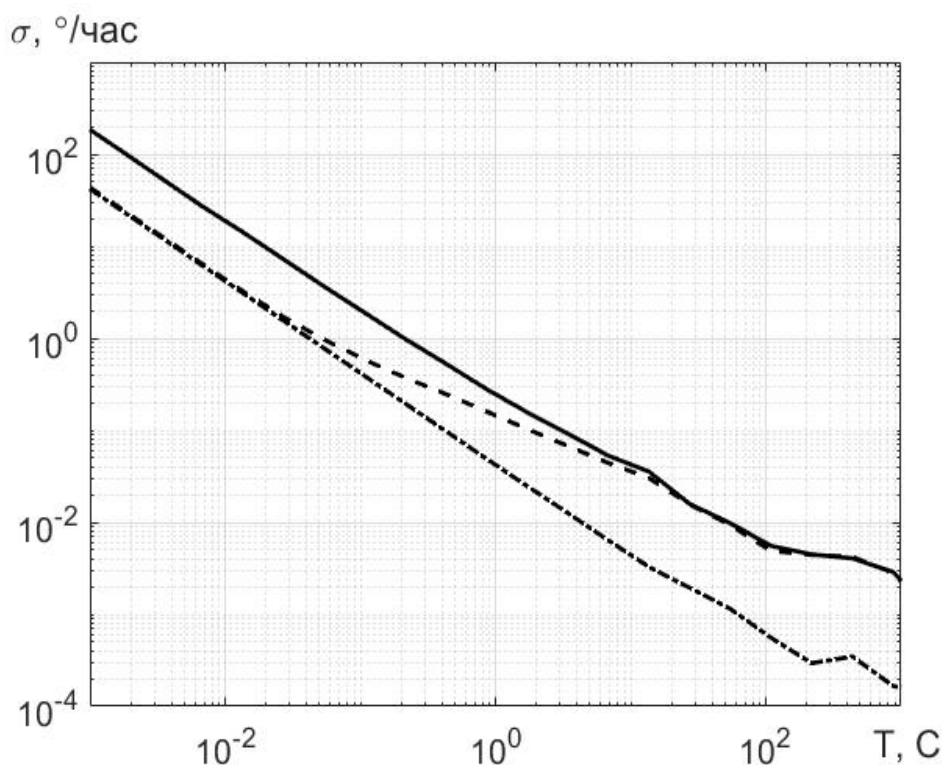


Рис. 4. Вариация Аллана при разных методах обработки сигналов. Сплошная кривая — метод РСИ для при синусоидальной подставке со случайным ошумлением, пунктирная кривая — метод МФС при синусоидальной подставке со случайным ошумлением, штрихпунктирная кривая — метод МФСК при синусоидальной подставке

На рисунке 5 построены вариации Аллана соответствующие трем методам обработки сигналов лазерного гироскопа, полученные при различных значениях порога статического захвата кольцевого лазера. Выбраны величины  $\omega_L$ :  $0,01^\circ/\text{с}$  и  $0,05^\circ/\text{с}$  как характерные предельные значения для основной массы серийно выпускаемых кольцевых лазеров с периметром резонатора 28 см.

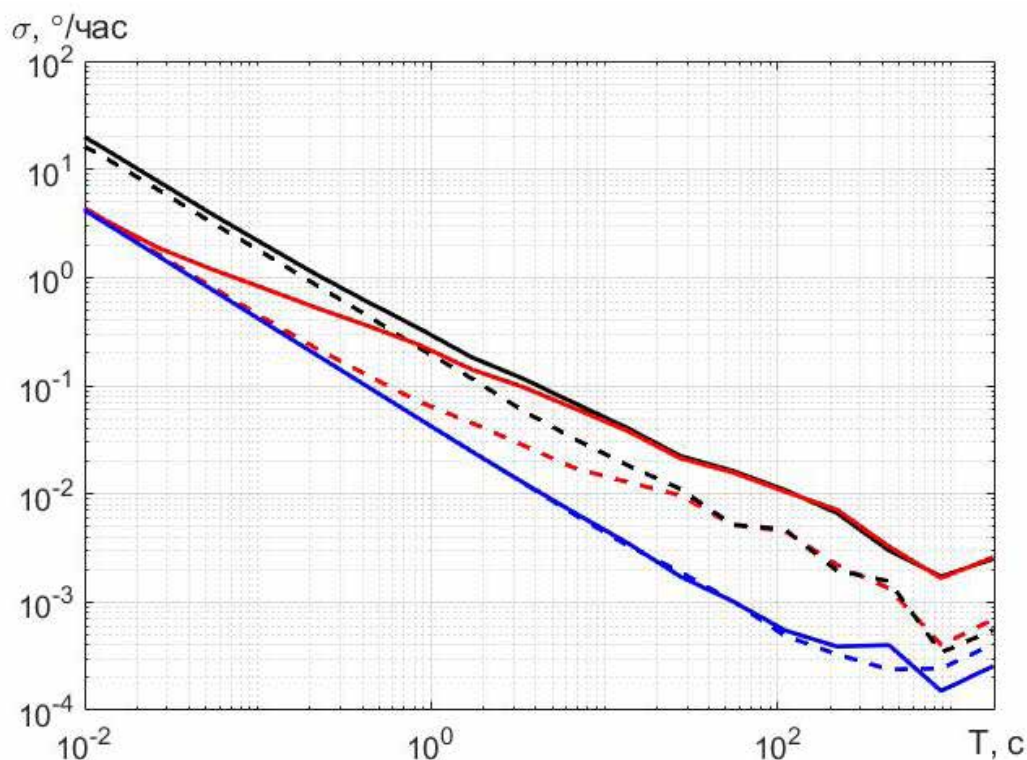


Рис. 5. Вариация Аллана при разных методах обработки сигналов и разном  $\omega_L$ .  
Метод РСИ — черный цвет, метод МФС — красный цвет,  
метод МФСК — синий цвет. Пунктирные кривые —  $\omega_L = 0,01^\circ/\text{с}$ ,  
сплошные кривые —  $\omega_L = 0,05^\circ/\text{с}$

Наибольшее влияние величины зоны захвата на вариацию Аллана наблюдается для методов РСИ и МФС на временных интервалах от десятых долей до сотен секунд. Различия указанных кривых при малых (до единиц секунд при  $\omega_L = 0,05^\circ/\text{с}$  и до 40 секунд при  $\omega_L = 0,01^\circ/\text{с}$ ) временах осреднения объясняется высоким уровнем шума квантования метода РСИ. Зависимость уровня кривых от величины зоны захвата связано с шумами, обусловленными случайным блужданием угла при ошумлении синусоидальной частотной подставки.

Метод МФСК на временных интервалах до 100 секунд стабильно независим от величины порога захвата, что демонстрирует его эффективность при заданных начальных условиях (постоянная действующая угловая скорость и синусоидальная вибрационная частотная подставка без ошумления). Расходимость результатов на временных интервалах более 300 секунд объясняются ограниченным размером исходного массива данных (5400 с).

При времени осреднения 100 с и  $\omega_L = 0,01^\circ/\text{с}$  величина квадратного корня из вариации Аллана составляет:

- для метода РСИ  $0,005^\circ/\text{час}$ ;
- для метода МФС  $0,005^\circ/\text{час}$ ;
- для метода МФСК  $0,0007^\circ/\text{час}$ .

Разница в величине вариации для методов РСИ и МФС на временных интервалах осреднения 10...100 с практически нивелируется.

### Заключение

Методом математического моделирования проведено сравнение различных методов обработки первичных квадратурных сигналов лазерного гироскопа. Рассмотрено влияние на передаточную характеристику лазерного гироскопа и вариацию Аллана методов: РСИ — реверсивного счета импульсов, МФС — вычисления мгновенной фазы Саньяка, МФСК — вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией влияния динамического захвата.

Сравнение методов обработки первичных квадратурных сигналов лазерного гироскопа проведено для двух видов вибрационной частотной подставки: синусоидальной и синусоидальной со случайным ошумлением амплитуды колебаний. Вибрационная частотная подставка со случайным ошумлением зарегистрирована экспериментально.

Для удаления частотной подставки из выходного сигнала лазерного гироскопа в метод МФСК введен режекторный фильтр, что позволило унифицировать процедуру вычета частотной подставки во всех рассмотренных в работе методах.

Показана эффективность метода МФСК в компенсации влияния динамического захвата при обработке сигналов лазерного гироскопа, полученных при заданных начальных условиях: постоянная действующая угловая скорость и синусоидальная вибрационная частотная подставка без ошумления. Отказ от ошумления подставки положительно сказывается на величине вариации Аллана. На интервале осреднения в 100 с для лазерного гироскопа с периметром 28 см и  $\omega_L = 0,01^\circ/\text{с}$  величина квадратного корня из вариации Аллана составляет  $0,0007^\circ/\text{час}$ .

Целесообразно провести дальнейшее исследование метода МФСК для других начальных условий, которые должны учитывать динамику изменения входной угловой скорости, а также реальный характер выходных сигналов лазерного гироскопа.

### Литература

1. *В. Г. Пешехонов*. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем. // Гироскопия и навигация, №1, 2011. – С. 3–16.
2. *A. G. Kuznetsov, A. V. Molchanov, M. V. Chirkin, E. A. Izmailov*. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. // Quantum electronics 45(1), pp. 78–88 (2015), doi: 10.1070 / QEL2015v045n01ABEH015420.
3. *S. Yu. Alekseev, M. V. Chirkin, V. Yu. Mishin, D. A. Morozov, M. V. Borisov, A. V. Molchanov, M. A. Zakharov*. Method of lock-in threshold measurement in manufacture and operation of ring lasers. // Gyroscopy and navigation. Vol. 4, #4, 2013, pp. 223–228, doi: 10.1134/S2075108713040020.
4. *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), 2017, pp. 675–682, doi: 10.1070/QEL16291.
5. *V. A. Petrukhin, A. S. Bessonov*. Setup for measuring complex coupling parameters in laser gyro cavity. // 27 ICINS 2020 – Proceedings, May 2020, 9133777.
6. *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.
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. *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.
10. *A. E. 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.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *A. V. Molchanov, V. A. Belokurov, M. V. Chirkin, M. B. Kagalenko, V. I. Koshelev, V. Yu. Mishin, D. A. Morozov.* The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes. // XXIII ICINS 2016 – Proceeding, SPb May 2016, pp. 120–122.
15. *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*, № 4, 2021, Vol. 60, pp. 627–638, doi: 10.1134/31064230721040043.



16. Д. П. Лукьянов, В. Я. Распопов, Ю. В. Филатов. Прикладная теория гироскопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – 316 с.
17. 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.
18. В. Ю. Мишин, А. В. Молчанов, М. В. Чиркин. Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах. // Приборы, №1 (151), 2013. – С. 33–38.
19. M. V. Chirkin, V. Yu. Mishin, D. A. Morozov, A. V. Molchanov, M. A. Zakharov. Ring laser digital signal processing in evaluation laser gyro characteristics. // XVII ICINS 2010 – Proceeding, SPb May 2010, pp. 60–62.
20. G. I. Chesnokov, E. F. Polikovskiy, A. V. Molchanov, V. I. Kremer. Some ways of improving the technical and operational characteristics of SINS. // X ICINS 2003 – Proceeding, SPb May 2003, pp. 277–285.
21. А. В. Молчанов, В. М. Суминов, М. В. Чиркин. Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа. // Авиакосмическое приборостроение, №9, 2004. – С. 12–19.
22. M. Faucheux, D. Fayoux, J. J. Roland. The ring laser gyro // J. Optics (Paris), 1988, Vol. 19, n. 3 pp. 101–115.
23. В. В. Азарова, Ю. Д. Голяев, В. Г. Дмитриев. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии. // Квантовая электроника, т. 30, №2, 2000. – С. 96–104.
24. В. В. Азарова, Ю. Д. Голяев, И. И. Савельев. Зеемановские лазерные гироскопы. // Квантовая электроника, т. 45, №2, 2015. – С. 171–179, doi: 10.1070/QEL2015v045n01ABEH015539.