УДК 531.383-11:681.7
DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069

А. М. КУРБАТОВ, Р. А. КУРБАТОВ, А. М. ГОРЯЧКИН

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ЗА СЧЕТ ПОДАВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРАХ

Приводятся результаты исследований опытного образца волоконно-оптического гироскопа класса точности 0,01–0,001°/ч. Гироскоп содержит первый контур обратной связи для компенсации разности фаз Саньяка, второй контур обратной связи для стабилизации масштабного коэффициента и третий быстродействующий контур обратной связи для компенсации влияния на измерительный тракт постоянной составляющей оптического сигнала на фотоприемнике. Для повышения точности опытного образца гироскопа до уровня 0,001°/ч предлагается использование четвертого и пятого контуров обратной связи, с помощью которых осуществляется подавление паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, закрытый контур обратной связи, зона нечувствительности, интегрально-оптический фазовый модулятор, искажения разности фаз вспомогательной фазовой модуляции, искажения ступенчатого пилообразного напряжения.

Для точной навигации, ориентации и управления движением подвижных объектов все чаще используются интерферометрические волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). ВОГ имеют целый ряд преимуществ перед механическими и кольцевыми лазерными гироскопами – например, по стоимости и энергопотреблению. Направление в области разработок высокоточных ВОГ в настоящее время успешно развивается [1–3, 44]. С момента первого экспериментального наблюдения эффекта Саньяка в волоконном кольцевом интерферометре [4] конфигурация последнего существенно изменилась. Произошло это благодаря обнаружению множественных паразитных эффектов, приводящих к регистрации ложной угловой скорости вращения. К таким эффектам в первую очередь следует отнести следующие:

1) поляризационная невзаимность [5, 6], которая привела к минимальной конфигурации кольцевого интерферометра с одним поляризатором [7] вместо нескольких, использованию излучения с низкой степенью поляризации, обладающего широким спектром, и волокон с большим линейным двулучепреломлением [8];
2) температурный дрейф угловой скорости [9], повлекший за собой необходимость применения специальной намотки волоконной катушки [10, 11], особых конструкций каркаса для нее [12–15] и специфических пропиточных компаундов, наносимых на волокно в процессе его намотки [12, 13];

Курбатов Александр Михайлович. Заместитель главного конструктора по ВОГ, Филиал ФГУП ЦЭНКИ «НИИ ПМ им. акад. В. И. Кузнецова» (Москва).
Курбатов Роман Александрович. Кандидат физико-математических наук, Филиал ФГУП ЦЭНКИ «НИИ ПМ им. акад. В. И. Кузнецова».
Горячкин Андрей Михайлович. Заместитель начальника отдела, Филиал ФГУП ЦЭНКИ «НИИ ПМ им. акад. В. И. Кузнецова».

3) белый шум выходного сигнала ВОГ, который снижается с помощью увеличения глубины вспомогательной фазовой модуляции [16, 17] или компенсации избыточных шумов источника излучения [18, 19];
4) потери в волоконной катушке, обусловленные радиацией, преодолеваемые с помощью использования радиационно-стойкого волокна для намотки катушки [20–23];
5) радиационно-наводимые потери в волоконном источнике излучения [23–26].

Со времен классических работ [4, 27] также существенно изменились методы обработки выходного сигнала кольцевого интерферометра. Основными проблемами в данном случае были следующие:

1) фундаментальная зона нечувствительности ВОГ, сниженная с помощью вспомогательной фазовой модуляции, имеющей, в частности, прямоугольную форму [16, 18, 28];
2) нелинейность выходной характеристики из-за несовершенств обрабатывающей электроники, преодоленная в конфигурации ВОГ с замкнутым контуром отрицательной обратной связи (ОС-1) [29–31];
3) нестабильность параметров интегрально-оптического фазового модулятора, используемого для замыкания контура ОС-1, дестабилизирующая масштабный коэффициент ВОГ и преодоленная введением второго контура обратной связи ОС-2 [30, 31];
4) технологическая зона нечувствительности из-за неизбежных электрических наводок на фотоприемнике [30–33] и паразитного интерферометра Майкельсона [33, 34].

Специалистами филиала ФГУП «ЦЭНКИ» НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова разработан опытный образец ВОГ класса точности 0,01–0,001°/ч. В состав ВОГ входят волоконный кольцевой интерферометр (оптический блок) и сервисный блок электронной обработки информации. Оптический блок экспериментального образца с длиной световода чувствительной катушки 2000 м имеет диаметр 134 мм и высоту 40 мм. Масштабный коэффициент кольцевого интерферометра равен 0,046 рад на 1°/с. На рис. 1 показан экспериментальный образец ВОГ и оптическая схема его кольцевого интерферометра.

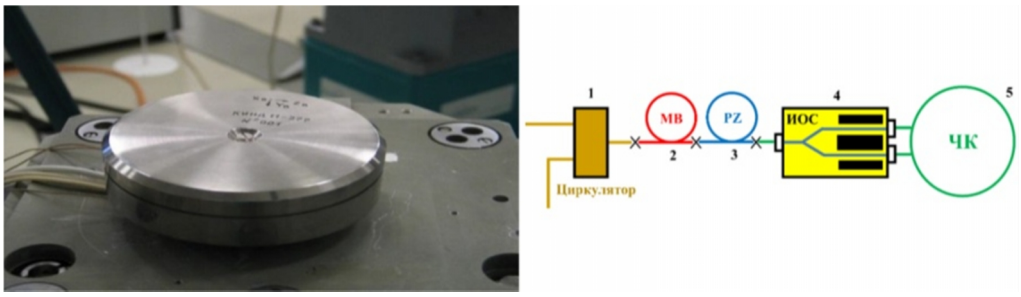

Рис. 1. Опытный образец ВОГ и оптическая схема его кольцевого его интерферометра.
1 – оптический циркулятор, *2* – отрезок монтажного волокна, *3* – отрезок поляризующего световода (PZ-световода), *4* – интегрально-оптическая схема, *5* – чувствительная катушка

В данной схеме поляризационная погрешность минимизируется за счет сохраняющего поляризацию излучения или поляризующего волокна в чувствительной катушке типа «Панда» с W-профилем показателя преломления [35, 36], низкой степени поляризации излучения на выходе эрбиевого волоконного источника, а также за счет поляризующего световода (PZ-световода) [37] на входе интеграль-

но-оптической схемы (ИОС) с волноводами, также обладающими поляризующими свойствами. Погрешность в измерении угловой скорости из-за возбуждения высших мод снижается за счет применения монтажного волокна на выходе циркулятора, которое обладает высокими фильтрующими свойствами по высшим модам.

Для подавления эффекта Шьюпа в чувствительной катушке используются намотка световода по «шахматной» схеме [11] и конструкция [15] с применением специального компаунда. Для обеспечения радиационной стойкости ВОГ при намотке чувствительной катушки применено радиационно-стойкое волокно типа «Панда» длиной 2000 м со световедущей жилой, легированной азотом [21, 34]. В настоящее время достигнуты потери оптического излучения в азотных радиационно-стойких световодах «Панда» на уровне 0,65 дБ/км при коэффициенте межмодовой поляризационной связи (h-параметр) 1×10^{-5} 1/м, что является достаточным для использования их в высокоточных ВОГ. На первый вход оптического циркулятора поступает деполяризованное излучение волоконного эрбиевого источника с остаточной степенью поляризации излучения менее 3%, имеющего ширину линии излучения по уровню 0,5 не менее 20 нм и выходную мощность порядка 10 мВт. Волоконный источник имеет стабильность средневзвешенной длины волны менее 10 ppm на 1°С без использования элемента Пельтье для диода накачки. Кроме того, используется вспомогательная фазовая модуляция, которая позволяет повысить чувствительность ВОГ к вращению. На рис. 2 показано напряжение вспомогательной фазовой модуляции (ВФМ) на электродах фазового модулятора и разность фаз лучей в чувствительной катушке, а также структура общего сигнала на фотоприемнике. В опытном образце ВОГ используется ВФМ с параметром $\Delta = \pi/4$ радиан [28].

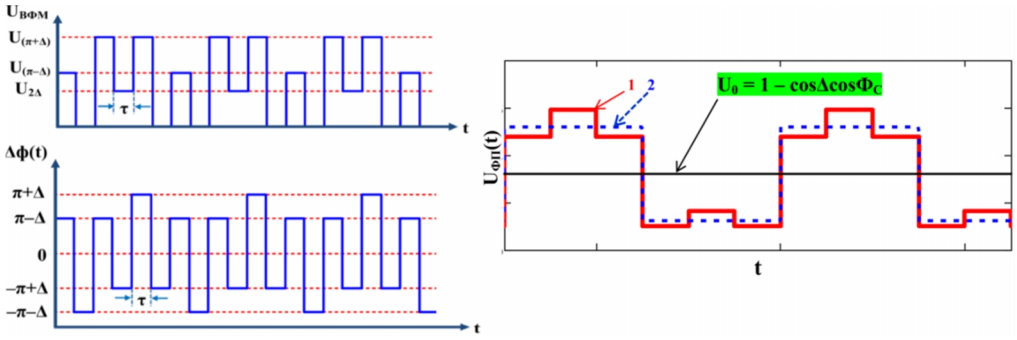

Рис. 2. Напряжение ВФМ и разность фаз между лучами кольцевого интерферометра ВОГ (*слева*) и структура сигнала на фотоприемнике ВОГ (*справа*).
1 – сигнал рассогласования, *2* – сигнал вращения и постоянная составляющая общего сигнала на фотоприемнике

Для линеаризации выходной характеристики используется компенсационный метод считывания разности фаз Саньяка. С этой целью в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) сервисного электронного блока организован первый контур обратной связи (контур ОС-1) на основе демодулятора Д1. Компенсация разности фаз Саньяка осуществляется с помощью пилообразного ступенчатого напряжения (СПН) с фазовой амплитудой при малых угловых скоростях $\pi/2$ радиан [28, 34] Для расширения диапазона измерения угловых скоростей весь измеряемый диапазон разбивается на два поддиапазона. В первом поддиапазоне компенсация разности фаз Саньяка производится с помощью СПН с фазовой амплитудой $\pi/2$ радиан с целью устранения зоны нечув-

ствительности, а во втором, более широком поддиапазоне разность фаз Саньяка компенсируется с помощью СПН с фазовой амплитудой 2π радиан с последующим счетом переходов через каждые ±π радиан изменения разности фаз Саньяка [28, 38]. Счет переходов дает возможность увеличения диапазона измерения угловых скоростей без увеличения разрядности ЦАП, формирующего сумму напряжений ВФМ и СПН на электродах фазового модулятора ИОС. Для стабилизации масштабного коэффициента ВОГ (МК ВОГ) при изменении эффективности фазового модулятора ИОС в ПЛИС организован второй контур обратной связи (контур ОС-2) [28, 34]. При изменении эффективности фазового модулятора ИОС демодулятором Д2 в ПЛИС выделяется код амплитуды сигнала рассогласования, который затем обнуляется за счет изменения напряжения старшего разряда ЦАП, таким образом достигается стабилизация МК ВОГ. Для компенсации постоянной составляющей на выходе усилителя тока фотоприемника в сервисной электронике ВОГ организован третий контур обратной связи (контур-ОС-3) [39] на основе демодулятора Д3, выделяющего код, пропорциональный постоянной составляющей напряжения на выходе усилителя тока фотоприемника. Напряжение компенсации подается затем на второй вход дифференциального усилителя с целью выведения его из состояния насыщения. Это позволяет обеспечить высокий коэффициент усиления усилителя и обеспечить тем самым высокую чувствительность к вращению и высокое быстродействие контура обратной связи ОС-1.

На рис. 3 приведены результаты измерения зоны нечувствительности опытного образца ВОГ и нелинейность его выходной характеристики в диапазоне измерения угловых скоростей ±700°/с.

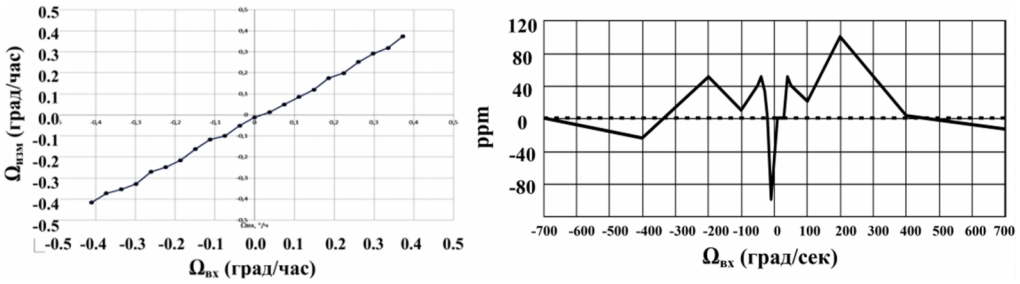

Рис. 3. Результаты измерения зоны нечувствительности (*левый график*) опытного образца ВОГ и нелинейность выходной его характеристики в диапазоне измерения угловых скоростей ±700°/с (*правый график*). Шаг изменения угловой скорости при измерениях зоны нечувствительности составил 0,04°/ч

Величина зоны нечувствительности составляет, по крайней мере, менее 0,04 °/ч, или она отсутствует. Необходимо повышать точность измерений. Максимальная нелинейность выходной характеристики 90 ppm наблюдается при малых угловых скоростях в диапазоне ±30°/с. Нелинейность при более высоких угловых скоростях скорее всего связана с программным обеспечением ПЛИС сервисной электроники.

На рис. 4 показан дрейф нулевого сигнала в течение 15 ч и девиация Аллана. Действительной мерой долговременной нестабильности нуля ВОГ является уровень фликкер-шума, который находится, по меньшей мере, ниже уровня 0,001°/ч (минимум девиации Аллана).

Что касается «белого» шума, его повышенный уровень ($2{,}5\times10^{-3}$ °/ч$^{1/2}$) связан с недостаточной разрядностью ЦАП сервисного электронного блока. Так, в опытном образце (рис. 4) использовался 14-разрядный ЦАП сервисного электронного

блока. Увеличение разрядности ЦАП до 17-ти, а также числа выборок АЦП с 32 до 128 на одном τ-интервале позволило снизить уровень шума до $5{,}7\times10^{-4}$ °/ч$^{1/2}$ при оптической мощности на фотоприемнике без фазовой модуляции 75 мкВт. На рис. 5 показан дрейф нулевого сигнала для определения «белого» шума в опытном образце ВОГ при количестве выборок АЦП 32 и увеличении оптической мощности излучения на фотоприемнике при отсутствии фазовой модуляции до 290 мкВт.

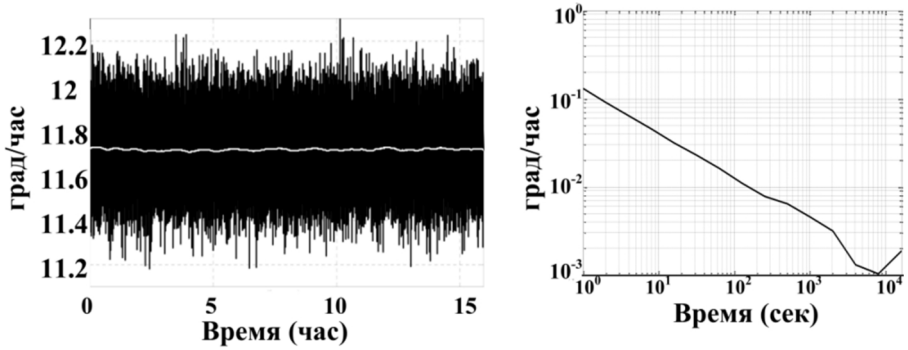

Рис. 4. Дрейф нулевого сигнала опытного образца ВОГ в течение 15 ч при времени усреднения сигнала 1 с и 100 с (*левый график*). Девиация Аллана (*правый график*). «Белый» шум составил величину 0,0025°/ч$^{1/2}$, дрейф нулевого сигнала по девиации фликкер-шума – менее 0,001°/ч

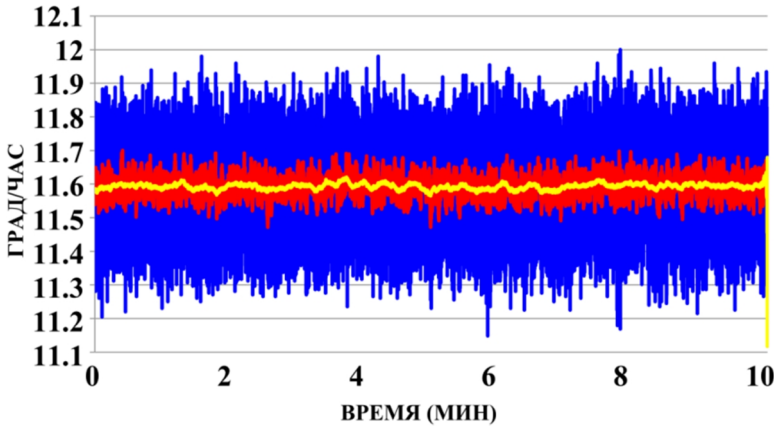

Рис. 5. Запись дрейфа нулевого сигнала для измерения «белого» шума длительностью 10 мин. При времени усреднения сигнала 0,1 с, 1 с, 10 с шум составил соответственно $4{,}6\times10^{-4}$ °/ч$^{1/2}$, $4{,}5\times10^{-4}$ °/ч$^{1/2}$ и $4{,}3\times10^{-4}$ °/ч$^{1/2}$

Чувствительная катушка экспериментального образца ВОГ для подавления эффекта Шьюпа помещена в двойной теплозащитный экран. Внутренняя стенка двойного теплозащитного экрана состоит из пермаллоя для снижения влияния на смещение нулевого сигнала магнитного поля. На рис. 6 показаны график теплового дрейфа экспериментального образца ВОГ в течение четырех часов и закон изменения температуры основания, на котором он размещался. Для теплоизоляции чувствительной катушки в полостях между металлическими экранами использовался воздух.

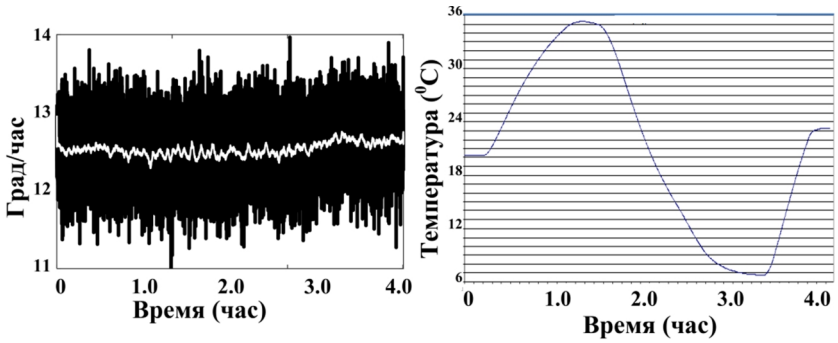

Рис. 6. Дрейф нулевого сигнала опытного образца ВОГ в течение четырех часов (*левый график*) и закон изменения температуры основания, на котором он размещался (*левый график*)

Смещение нулевого сигнала составило порядка 0,12°/ч при скорости изменения температуры основания 0,4°С/мин. Температура основания изменялась в течение четырех часов в пределах от + 7°С до +35°С. Для снижения смещения нулевого сигнала опытного образца ВОГ при изменении температуры необходимо заполнить внешнюю полость между металлическими экранами материалом с низким коэффициентом температуропроводности. Коэффициент температуропроводности может быть выражен следующим образом:

$$K = \lambda / c\,\rho,$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала;
c – теплоемкость материала;
ρ – плотность материала.

При использовании вместо воздуха между внутренним и внешним экранами, например, пенополиуретана можно снизить смещение нулевого сигнала опытного образца ВОГ более чем в 70 раз в условиях изменения температуры окружающей среды.

Оптическая схема кольцевого интерферометра опытного образца ВОГ (рис. 1) подвергалась радиационному облучению со скоростью 0,1 рад в секунду. Суммарная доза гамма-облучения при испытаниях составила 3,2 кГр. Оптические потери в кольцевом интерферометре при полученной дозе гамма-облучения составили порядка 2 дБ, что позволяет сохранить полную работоспособность опытного образца ВОГ.

Приведенные выше характеристики по стабильности нулевого сигнала опытного образца ВОГ достигались спустя около 1,5 ч при включении из «холодного» состояния прибора (время точностной готовности). Помимо этого, наблюдается смещение нулевого сигнала от «включения к включению» порядка 0,3°/ч. Все это не позволяет считать ВОГ принадлежащим к классу точности 0,01–0,001°/ч. Данные факторы связаны с паразитными эффектами в фазовом модуляторе ИОС [40–42]. Считается, что в ВОГ с замкнутым контуром ОС-1 выходной сигнал не зависит от изменений постоянной составляющей оптической мощности излучения на фотоприемнике, если они происходят в небольших пределах и медленно меняются по сравнению с быстродействием контура ОС-1. Тем не менее экспериментальные данные свидетельствуют в пользу того, что такая зависимость все же существует. Допустим, что в ВОГ имеет место некое паразитное смещение угловой скорости, которое можно ввести в правую часть уравнения для контура ОС-1 [43]:

$$\left[d/dt + G(t)\right]\Phi_K(t) = G(t)\Phi_S(t) + \theta(t),$$

где $\Phi_S(t)$ – разность фаз Саньяка; $\Phi_K(t)$ – разность фаз, компенсирующая разность фаз Саньяка, вносимая фазовым модулятором при подаче на него СПН; $G(t)$ – ширина полосы контура ОС-1; t – время; $\theta(t)$ – паразитная величина, которая определяется паразитной разностью фаз лучей в кольцевом интерферометре ВОГ, смещением на выходе усилителя тока фотоприемника, а также искажениями сигнала вращения, которые определяются несовершенствами характеристик фазового модулятора. Помимо этого, здесь учитывается, что из-за изменений постоянной составляющей оптического излучения на фотоприемнике от времени зависит и ширина полосы ВОГ (G). Если эти изменения малы и медленны во времени, то для устоявшегося режима ($t>>G$) и постоянной угловой скорости вращения решение уравнения для контура ОС-1 выглядит следующим образом:

$$\Phi_K(t) \approx \Phi_S + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{G^n(t)}\left(\frac{d}{dt}\right)^n \theta(t) \approx \Phi_S - \frac{\theta(t)}{G(t)} = \Phi_S - \frac{\theta(t)}{2Q(t)\sin\Delta}.$$

Здесь все производные величины $\theta(t)$ считаются очень малыми в силу того, что она медленно изменяется во времени. В свою очередь, для $Q(t)$ справедливо соотношение $Q(t) = P(t)\chi(t)g(t)$, где $P(t)$ – постоянная составляющая оптического излучения на фотоприемнике, $\chi(t)$ – токовая чувствительность фотоприемника, $g(t)$ – коэффициент усиления усилителя тока фотоприемника.

Погрешность измерения угловой скорости зависит от изменения $\theta(t)$, Δ, $Q(t)$. При «холодном» включении ВОГ именно эти величины подвержены наибольшим изменениям, и следствием этого является увеличение времени точностной готовности. Изменения $Q(t)$ и Δ могут иметь минимальное влияние на время точностной готовности, если минимизировать величину $\theta(t)$. Общее дифференциальное уравнение, описывающее простейшую модель паразитных процессов НЧ-динамики в фазовом модуляторе ИОС, имеет следующий вид:

$$(d/dt + b)V(t) = \kappa(d/dt + c)V_0(t).$$

Здесь величины b и c немного отличаются друг от друга, из-за чего нарушается равенство $V(t)=\kappa V_0(t)$. Соответствующая передаточная характеристика имеет вид [40, 41]:

$$h(s) = \kappa(s + c)/(s + b).$$

Последняя может быть преобразована к виду

$$h(s) = \kappa + \kappa(c - b)/(s + b).$$

Это и есть сумма идеальной характеристики и некоторого ее искажения. Это искажение выражено в той же форме, что и характеристика, вызванная конечной шириной полосы пропускания (здесь это величина b), но в виде некоторого возмущения. В связи с этим характеристику в целом нельзя определять как сужение полосы пропускания фазовых модуляторов.

Паразитная НЧ-динамика в фазовом модуляторе приводит к искажению ВФМ оптических лучей кольцевого интерферометра. На рис. 7 показаны иска-

жения разности фаз ВФМ лучей кольцевого интерферометра и сигнал на выходе усилителя тока фотоприемника при таких искажениях.

Из графика, приведенного на рис. 7, видно, что искажения разности фаз ВФМ из-за НЧ-динамики приводят к разному уровню сигналов на выходе усилителя тока фотоприемника в первый и третий τ-интервалы каждого полупериода сигнала вращения. В связи с этим искажения разности фаз можно зафиксировать с помощью выделения разностного сигнала при демодуляции (демодулятор Д4) их в указанные выше τ-интервалы. Динамика изменения сигнала на выходе демодулятора Д4 характеризует интенсивность паразитной НЧ-динамики в фазовом модуляторе ИОС.

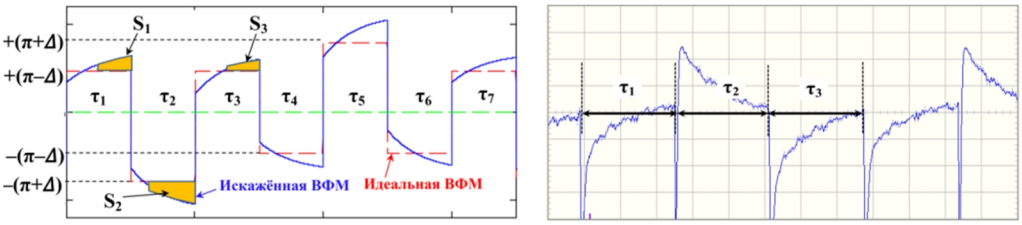

Рис. 7. Искажения разности фаз при ВФМ лучей кольцевого интерферометра (*левый график*) за счет НЧ-динамики в фазовых модуляторах и сигнал на выходе усилителя тока фотоприемника при искажении разности фаз лучей в разные τ-интервалы сигнала вращения.
1, *2*, *3* – τ-интервалы полупериода сигнала вращения

На рис. 8 показана паразитная составляющая разности фаз, которая определяется НЧ-динамикой в фазовом модуляторе, и механизм возникновения смещения нулевого сигнала ВОГ при таких искажениях.

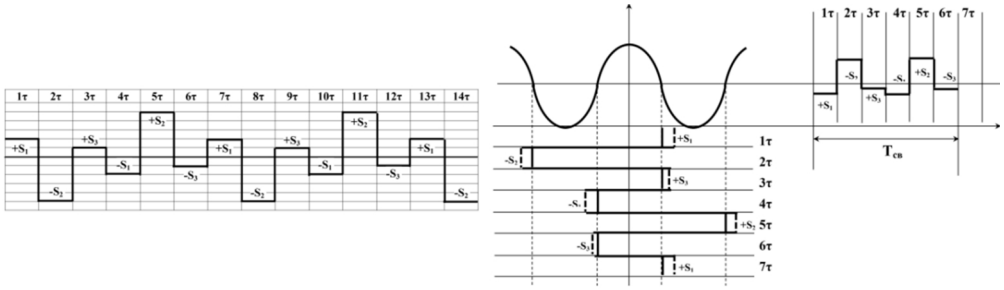

Рис. 8. Паразитная разность фаз лучей кольцевого интерферометра при наличии НЧ-динамики в фазовом модуляторе (*слева*) и механизм возникновения смещения нулевого сигнала ВОГ (*справа*)

В режиме закрытых контуров ОС-1 и ОС-2 сигнал на фотоприемнике может быть представлен в виде постоянного сигнала, который содержит паразитные импульсы на каждом третьем τ-интервале каждого полупериода сигнала вращения. При изменении НЧ-динамики, что, по всей видимости, и происходит при «холодном» включении ВОГ, изменяется соотношение амплитуд этих паразитных импульсов на соседних полупериодах сигнала вращения, и поэтому при демодуляции сигнала вращения возникает погрешность измерения угловой скорости. В установившемся режиме амплитуда этих паразитных импульсов затем становится неизменной, в результате паразитное смещение нулевого сигнала ВОГ исчезает. Искажения разности фаз при модуляции лучей кольцевого интерферометра приводят не только к паразитному смещению нулевого сигнала при изменении НЧ-динамики, но и к изменению МК ВОГ. Даже в установившемся режиме искажения разности фаз присутствуют (сигнал на выходе демо-

дулятора Д4 не равен нулю), вследствие чего в этом случае на фотоприемнике присутствует ложный сигнал рассогласования. Наличие ложного сигнала рассогласования приводит к изменению МК ВОГ. Таким образом, при включении ВОГ на начальном отрезке времени при наличии НЧ-динамики в фазовом модуляторе возникает паразитное смещение нулевого сигнала как из-за изменений амплитуды паразитного импульса на третьем τ-интервале каждого полупериода сигнала вращения, так и из-за изменения МК ВОГ, которое определяется наличием ложного сигнала рассогласования. На участке стабилизации параметров НЧ-динамики присутствует только погрешность измерения угловой скорости из-за изменения МК ВОГ.

Для устранения искажений разности фаз ВФМ лучей кольцевого интерферометра используется дополнительный фазовый модулятор, на который подается напряжение специальной формы. На рис. 9 показана структура интегрально-оптического фазового модулятора с основным и дополнительным фазовыми модуляторами, которые располагаются на одной подложке с основным модулятором ИОС, и напряжение, подаваемое на электроды дополнительного модулятора для компенсации искажений разности фаз ВФМ, формируемой основным фазовым модулятором.

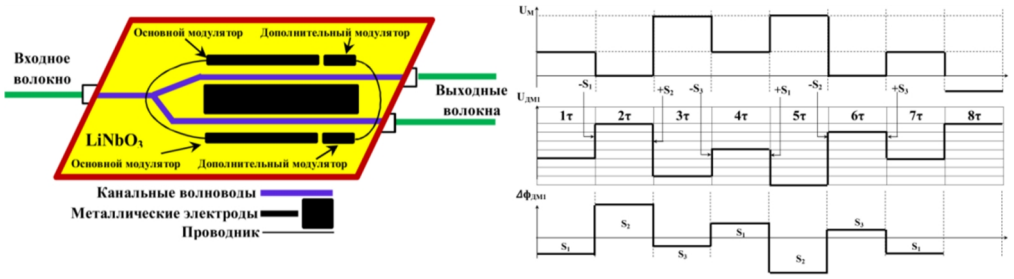

Рис. 9. Топология ИОС с основным и дополнительным фазовыми модуляторами (*слева*) и напряжение на электродах дополнительного модулятора (*справа*) для устранения искажений разности фаз ВФМ, формируемой основным фазовым модулятором при наличии в нем паразитной НЧ-динамики

За счет регулирования общей амплитуды напряжения на дополнительном фазовом модуляторе возможна компенсация искажений разности фаз ВФМ, формируемой основным фазовым модулятором при изменении в нем интенсивности паразитной НЧ-динамики. Для компенсации искажений разности фаз в макете ВОГ реализован четвертый контур обратной связи (контур ОС-4) на основе демодулятора Д4, который выделяет разностный сигнал между первым τ-интервалом и третьим τ-интервалом каждого полупериода сигнала вращения. Для повышения точности компенсации искажений разности фаз дополнительный фазовый модулятор должен обладать малой эффективностью. На рис. 10 показаны запись дрейфа нулевого сигнала макета ВОГ в течение 18 ч при «холодном» включении и разностный сигнал между первым и третьим τ-интервалами каждого полупериода сигнала вращения, выделяемый демодулятором Д4, а также дрейф нулевого сигнала ВОГ в течение 16 ч при работе замкнутого контура ОС-4 (ось чувствительности в эксперименте устанавливалась произвольно). Время точностной готовности макета ВОГ при работе контура ОС-4 значительно сократилось (*правый график*).

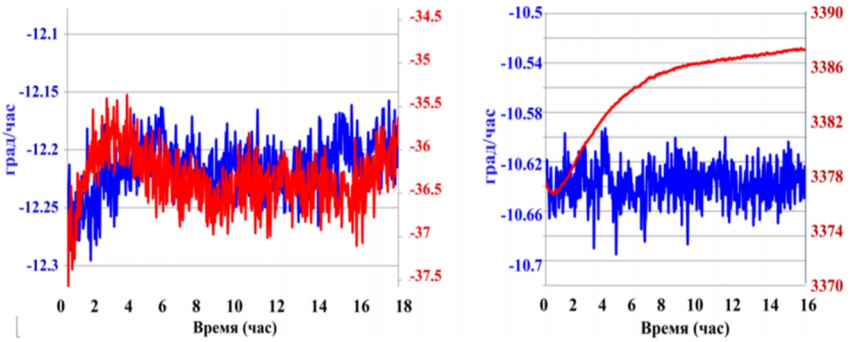

Рис. 10. Дрейф нулевого сигнала макета ВОГ. Дрейф нулевого сигнала ВОГ при разомкнутом контуре ОС-4 (*слева*) в течение 18 ч (*синий график*) и сигнал на выходе демодулятора Д4 (*красный график*). Дрейф нулевого сигнала макета ВОГ (*справа*) при замкнутом контуре ОС-4 в течение 16 ч (*синий график*) и изменение сигнала управления амплитудой напряжения на электродах дополнительного модулятора (*красный график*)

Нестабильность МК ВОГ и паразитное смещение его нулевого сигнала возникает также и из-за искажений НЧ-динамики СПН, которое используется в контуре ОС-1 для компенсации разности фаз Саньяка. Нестабильность МК ВОГ имеет две составляющие. Первая связана с изменениями наклона выходной характеристики, которая вызвана изменениями параметров чувствительной катушки (изменения среднего радиуса намотки световода и его показателя преломления), а также изменениями средневзвешенной длины волны излучения эрбиевого волоконного источника. Вторая составляющая нестабильности МК связана с нелинейностью выходной характеристики ВОГ. Паразитная НЧ-динамика приводит к нелинейности выходной характеристики ВОГ через искажения разности фаз между лучами кольцевого интерферометра, которая вносится СПН. Эти искажения можно представить как искажения СПН, подаваемого на электроды идеального фазового модулятора. На рис. 11 показаны СПН, искаженное паразитной НЧ-динамикой в основном фазовом модуляторе, и выбросы напряжения в сигнале ВОГ на выходе усилителя тока фотоприемника из-за изменения фазовой амплитуды СПН. Нелинейность выходной характеристики при наличии выбросов в сигнале возникает из-за изменения их количества в сигнале при изменении измеряемой угловой скорости.

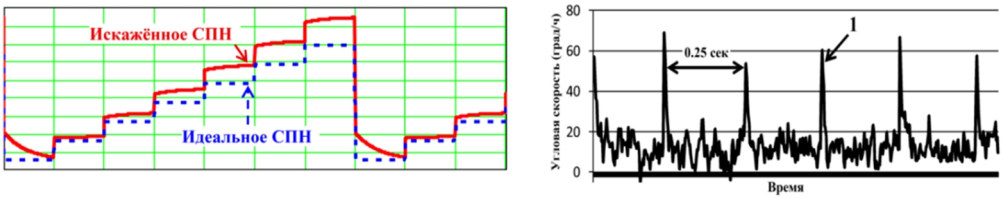

Рис. 11. Искажения из-за паразитной НЧ-динамики СПН, подаваемого на электроды основного фазового модулятора (*слева*) и выбросы напряжения *1* в сигнале длительностью 1 с на выходе усилителя тока фотоприемника при искажениях СПН (*справа*) при измерении проекции угловой скорости Земли на ось чувствительности ВОГ при времени осреднения сигнала 0,02 с

При измерении проекции угловой скорости Земли использовался макет ВОГ, который имел чувствительную катушку с масштабным коэффициентом 0,0052 радиан на 1°/с. Как следует из рис. 11, основное ступенчатое напряжение содержит паразитную составляющую в виде дополнительного ступенчатого напряже-

ния. На рис. 12 показано паразитное ступенчатое напряжение и соответствующая ему паразитная разность фаз между лучами кольцевого интерферометра, а также паразитный сигнал вращения на фотоприемнике, который порождается искажениями СПН.

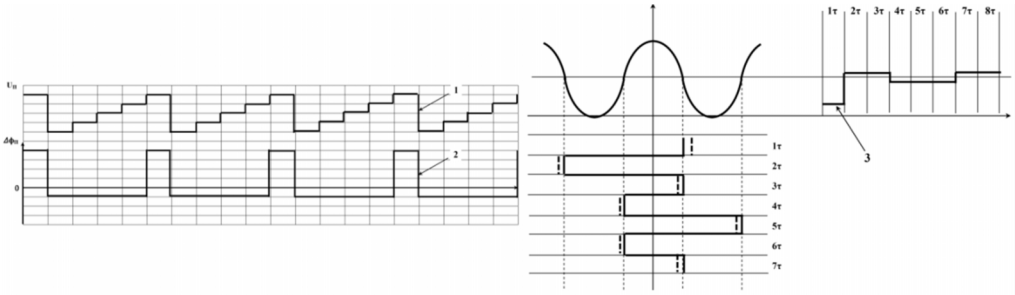

Рис. 12. *1* – паразитное ступенчатое напряжение, *2* – паразитная разность фаз, вносимая паразитным ступенчатым напряжением (*слева*), *3* – паразитный сигнал вращения на фотоприемнике, который порождается паразитным ступенчатым напряжением (*справа*)

Паразитное ступенчатое напряжение имеет период, который совпадает с периодом СПН. Паразитная разность фаз имеет постоянное значение и паразитные импульсы разности фаз с обратным знаком в момент сбросов СПН. При наложении паразитной разности фаз на разность фаз ВФМ на фотоприемнике присутствуют паразитный сигнал 3, который характеризуется частотой, равной частоте следования сигнала вращения, и выбросы в моменты сброса фазовой амплитуды СПН. Паразитный сигнал 3 на фотоприемнике приводит как к паразитному смещению нулевого сигнала ВОГ, так как для его компенсации изменяются параметры СПН при работе контуров ОС-1 и ОС-2, так и к изменению нелинейности выходной характеристики ВОГ из-за выбросов в сигнале на выходе усилителя тока фотоприемника. На рис. 13 показана нелинейность выходной характеристики ВОГ при наличии выбросов напряжения в сигнале и при их отсутствии. Выбросы в сигнале на выходе усилителя тока фотоприемника были устранены с помощью ручной подстройки кода амплитуды СПН, формируемой в ПЛИС макета ВОГ. Эксперимент показывает влияние выбросов на величину нелинейности выходной характеристики ВОГ, а значит, и на стабильность его МК. Подстройка фазовой амплитуды компенсирующего разность фаз Саньяка СПН для устранения выбросов в сигнале ВОГ не решает в полном объеме проблемы повышения стабильности МК ВОГ при наличии НЧ-динамики, так как в этом случае изменяется первая составляющая нестабильности МК ВОГ.

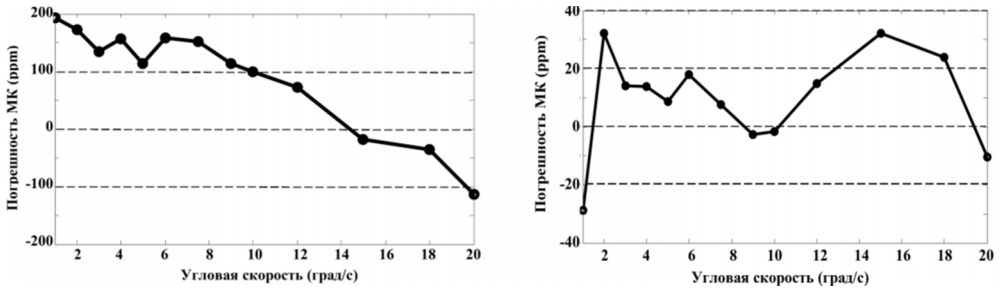

Рис. 13. Нелинейность выходной характеристики ВОГ при наличии выбросов в сигнале ВОГ (*слева*) и при их отсутствии (*справа*). В эксперименте в макете ВОГ использовалась чувствительная катушка с масштабным коэффициентом 0,0052 радиан на 1°/с

Для решения проблемы необходимо устранение искажений СПН. Для компенсации искажений в макете ВОГ был использован пятый контур обратной связи (контур ОС-5) на основе второго дополнительного низкоэффективного фазового модулятора и пятого демодулятора Д5, который выделяет паразитные импульсы на фотоприемнике при сбросе ступенчатого напряжения. При работе контура ОС-5 устраняются искажения СПН, что приводит к снижению нелинейности выходной характеристики ВОГ. Для компенсации искажений основного СПН на электроды второго дополнительного модулятора необходимо подать напряжение, которое является противофазным напряжению, приведенному на рис. 12. На рис. 14 показана запись дрейфа нулевого сигнала макета ВОГ в течение 16 ч при «холодном» включении без использования контура ОС-5 и при его использовании.

Графики иллюстрируют эффективность работы контура ОС-5. Время выхода на режим точностной готовности осталось без изменений, но максимальное смещение нулевого сигнала уменьшилось практически в три раза (0,035 °/ч вместо 0,09 °/ч).

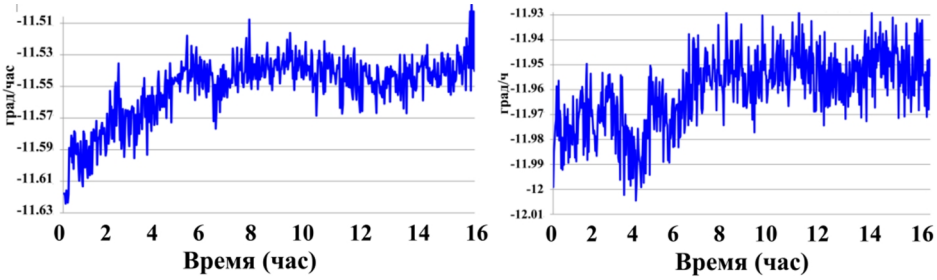

Рис. 14. Дрейф нулевого сигнала с незамкнутым контуром ОС-5 (*слева*) и с замкнутым контуром ОС-5 (*справа*) в течение 16 ч

На рис. 15 приведен график дрейфа нулевого сигнала макета ВОГ в течение 7 ч при «холодном» включении прибора при замкнутых контурах ОС-4 и ОС-5. Нестабильность амплитуд сигнала вращения и сигнала рассогласования определялась по нестабильности постоянной составляющей оптического сигнала на фотоприемнике. Из графика следует, что при нестабильности амплитуд сигнала вращения и сигнала рассогласования порядка 0,5% ее влияние на дрейф нулевого сигнала ВОГ практически отсутствует. Это говорит о том, что паразитная составляющая разности фаз в кольцевом интерферометре, которая определяется низкочастотными паразитными эффектами в фазовом модуляторе, достаточно эффективно устраняется с помощью контуров ОС-4 и ОС-5.

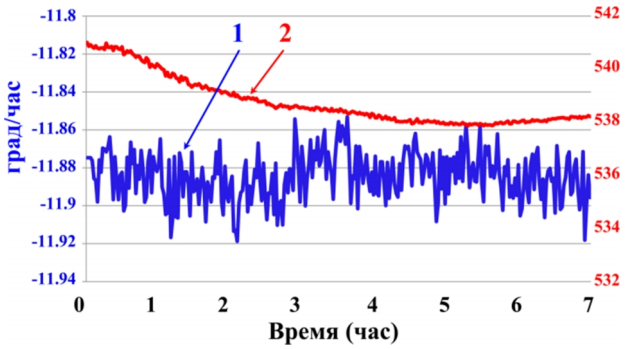

Рис. 15. *1* – дрейф нулевого сигнала ВОГ при «холодном» включении в течение 7 ч, *2* – нестабильность постоянной составляющей общего сигнала на фотоприемнике

В табл. 1 приведены результаты измерения проекции вектора угловой скорости Земли на ось чувствительности ВОГ при «холодном» включении макета ВОГ на временном интервале длительностью 14 сут. с незамкнутыми контурами ОС-4, ОС-5, с замкнутым контуром ОС-5 и замкнутыми контурами ОС-4, ОС-5. Длительность каждой из пяти реализаций составляет 1 ч. В таблице приведены также средние значения измеренной угловой скорости по пяти реализациям и максимальные отклонения измеренной угловой скорости от среднего значения.

Таблица 1

Режим работы ВОГ	1, °/ч	2, °/ч	3, °/ч	4, °/ч	5, °/ч	Среднее значение Ω, °/ч	Отклонение от среднего значения Ω, °/ч
Без контуров ОС-4, С-5	11,95	11,6	11,87	12,25	–	11,92	–0,31, +0.33
С контуром ОС-5	12,2	12,35	12,13	11,97	12,25	12,18	–0,17, +0,21
С контурами ОС-4, ОС-5	11,86	11,88	11,88	11,88	11,9	11,88	–0,015, +0,02

Максимальная нестабильность паразитного смещения нулевого сигнала макета ВОГ «от включения к включению» снизилась с замкнутыми контурами ОС-4 и ОС-5 более чем на порядок. Устранение искажений разности фаз ВФМ лучей кольцевого интерферометра и СПН позволяет не только повысить стабильность МК ВОГ и в значительной степени устранить паразитное смещение его нулевого сигнала при «холодном» включении, но и повысить стабильность этих параметров «от включения к включению». Контуры ОС-4 и ОС-5 позволят также, по-видимому, минимизировать изменения смещения нулевого сигнала и МК ВОГ из-за нелинейности его выходной характеристики при его длительном хранении.

В табл. 2 приведены полученные и ожидаемые характеристики опытного образца ВОГ при использовании контуров ОС-4 и ОС-5.

Таблица 2

Характеристики опытного образца ВОГ	Полученные характеристики	Ожидаемые характеристики после доработки по результатам исследований
1. Стабильность нулевого сигнала, °/ч (σ) – при постоянной температуре – при скорости изменения температуры 0,4°С/мин, °/ч	 0,001 0,12	 менее 0,001 0,001
2. Зона нечувствительности, °/час	≤0,04	0,003
3. Шум (1 σ), $°/ч^{1/2}$	$4{,}5\times10^{-4}$	$3{,}3\times10^{-4}$
4. Диапазон измерения угловых скоростей, °/с	±700	±700
5. Нелинейность выходной характеристики, ppm	±90,0	±(30–5,0)
6. Время точностной готовности 0,001 °/ч, мин	120,0	менее 20,0
7. Нестабильность смещения нулевого сигнала от «включения к включению» при «холодном» включении, °/час	±0,3	менее ±0,02
8. Потребляемая мощность, Вт	10,0	не более 10,0
9. Габаритные размеры оптического блока, мм – диаметр – высота	 134 40	 134 40
10. Доза радиационного гамма-облучения кольцевого интерферометра при полном сохранении работоспособности ВОГ, кГр	3,2	более 3,2
11. Рабочий диапазон температур, °С	–10°С … +60°С	–10 °С … +60°С

Заключение

Описан опытный образец волоконно-оптического гироскопа класса точности 0,01–0,001 °/ч. Приведены результаты исследования его характеристик. Основным недостатком опытного образца является длительное время точностной готовности, большое смещение нулевого сигнала от «включения к включению», а также повышенная нелинейность его выходной характеристики в области малых угловых скоростей. Определено, что основным источником этих несовершенств характеристик опытного образца ВОГ являются паразитные эффекты в фазовых модуляторах ИОС, которые связаны с неравномерностью их передаточной характеристики в области низких частот. Эти паразитные эффекты в фазовых модуляторах приводят к искажениям разности фаз ВФМ лучей кольцевого интерферометра ВОГ и к искажениям СПН, которое используется для компенсации разности фаз Саньяка. Эти искажения компенсируются с помощью дополнительных контуров обратной связи ОС-4 и ОС-5, реализованных на основе двух дополнительных низкоэффективных фазовых модуляторов. Приведены результаты исследований макета ВОГ с контурами ОС-4 и ОС-5. Благодаря использованию дополнительных контуров обратной связи достигнуты снижение времени точностной готовности ВОГ при «холодном» включении, снижение смещения нулевого сигнала «от включения к включению», которое составило не более 0,02 °/ч, а также повышение стабильности МК в области малых угловых скоростей за счет снижения нелинейности выходной характеристики до 30 ppm. Результаты исследования макета ВОГ позволяют значительно улучшить характеристики опытного образца ВОГ.

Авторы выражают благодарность за участие в работе по сборке опытного образца и макета ВОГ для исследований сотрудникам НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова Чанову Н.Н, Борисову О.К., Собчакову А.В., Голякову Е.А., Колосунину И.Б., Табаргину Д.А., Ганяеву П.И.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lefevre, H.C.,** Potpourri of comments about for its 40th anniversary, and how fascinating it was and it still is, *Proc. of SPIE*, 2016, vol. 9852, p. 985203-1.
2. **Sanders, G.A., Sanders, S.J., Strandjord, L.K., Qiu, T., Wu, J., Smiciklas, M., Mead, D., Mosor, S., Arrizon, A., Ho, W., Salit, M.** Fiber optic gyro development at Honeywell, Proc. of SPIE, 2016, vol. 9852, p. 985207-1.
3. **Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В.** Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 3. С. 78.
4. **Vali, V., Shorthill, R. W.** Fiber ring interferometer, *Appl. Opt.*, 1976, vol. 15, p. 1099.
5. **Ulrich, R., Johnson, M.,** Fiber-ring interferometer: polarization analysis, Opt. Lett., 1979, vol. 4, p. 152.
6. **Schiffner, G., Leeb, W.R., Krammer, H., Wittmann, J.,** Reciprocity of birefringent single-mode fibers for optical gyros, Appl. Opt., 1979, vol. 18, p. 2096.
7. **Ulrich, R.,** Fiber-optic rotation sensing with low drift, *Opt. Lett.*, 1980, vol. 5, № 5, p. 173.
8. **Burns, W.K., Chen, C., Moeller, R.P.,** Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources, *J. Lightwave Technol.*, 1983, vol. 1, p. 98.
9. **Shupe, D.M.,** Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer, *Appl. Opt.*, 1980, no. 5, p. 654.
10. **Frigo, N.J.,** Compensation of linear sources of nonreciprocity in Sagnac interferometers, *Proc. SPIE*, 1983, vol. 412, p. 268.
11. **Malvern, A.,** Optical fiber gyroscope sensing coil having a reduced sensitivity to temperature variations occurring therein, US Patent № 5,465,150, November. 1995.

12. **Cordova, A., Bilinsky, D.J., Fersht, S.M., Surabian, J.M., Wilde, J.D., Hinman, P.A.,** Sensor coil for low bias fiber optic gyroscope, 1994, US Pat. № 5,371,593.
13. **Cordova, A., Surabian, G.,** Potted Fiber optic gyro sensor coil for stringent vibration and thermal environments, 1996, US Pat. № 5,546,482.
14. **Tirat, O. F. J., Euverte, J. M.** Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2837, p. 230.
15. **Курбатов, А. М., Курбатов, Р. А.** Температурные характеристики чувствительных катушек волоконно-оптического гироскопа // Радиотехника и Электроника. 2013. №7. С. 735.
16. **Lefevre, H.C.,** The fiber optic gyroscope, Artech House, 1993.
17. **Pavlath, G.A.,** Method for reducing random walk in fiberoptic gyroscopes, US Patent № 5,530,545, 1996.
18. **Killian, K.M., Burmenko, M., Hollinger, W.,** High-performance fiber optic gyroscope with noise reduction, *Proc. SPIE*, 1994, vol. 2292, p. 255.
19. **Straindjord, L.K., Sanders, G.A.,** Relative intensity noise controller for fiber light sources, US Patent № US2003/0128365 A1. July. 2003.
20. **LuValle, M.J., Friebele, E.J., Dimarcello, F.V., Miller, G.A., Monberg, E.M., Wasserman, L.R., Wisk, P.W., Yan, M.F., Birtch, E.M.,** Radiation-induced loss predictions for pure silica core polarization-maintaining fibers, *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6193, p. 61930J-1.
21. **Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A.,** Radiation resistant fibers with depressed claddings for fiber optic gyro sensing coil, *Proc. SPIE. OFS-22*, 2012, vol. 8421, p. 842180-1.
22. **Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A., Voloshin, V.V., Vorob'ev, I.L., Kolosovsky, A.O.,** Polarisation maintaining fibre with pure silica core and two depressed claddings for fibre optic gyroscope, *Opt. Fiber Technol.*, 2016, vol. 32, p. 6.
23. **Егоров Д.А., Рупасов А.В., Унтилов А.А.** Проблемы обеспечения радиационной стойкости волоконно-оптических гироскопов и пути ее повышения (обзор) // Гироскопия и навигация. 2018. Том. 26. №4 (103).
24. **Yang, Y., Suo, X., Yang, M.,** Active radiation hardening technology for fiber-optic source, *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8924, p. 89240W-1.
25. **Зотов К.В., Лихачев М.Е., Томашук А.Л., Бубнов М.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н.,** Радиационно-стойкий волоконный световод на основе кварцевого стекла, легированного эрбием // Квантовая Электроника. 2007. № 10. С. 946.
26. **Кель О.Л., Мелькумов М.А. Азанова И.С., Гурьянов А.Н., Рюмкин К.Е., Яшков М.Н., Носова Е.А., Шаронова Ю.О., Коффер К.В., Поносова А.А.** Суперлюминесцентный волоконный эрбиевый источник ИК-излучения, стойкий к воздействию ионизирующего излучения // ВКВО-2017, волоконные лазеры и усилители. С. 45.
27. **Lin, S.C., Giallorenzi, T.G.,** Sensitivity analysis of the Sagnac-effect optical-fiber ring interferometer, *Appl. Opt.*, 1979, no. 6, p. 915.
28. **Курбатов А. М.** О новых путях совершенствования волоконно-оптических гироскопов с открытым и закрытым контуром обратной связи // Гироскопия и навигация. 2015. № 1. С. 43.
29. **Ebberg, A., Schiffner, G.,** Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback, *Opt. Lett.*, 1985, no. 6, p. 300.
30. **Lefevre, H.C., Graindorge, Ph., Arditty H.J., et al.,** Double closed-loop hybrid fiber gyroscope using digital phase ramp, *Optical Fiber Sensors (OFS)*, 1985, San Diego, CA, January 1, Post Deadline, p. PDS7-1.
31. **Pavlath, G.A.,** Closed-loop fiber optic gyros, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2837, p. 46.
32. **Spahlinger, G**., Fiber optic Sagnac interferometer with digital phase ramp resetting via correlation-free demodulator control, 1992, US Patent no. 5,123,741.
33. **Chung, Jen-Chen,** Interferometric fiber optic gyroscope dead band suppression, *Applied Physics Express*, 2008, no. 7, p. 072501-1.
34. **Курбатов А.М., Курбатов Р.А.** Пути повышения точности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и Навигация. 2012. №1. С. 102.
35. **Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A.,** Polarization and modal filters based on W-fibers Panda for fiber-optic gyroscopes and high-power fiber lasers, *Opt. Eng.*, 2013, no. 3. p. 035006-1.
36. **New optical** W-fiber Panda for fiber optic gyroscope sensitive coil, *Technical Physics Letters*, 2010, 36 (9), 789–791.
37. **Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A.,** Polarisation non-reciprocity cancelling in Sagnac fibre-ring interferometer: an attempt of realistic study, Optical and Quantum Electronics, 2019, 51, № 5, pp. 1–20.
38. **Курбатов А.М., Курбатов Р.А.** Волоконно-оптический гироскоп с большим динамическим диапазоном измерения угловых скоростей. Патент РФ №2620933. Приоритет от 25.08.16 г.

39. **Курбатов А.М., Курбатов Р.А.** Способ повышения точности волоконно-оптического гироскопа при воздействии вибраций. Патент РФ RU 2627020 Приоритет от 25.08.2016.
40. **Hollinger, W.P., Covacs, R.A.,** Tuned integrated optic modulator on a fiber optic gyroscope, US Patent no. 5,504,580, 1996.
41. **Greening, T.C., Khari, S.H., Newlin, M.P.,** Minimal bias switching for fiber optic gyroscope, US Patent no. 7,336,364, 2008.
42. **Yi, X., Wen, X.,** Y-integrated optic chip (Y-IOC) applied in fiber optic gyro, Proc. SPIE, 2006, vol. 6344, p. 63440U-1.
43. **Курбатов А.М., Курбатов Р.А.** Вибрационная ошибка угловой скорости волоконно-оптического гироскопа и методы ее подавления // Радиотехника и Электроника. 2013. № 8. С. 842.
44. **Колеватов А.П., Николаев С.Г., Андреев А.Г., Ермаков В.С., Струк В.К., Парфёнов А.С., Нестеров И.И.** Успехи в разработке бесплатформенных инерциальных навигационных систем на базе волоконно-оптических гироскопов // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2009.

Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A., Goryachkin, A.M. (Branch of FSUE Center for Operation of Space Ground-based Infrastructure (TsENKI) «Academician Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics», Moscow)

Fiber-Optic Gyroscope Accuracy Improvement by Suppressing the Parasitic Effects in Integrated Optic Phase-Shift Modulators, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 52–69.

Abstract. The results of study of a prototype fiber-optic gyroscope with accuracy grade 0.01–0.001 deg/h are presented. The gyroscope comprises three feedback loops: one for Sagnac phase shift compensation, the second one for the scale factor stabilization, and the third (fast-response) one for the compensation of constant component of optical signal on the photocell, affecting the measurement channel. To increase the accuracy of the prototype gyroscope up to the level of 0.001 deg/h, it is proposed to use the fourth and the fifth feedback loops which will suppress the parasitic effects in the integrated optic phase-shift modulators.

Key words: fiber-optic gyroscope, closed feedback loop, dead zone, integrated optic phase-shift modulator, phase shift distortions in auxiliary phase modulation, stepped sawtooth voltage distortions.

REFERENCES

1. **Lefevre, H.C.,** Potpourri of comments about the fiber optic gyro for its 40th anniversary, and how fascinating it was and it still is, *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9852, p. 985203-1.
2. **Sanders, G.A., Sanders, S.J., Strandjord, L.K., Qiu, T., Wu, J., Smiciklas, M., Mead, D., Mosor, S., Arrizon, A., Ho, W. and Salit, M.,** Fiber optic gyro development at Honeywell, *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9852, p. 985207-1.
3. **Untilov, A.A., Egorov, D.A., Rupasov, R.L., Novikov, S.T., Neforosnyi, M.P., Azbeleva, E.V. and Dranitsyna, E.V.,** Results of fiber-optic gyro testing, *Giroskopiya i navigatsiya*, 2017, vol. 25, no. 3, p. 78–85.
4. **Vali, V. and Shorthill, R.W.,** Fiber ring interferometer, *Applied Optics*, 1976, vol. 15, p. 1099.
5. **Ulrich, R. and Johnson, M.,** Fiber-ring interferometer: polarization analysis, *Optics Letters*, 1979, vol. 4, p. 152.
6. **Schiffner, G., Leeb, W.R., Krammer, H. and Wittmann, J.,** Reciprocity of birefringent single-mode fibers for optical gyros, *Applied Optics*, 1979, vol. 18, p. 2096.
7. **Ulrich, R.,** Fiber-optic rotation sensing with low drift, *Optics Letters*, 1980, vol. 5, no. 5, p. 173.
8. **Burns, W.K., Chen, C. and Moeller, R.P.,** Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources, *Journal of Lightwave Technology*, 1983, vol. 1, p. 98.
9. **Shupe, D.M.,** Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer, *Applied Optics*, 1980, no. 5, p. 654.
10. **Frigo, N.J.,** Compensation of linear sources of nonreciprocity in Sagnac interferometers, *Proc. SPIE*, 1983, vol. 412, p. 268.

11. **Malvern, A.,** Optical fiber gyroscope sensing coil having a reduced sensitivity to temperature variations occurring therein, US Patent 5 465 150, November, 1995.
12. **Cordova, A., Bilinsky, D.J., Fersht, S.M., Surabian, J.M., Wilde, J.D. and Hinman, P.A.,** Sensor coil for low bias fiber optic gyroscope, US Patent 5 371 593, 1994.
13. **Cordova, A. and Surabian, G.,** Potted fiber optic gyro sensor coil for stringent vibration and thermal environments, US Patent 5 546 482, 1996.
14. **Tirat, O.F.J. and Euverte, J.M.,** Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2837, p. 230.
15. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Temperature characteristics of fiber-optic gyroscope sensing coils, Radiotekhnika i elektronika, 2013, no. 7, p. 735.
16. **Lefevre, H.C.,** The Fiber Optic Gyroscope, London: Artech House, 1993.
17. **Pavlath, G.A.,** Method for reducing random walk in fiber-optic gyroscopes, US Patent 5 530 545, 1996.
18. **Killian, K.M., Burmenko, M. and Hollinger, W.,** High-performance fiber optic gyroscope with noise reduction, *Proc. SPIE*, 1994, vol. 2292, p. 255.
19. **Straindjord, L.K. and Sanders, G.A.,** Relative intensity noise controller for fiber light sources, US Patent US2003/0128365 A1, July, 2003.
20. **LuValle, M.J., Friebele, E.J., Dimarcello, F.V., Miller, G.A., Monberg, E.M., Wasserman, L.R., Wisk, P.W., Yan, M.F. and Birtch, E.M.,** Radiation-induced loss predictions for pure silica core polarization-maintaining fibers, *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6193, p. 61930J-1.
21. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A**., Radiation resistant fibers with depressed claddings for fiber optic gyro sensing coil, *Proc. SPIE*, *OFS-22*, 2012, vol. 8421, p. 842180-1.
22. **Kurbatov, A.M., Kurbatov, R.A., Voloshin, V.V., Vorob'ev, I.L. and Kolosovsky, A.O.,** Polarisation maintaining fibre with pure silica core and two depressed claddings for fibre optic gyroscope, *Optical Fiber Technology*, 2016, vol. 32, p. 6.
23. **Egorov, D.A., Rupasov, A.V. and Untilov, A.A.,** Ensuring radiation resistance of fiber optic gyroscopes and ways to improve it, Gyroscopy and Navigation, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 314–324.
24. **Yang, Y., Suo, X. and Yang., M.,** Active radiation hardening technology for fiber-optic source, *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8924, p. 89240W-1.
25. **Zotov, K.V., Likhachev, M.E., Tomashuk, A.L., Bubnov, M.M., Yashkov, M.V. and Gur'yanov, A.N.,** Radiation-resistant erbium-doped silica fibre, *Quantum Electronics,* 2007, vol. 37, no. 10, p. 946.
26. **Kel' O.L., Mel'kumov, M.A., Azanova, I.S., Gur'yanov, A.N., Ryumkin, K.E., Yashkov, M.N., Nosova, E.A., Sharonova, Yu.O., Koffer, K.V. and Ponosova, A.A.,** Supeluminescent erbium-doped fiber source of IR-radiation, resistant to ionizing radiation, *Proc. Russian National Conference on Fiber Optics (VKVO), Fiber Lasers and Amplifiers*, 2017, p. 45
27. **Lin, S.C. and Giallorenzi, T.G.,** Sensitivity analysis of the Sagnac-effect optical-fiber ring interferometer, *Applied Optics,* 1979, no. 6, p. 915.
28. **Kurbatov, A.M.,** New methods to improve the performance of open and closed loop fiber-optic gyros, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 207–217.
29. **Ebberg, A. and Schiffner, G.,** Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback, Optics Letters, 1985, no. 6, p. 300.
30. **Lefevre, H.C., Graindorge, Ph., Arditty, H.J. et al.,** Double closed-loop hybrid fiber gyroscope using digital phase ramp, *Proc. Optical Fiber Sensors (OFS) San Diego CA*, 1985, p. PDS7-1.
31. **Pavlath, G.A.,** Closed-loop fiber optic gyros, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2837, p. 46.
32. **Spahlinger, G**., Fiber optic Sagnac interferometer with digital phase ramp resetting via correlation-free demodulator control, US Patent 5 123 741, 1992.
33. **Chung, J.-C.,** Interferometric fiber optic gyroscope dead band suppression, *Applied Physics Express*, 2008, no. 7, p. 072501-1.
34. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Methods of improving the accuracy of fiber-optic gyros, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 132–143.
35. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Polarization and modal filters based on W-fibers Panda for fiber-optic gyroscopes and high-power fiber lasers, Optical Engineering, 2013, no. 3, p. 035006-1.
36. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** New optical W-fiber Panda for fiber optic gyroscope sensitive coil, *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, no. 9, pp. 789–791.
37. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Polarisation non-reciprocity cancelling in Sagnac fibre-ring interferometer: an attempt of realistic study, *Optical and Quantum Electronics*, 2019, vol. 51, no. 5, pp. 1–20.

38. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Fiber optic gyroscope with a large dynamic range of measurement of angular speeds, RF Patent 2620933, 2016.
39. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** Method for improving accuracy of fiber-optic gyroscopes under vibration influence, RF Patent RU 2627020, 2016.
40. **Hollinger, W.P. and Covacs, R.A.,** Tuned integrated optic modulator on a fiber optic gyroscope, US Patent 5 504 580, 1996.
41. **Greening, T.C., Khari, S.H. and Newlin, M.P.,** Minimal bias switching for fiber optic gyroscope, US Patent 7 336 364, 2008.
42. **Yi, X. and Wen, X.,** Y-integrated optic chip (Y-IOC) applied in fiber optic gyro, *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6344, p. 63440U-1.
43. **Kurbatov, A.M. and Kurbatov, R.A.,** The vibration error of the fiber-optic gyroscope rotation rate and methods of its suppression, *Radiotekhnika i elektronika*, 2013, no. 8, p. 842.
44. **Kolevatov, A.P., Nikolaev, S.G., Andreev, A.G., Ermakov, V.S., Struk, V.K., Parfenov, A.S. and Nesterov I.I.,** Advances in development of strapdown inertial navigation systems on fiber-optic gyroscopes, *Proc. 16th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2009.

Материал поступил 05.07.2018