

УДК 621.375
EDN: ERALEW

В. Ю. ВЕНЕДИКТОВ, Ю. В. ФИЛАТОВ, Е. В. ШАЛЫМОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРНЫХ ГИРОСКОПОВ

В статье рассматривается современное состояние оптических резонаторных гироскопов. Излагается идея, положенная в основу этого типа гироскопов. Описываются подходы к их конструкции и способу определения угловой скорости. При этом главное внимание уделено исторически первому и наиболее популярному на сегодняшний день подходу, который базируется на применении фазово-модуляционной спектроскопии и перестраиваемого лазера. Анализируется также альтернативный подход, основанный на использовании низкокогерентных источников излучения. Представлен обзор наиболее распространенных источников погрешности измерений и методов борьбы с ними. Минимальный случайный дрейф пока был достигнут за счет применения волоконных кольцевых резонаторов: 2,0 °/ч при диаметре кольца 60 мм при времени интегрирования 1 с и 1,23 °/ч при 5 с; при диаметре 120 мм достигнуто 0,37 °/ч при времени интегрирования 1 с и 0,06 °/ч при 370 с. Рассмотрены причины, в силу которых на сегодняшний день затруднено коммерческое освоение оптических резонаторных гироскопов.

Ключевые слова: эффект Саньяка, оптический резонаторный гироскоп, резонаторный волоконно-оптический гироскоп, интегрально-оптический гироскоп, микрооптический гироскоп, пассивный кольцевой резонатор.

Введение

Принцип работы всех известных на сегодняшний день оптических гироскопов основан на эффекте Саньяка [1]. Этот эффект был впервые продемонстрирован на практике в 1913 г. Жоржем Саньяком в ходе серии экспериментов, посвященных изучению «эфира» [2]. В оптических резонаторных гироскопах угловая скорость определяется по индуцированной эффектом Саньяка разности собственных частот пассивного кольцевого резонатора.

Первый оптический резонаторный гироскоп был разработан и исследован в конце 70-х годов прошлого века [3]. Он был собран на базе открытого четырехзеркального кольцевого резонатора с квадратной конфигурацией и периметром около 70 см. При этом он предлагался в качестве альтернативы активно развивающемуся в это время лазерному гироскопу: при аналогичной чувствительности он теоретически не имел

Венедиктов Владимир Юрьевич. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (С.-Петербург).

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Шалымов Егор Вадимович. Кандидат технических наук, доцент кафедры ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

зоны захвата [3, 4]. Тем не менее первый вариант оптического резонаторного гироскопа оказался невостребованным из-за проблем, связанных с использованием открытого резонатора (например, возбуждение поперечных мод ненулевого порядка) [4] и быстрым развитием методов борьбы с зоной захвата у лазерного гироскопа.

Несколько позже (начиная с 80-х гг. [5–7]) исследования оптического резонаторного гироскопа возобновились в процессе развития классических (интерференционных) волоконно-оптических гироскопов, в которых угловая скорость измеряется по разности набега фаз встречных волн, проходящих однократно замкнутый контур интерферометра Саньяка (замкнутый контур формируется волоконной катушкой). В резонаторных волоконно-оптических гироскопах в качестве чувствительного элемента используются волоконные кольцевые резонаторы (замкнутые участки волокна, скрученные в один или более витков). В них при вращении возникает расщепление собственных частот резонатора (разность набегов фаз встречных волн накапливается при многократном обходе волнами замкнутого контура), а угловая скорость определяется по разности собственных частот резонатора. Теоретически резонаторный волоконно-оптический гироскоп позволяет при использовании волокна на несколько порядков меньшей длины достичь той же точности измерений, что и интерферометрический [7–9]. По этой причине резонаторная конфигурация стала позиционироваться как более дешевая, робастная и обладающая наибольшим потенциалом к снижению габаритов, веса и потребляемой мощности. Кроме того, благодаря более короткой длине волокна резонаторная конфигурация менее чувствительна к некоторым эффектам, например эффекту Шупе, который в интерференционном гироскопе приводит при несимметричном изменении температуры волокна к возникновению невязимости. Резонаторный гироскоп обычно не требует применения специальных приемов (например, специфических методов намотки волокна) для снижения влияния эффекта Шупе [10–12].

В то же время развитие получили конфигурации оптического резонаторного гироскопа на основе тонкопленочных одномодовых волноводов [13]. Этот тип прибора в перспективе позволяет интегрировать все свои элементы на одной подложке, за счет чего возможно существенно уменьшить габариты, а также снизить потребляемую мощность и стоимость изготовления. Такой вариант оптического резонаторного гироскопа часто называют резонаторным интегрально-оптическим, поскольку он предполагает применение технологии интегральной оптики, или резонаторным микрооптическим, учитывая его высокий потенциал в части уменьшения габаритов и использования микрооптических элементов.

Тем не менее пока оптический резонаторный гироскоп не вышел за рамки лабораторных прототипов. Это обусловлено большим количеством проблем, связанных с его практической реализацией, которые в комплексе еще не решены.

Идея оптического резонаторного гироскопа и первые прототипы

Идея, лежащая в основе оптического резонаторного гироскопа, заключается в определении угловой скорости Ω по индуцированной эффектом Саньяка разности собственных частот пассивного кольцевого резонатора [1]:

$$\Delta f_S = f_{CCW} - f_{CW} = \frac{4A}{\lambda L} \Omega, \quad (1)$$

где f_{CCW} и f_{CW} – собственные частоты пассивного кольцевого резонатора для встречных направлений его обхода (CCW – против часовой стрелки, CW – по часовой стрелке); A – площадь, охватываемая оптическим контуром резонатора; $\lambda = c/f_m$; c – скорость света в вакууме; f_m – собственная частота неподвижного резонатора; L – оптическая длина резонатора. Как видно из выражения (1), разность собственных частот Δf_s пропорциональна угловой скорости Ω и может служить ее мерой.

В первых работах по данной тематике было предложено определять разность собственных частот и соответствующую ей угловую скорость с использованием акустооптических преобразователей (частотных модуляторов) [3–5]. Соответствующая обобщенная схема приведена на рис. 1. Излучение от лазера 1 разделяется оптическим делителем 2 на два канала. В каналах установлены акустооптические преобразователи 5 и 6, частота акустических колебаний которых задается управляемыми напряжением генераторами (ГУН) 3 и 4 соответственно. Частота излучения лазера f_0 меняется при прохождении преобразователей 5 и 6: в первом канале она становится равной $f_0 + f_1$, а во втором $-f_0 + f_2$. Излучение каналов заводится в пассивный кольцевой резонатор 7 во встречных направлениях, например от первого канала в CW -направлении, от второго – CCW . Длина резонатора регулируется пьезоэлектрическим преобразователем 8. С выхода резонатора излучение первого и второго каналов направляется на фотоприемники 9 и 10 соответственно. Электронная система 11 (в первых статьях – аналоговая) согласует частоты излучения обоих каналов с собственными частотами пассивного кольцевого резонатора: по сигналу с фотоприемника 9 подстраивает преобразователем 8 частоту f_{CW} под частоту излучения первого канала $f_0 + f_1$; по разности сигналов с фотоприемников 9 и 10 подстраивает преобразователем 6 частоту излучения второго канала $f_0 + f_2$ под собственную частоту резонатора f_{CCW} . В результате разность собственных частот резонатора оказывается равна $\Delta f_s = f_2 - f_1$, что позволяет с использованием выражения (1) определять угловую скорость.

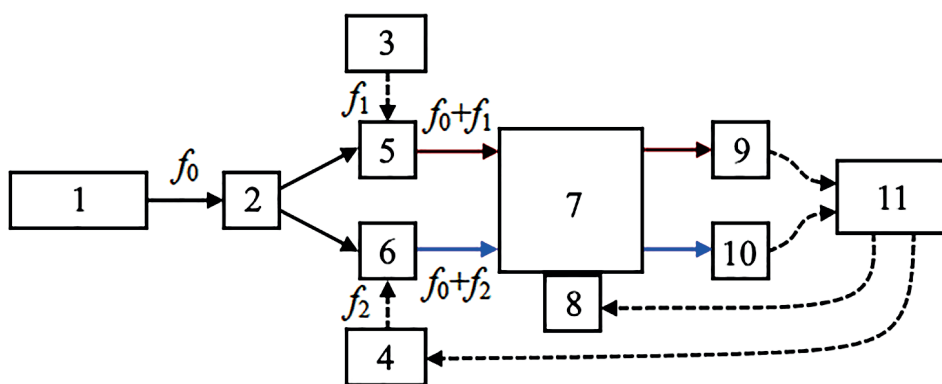


Рис. 1. Обобщенная структурная схема первых оптических резонаторных гироскопов

Согласно экспериментальной оценке, в первых работах по данной тематике были получены следующие величины случайного дрейфа оптических резонаторных гироскопов:

- 0,5 °/ч, если был задействован волоконно-оптический пассивный кольцевой резонатор радиусом около 0,5 м, а время интегрирования составило 1 с [5];

- $1,8 \times 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{ч}$, если был применен открытый четырехзеркальный кольцевой резонатор с квадратной конфигурацией и длиной стороны 0,7 м, а время интегрирования составило 4 с [4].

Стоит отметить, что предельная чувствительность этих прототипов (наименьшее изменение угловой скорости, которое принципиально может быть измерено на фоне шума) была на два порядка лучше. При этом были выявлены и основные источники погрешности измерений, препятствующие достижению предельной чувствительности: обратное рассеяние, флуктуации поляризации, оптический эффект Керра в резонаторе. Большая часть дальнейших исследований оптических резонаторных гироскопов посвящена борьбе с перечисленными источниками погрешности.

Основные источники погрешности измерений

Кратко рассмотрим основные источники погрешности измерений, характерные почти для всех оптических резонаторных гироскопов, и известные методы борьбы с ними.

Обратное рассеяние Релея на неоднородностях среды и шероховатостях границ сред приводит к связи встречных волн резонатора: *ССW*-волна интерферирует с рассеянной частью *СW*-волны и наоборот. Это приводит к погрешности измерения собственных частот резонатора [15], для минимизации которой в *СW*- и *ССW*-каналах создают дополнительный невзаимный частотный сдвиг, в частности настраивают каналы на разные продольные моды резонатора. Для этого могут использоваться различные виды фазовой модуляции [4, 5, 16–23] или несколько лазеров [24–26]. В результате волны *СW* и *ССW* имеют существенно разные частоты (разнесены по спектру на несколько межмодовых интервалов), и проявляющиеся при интерференции с обратно рассеянной волной биения могут быть исключены, например, фильтром нижних частот. Возможны также пассивные методы борьбы с этой проблемой: применение более добротных резонаторов или двух разных резонаторов для волн *СW* и *ССW* [27].

Как правило, используемые в качестве чувствительных элементов пассивные кольцевые резонаторы поддерживают существование двух ортогонально-поляризованных мод. Изменения температуры, механических напряжений в резонаторе и т.п. приводят к смещению друг относительно друга собственных частот двух ортогональных поляризаций. Это вызывает искажение форм резонансных кривых, причем оно будет непрерывно меняться, создавая дополнительный шум. Кроме того, форма резонансной кривой искажается перекрестными поляризационными помехами [5, 28]. Для уменьшения величины погрешности, вызванной флуктуациями поляризации, обычно либо стабилизируют положение собственных частот одной из ортогональных поляризаций посередине межмодового интервала другой поляризации [29–32], либо стараются использовать пассивные кольцевые резонаторы с поляризационно-зависимыми потерями (т.е. поддерживающими только одно состояние поляризации) [33–37].

Оптический эффект Керра в кольцевом резонаторе приводит к зависимости разности показателей преломления встречных волн *СW* и *ССW* от дисбаланса (разности) их мощностей [38]. Таким образом, если в двух оптических каналах гироскопа имеется дисбаланс мощностей (т.е. волны, водимые в резонатор в *СW*- и *ССW*-на-

правлениях, отличаются по мощности), то появляется дополнительный невзаимный сдвиг собственных частот встречных волн. Этот сдвиг суммируется со сдвигом, вызванным эффектом Саньяка, и приводит к дополнительной погрешности измерения угловой скорости. Для снижения погрешности чаще всего применяют активную балансировку мощностей вводимых в резонатор волн [39–43]. Возможно снизить также влияние эффекта Керра за счет прямоугольной модуляции мощности лазера со скважностью 2 [44] или измерять погрешность, вызванную эффектом Керра, и исключать ее алгоритмически при обработке выходного сигнала [45]. Существуют и пассивные методы борьбы с этой проблемой: использование кольцевого резонатора из полого фотонно-кристаллического волокна [24, 27, 46, 47], двух разных резонаторов для CW - и CCW -волн [27], увеличение эффективной площади сечения моды [48] и т.п. [49, 50].

Помимо вопросов, рассмотренных выше, есть и другие негативно влияющие на работу оптического резонаторного гироскопа факторы, например частотный шум лазера [51]. Часто при решении одной проблемы появляется новая. Так, при снижении влияния обратного рассеяния за счет использования фазовой модуляции [16] может создаваться паразитная амплитудная модуляция излучения в обоих каналах. Это приводит к дополнительной погрешности измерений [51]. Пока не было представлено комплексного решения всех имеющихся проблем. Кроме того, попытки решить в рамках одного прототипа как можно большее число проблем обычно приводят к существенному усложнению схемы гироскопа и увеличению его размера (см., например, [25]). В результате на сегодняшний день оптический резонаторный гироскоп не нашел практического применения.

Применение подходов фазово-модуляционной спектроскопии и перестраиваемого лазера

После изучения первых прототипов оптических резонаторных гироскопов было предложено изменить используемый способ согласования частот излучения двух каналов с собственными частотами пассивного кольцевого резонатора. Наиболее популярным оказалось применение для этой цели фазовых модуляторов совместно с перестраиваемым лазером. На это было несколько причин. Вследствие тенденции к миниатюризации оптических гироскопов наибольший интерес стали представлять микрооптические гироскопы, в волноводный резонатор которых встраивать пьезоэлектрический преобразователь нетехнологично. Напротив, перестраиваемый лазер способен согласовываться с любым типом оптического кольцевого резонатора, поэтому обычно он использовался в прототипах в качестве отдельного блока, хотя потенциально может быть интегрирован с другими оптическими элементами на одной подложке. Более того, применение пьезоэлектрического преобразователя для настройки собственной частоты пассивного кольцевого резонатора приводит к зависимости характеристик гироскопа от механических воздействий (ударов и вибраций). Применение электрооптических фазовых модуляторов вместо акустооптических преобразователей также способствует миниатюризации, облегчает интеграцию с волноводными элементами и увеличивает быстродействие при согласовании частот. Кроме того, электрооптические фазовые модуляторы обеспечивают большую гибкость при настройке параметров модуляции, что упрощает борьбу с обратным рассеянием.

Обобщенная схема, соответствующая применению фазовых модуляторов и перестраиваемого лазера, приведена на рис. 2. Она содержит: перестраиваемый лазер 1; оптический делитель 2; фазовые модуляторы (или системы, состоящие из нескольких модуляторов) 3 и 4; пассивный кольцевой резонатор 5; фотоприемники 6 и 7; электронную систему гироскопа 8.

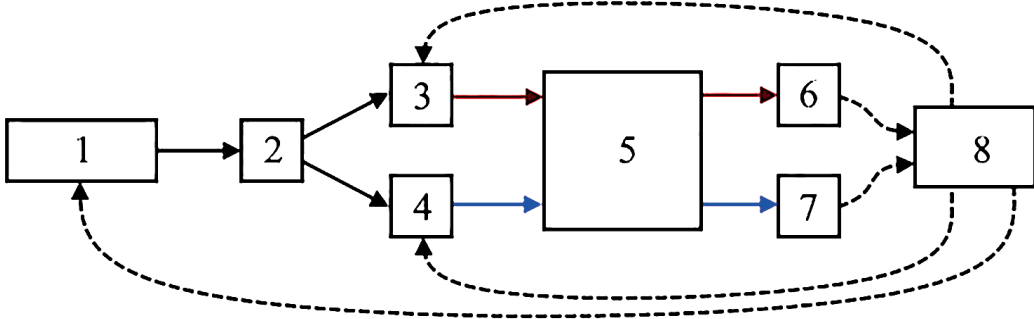


Рис. 2. Обобщенная структурная схема при применении фазовых модуляторов и перестраиваемого лазера

Фазовые модуляторы 3 и 4 модулируют фазу (а значит, и частоту) излучения в двух каналах гироскопа по периодическому (например, гармоническому) закону. Это позволяет после демодуляции сигналов с фотоприемников 6 и 7 выработать два сигнала обратной связи, определяемые смещением частот каналов от собственных частот резонатора 5 [52–54]. Первый сигнал обратной связи используется для настройки частоты излучения перестраиваемого лазера на одну из собственных частот пассивного кольцевого резонатора, например $f_{св}$. В результате этого второй сигнал несет информацию о разности собственных частот Δf_s [52]. Часто в прототипах оптических резонаторных гироскопов второй сигнал не подается на фазовый модулятор, а используется только для вычисления угловой скорости, пропорциональной Δf_s . В публикациях подобные конфигурации обычно упоминаются как «базовые» или «открытые» [29, 52]. В так называемой «замкнутой» конфигурации для повышения линейности выходной характеристики и динамического диапазона гироскопа второй сигнал подается на фазовый модулятор 4 [53, 54]. В этом случае частота излучения второго канала согласовывается с собственной частотой резонатора, соответствующей противоположному направлению его обхода (в данном примере $-f_{св}$).

Описанные выше открытая и замкнутая конфигурации имеют те же источники погрешности измерений, что и исторически первые конфигурации. Они совместимы со всеми приведенными в предыдущей главе методами, позволяющими минимизировать влияние основных источников погрешности измерений. При этом большая часть этих методов была разработана и экспериментально апробирована именно на конфигурациях оптических резонаторных гироскопов с фазовыми модуляторами и перестраиваемым лазером.

Стоит отметить, что выбор конкретного варианта модуляции может существенно влиять на характеристики гироскопа и должен учитывать множество факторов. Например, для минимизации погрешности, вызванной обратным рассеянием, фазовая модуляция должна осуществляться с подавлением несущей частоты [16]. При фа-

звой модуляции наблюдается остаточная амплитудная модуляция, которая может приводить к дополнительной погрешности измерений [51] и т.д. [17, 40]. В связи с этим значительное внимание ученые уделяют оптимизации фазовой модуляции в оптическом резонаторном гироскопе. При этом предложены и рассмотрены следующие варианты: треугольная модуляция [55–57]; гармоническая модуляция [29, 34, 58]; трапециевидная модуляция [59]; пилообразная модуляция [53, 60]; двойная фазовая модуляция (дважды используется один тип модуляции) [17, 21, 51, 61]; гибридная модуляция (применяются разные типы модуляции) [20, 37, 54, 62]. Отдельно можно выделить схемы гироскопов, использующие системы из фазовых модуляторов и акустооптических преобразователей [40, 63–65]. Помимо этого, разработаны конфигурации оптических резонаторных гироскопов, в которых настройка частот в двух каналах гироскопа на собственные частоты резонатора осуществляется двумя перестраиваемыми лазерами [24–26]. В этом случае фазовые модуляторы используются только для создания периодической модуляции излучения, необходимой для выработки сигналов обратной связи.

Волноводный резонатор из нитрида кремния с диаметром 35 мм позволяет достичь величины случайного дрейфа (полученной в результате дисперсионного анализа Аллана) $13,2$ °/ч за время интегрирования 1 ч [36], а при диаметре резонатора 60 мм – $10,4$ °/ч за 2 ч [20]. Наилучшие характеристики гироскопов получены на основе волоконных резонаторов: при диаметре резонатора 60 мм величина случайного дрейфа составляет $2,0$ °/ч за время интегрирования 1 с и $1,23$ °/ч за 5 с [23]. При увеличении диаметра до 120 мм случайный дрейф составил $0,37$ °/ч за время интегрирования 1 с и $0,06$ °/ч за 370 с [51]. При этом коммерческому освоению оптических резонаторных гироскопов, помимо описанных в предыдущей главе причин, препятствует применение в их конструкции малошумящих перестраиваемых лазеров с узкой шириной линии (10–200 кГц). Такие лазеры сравнительно громоздки, что не позволяет построить миниатюрные оптические резонаторные гироскопы. Теоретически в качестве источника можно использовать более компактные лазеры с постоянной частотой излучения и согласовать частоты каналов с собственными частотами резонатора только за счет систем модуляторов [27, 66]. Тем не менее хороших практических результатов это не дало.

Для решения проблемы предлагалось также вернуться к согласованию частот за счет настройки частоты резонатора пьезоэлектрическим преобразователем [57, 67] или термически [29]. Однако это может приводить к росту погрешностей, описанных в предыдущем разделе, а кроме того, трудно реализуемо применительно к волноводному резонатору. В качестве новых альтернативных путей решения проблемы развиваются подходы, связанные с включением пассивного кольцевого резонатора в модулятор Маха–Цендера [68, 69] или использованием самоинжекции лазера [70, 71].

Применение низкокогерентных источников излучения

В подавляющем большинстве схем и прототипов оптических резонаторных гироскопов применяются перестраиваемые высококогерентные источники излучения (лазеры). При этом именно когерентностью излучения обусловлены основные источники погрешностей измерений: оптический эффект Керра, перекрестные поляризационные помехи и обратное рассеяние. Существует альтернативный подход

к построению оптических резонаторных гироскопов, основанный на использовании низкокогерентных источников излучения, например усилителя спонтанного излучения на базе световода, легированного эрбием [72–78]. Впервые он был предложен еще в конце прошлого века [72–74] и недавно интерес к нему возобновился [75–78]. Возможны как открытые (рис. 3, а), так и замкнутые (рис. 3, б) конфигурации, при сборке которых могут быть задействованы: низкокогерентный источник излучения 1; оптический циркулятор 2; оптический делитель 3; генераторы сигнала 4 и 5; фазовые или частотные модуляторы 6 и 7; пассивный кольцевой резонатор, составленный из двух оптических направленных ответвителей 8 и 9; фотоприемник 10; электронная система 11 и отражатель 12.

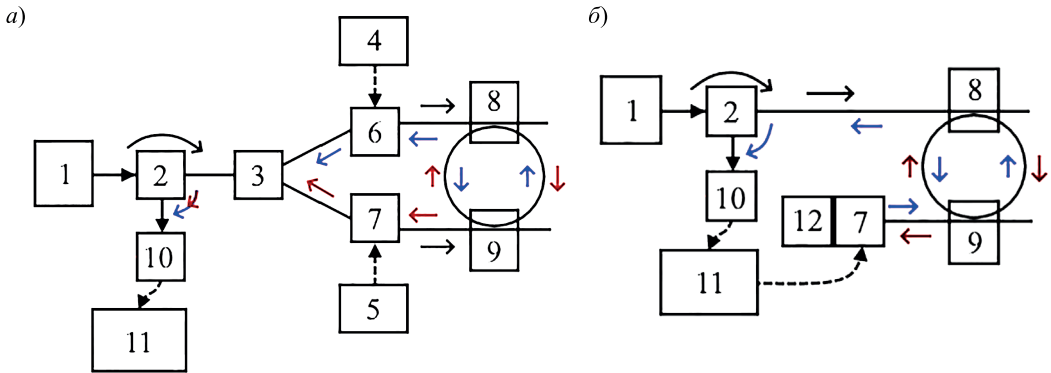


Рис. 3. Структурная схема открытой (а) и замкнутой (б) конфигураций на низкокогерентных источниках излучения

Ширина спектральной линии резонатора значительно меньше ширины линии источника. В результате в конфигурациях, приведенных на рис. 3, пассивный кольцевой резонатор работает как полосовой фильтр для волн, заводимых в два его канала (*ССW* и *СW*). В открытой конфигурации после прохождения резонатора *ССW*- и *СW*-волны сводятся вместе и интерферируют [75, 77]. При неподвижном резонаторе обе волны идентичны, и интенсивность излучения на фотоприемнике будет максимальной. При вращении за счет эффекта Саньяка частотные характеристики пассивного кольцевого резонатора для *ССW*- и *СW*-волн смещаются в противоположные стороны (собственные частоты фильтра расщепляются на Δf_s). Как следствие, меняется результат интерференции. При увеличении угловой скорости (по модулю) интенсивность излучения на фотоприемнике будет снижаться в соответствии с некоторой нелинейной монотонной функцией [75]. Эта функция может быть аналитически или экспериментально определена и занесена в электронную систему, что дает возможность измерять угловую скорость. При этом фазовые модуляторы используются в открытой конфигурации для создания частотной подставки, что позволяет выйти на максимально крутой и минимально нелинейный участок выходной характеристики и определить знак угловой скорости [75]. Замкнутая конфигурация за счет обратной связи обеспечивает линейность выходной характеристики и увеличивает диапазон измеряемых скоростей. В этом случае на одном из выходов пассивного кольцевого резонатора устанавливается компенсационная система, состоящая из модулятора и отражателя (рис. 3, б) [74, 76]. Она используется для компенсации сдвига частотных характеристик фильтра для *ССW*- и *СW*-направлений его обхода.

Т.е. одна из прошедших резонатор волн, например SW , отражается от системы, и при этом ей придается частотный сдвиг Δf , обратный Δf_s . Настройка Δf на Δf_s производится по максимуму сигнала с фотоприемника, а величина сигнала, подаваемого на компенсационную систему, будет пропорциональна угловой скорости [74, 76].

По предельной чувствительности (наименьшему изменению угловой скорости, которое принципиально может быть измерено на фоне шума) оптические резонаторные гироскопы на низкокогерентных источниках излучения принципиально проигрывают конфигурациям на высококогерентных источниках [74]. Тем не менее прототипы таких гироскопов при использовании волоконного резонатора диаметром 140 мкм позволяют достичь величины случайного дрейфа (получена в результате дисперсионного анализа Аллана) $0,009^\circ/\text{ч}$ при времени интегрирования 2000 с [75]. Благодаря высокой взаимности схем (волны в каналах гироскопа проходят одни и те же элементы), практически полному исключению влияния основных источников погрешностей измерений и возможности применения низкокогерентных источников излучения, аналогичных источникам интерференционных волоконно-оптических гироскопов, этот тип гироскопов достаточно перспективен для коммерческого освоения.

Заключение

Оптические резонаторные гироскопы определяют угловую скорость по индуцированной эффектом Саньяка разности собственных частот пассивного кольцевого резонатора. За счет использования в качестве чувствительного элемента пассивного кольцевого резонатора этот тип оптических гироскопов принципиально имеет наибольший потенциал к миниатюризации. Максимально раскрыть этот потенциал позволяет применение для изготовления пассивного кольцевого резонатора и других оптических элементов гироскопа технологии интегральной оптики. В этом случае оптические резонаторные гироскопы обычно называют микрооптическими [19, 26, 30, 37, 40, 41, 43, 54, 70, 71].

Возможны различные подходы к построению гироскопов этого типа. Исторически первой является схема с согласованием частот излучения двух каналов с собственными частотами пассивного кольцевого резонатора за счет настройки частоты резонатора пьезоэлектрическим преобразователем и частоты одного из каналов акустооптическим преобразователем.

Наиболее популярный на сегодняшний день подход предполагает использование для согласования частот фазовых модуляторов совместно с перестраиваемым лазером. На сегодняшний день в его рамках отработаны различные методы борьбы с влиянием основных источников погрешности измерений – обратного рассеяния, флуктуаций поляризации и оптического эффекта Керра. Вместе с тем при устранении одной проблемы часто появляется новая, и пока их комплексного решения представлено не было. Кроме того, попытки решить в рамках одного прототипа гироскопа как можно большее число проблем обычно приводят к существенному усложнению его схемы и увеличению его размера. Это, а также применение в их конструкции маломощных перестраиваемых лазеров с узкой шириной линии (10–200 кГц), которые на сегодняшний день слишком громоздки (в разы превышают размеры чувствительного элемента), препятствует коммерческому освоению данного типа гироскопа.

Существует альтернативный подход, основанный на использовании низкокогерентных источников излучения. В этом случае применяются схемы с высокой взаимностью и практически полностью исключается влияние основных источников погрешностей измерений без каких-либо дополнительных действий. Кроме того, существует возможность привлечения источников излучения, аналогичных источникам интерференционных волоконно-оптических гироскопов. Благодаря этим факторам данный подход построения оптических резонаторных гироскопов в практическом смысле становится более востребованным и перспективным для коммерческого освоения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSEE-2020-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Malykin, G.B.**, The Sagnac effect: correct and incorrect explanations, *Phys. Usp.*, 2000, vol. 43, no. 12, p. 1229.
2. **Sagnac, G.**, L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme, *Comptes Rendus*, 1913, vol. 157, pp. 708–710.
3. **Ezekiel, S., Balsamo, S.R.**, Passive ring resonator laser gyroscope, *Appl. Phys. Lett.*, 1977, vol. 30, no. 9, p. 478.
4. **Sanders, G.A., Prentiss, M.G., Ezekiel, S.**, Passive ring resonator method for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity, *Opt. Lett.*, 1981, vol. 6, no. 11, pp. 569–571.
5. **Meyer, R.E., Ezekiel, S., Stowe, D.W., Tekippe, V.J.**, Passive fiber-optic ring resonator for rotation sensing, *Opt. Lett.*, 1983, vol. 8, no. 12, pp. 644–646.
6. **Ohtsu, M., Araki, S.**, Using a 1.5- μm DFB InGaAsP laser in a passive ring cavity-type fiber gyroscope, *Appl. Opt.*, 1987, vol. 26, no. 3, pp. 464–470.
7. **Ezekiel, S., Cole, J.A., Harrison, J., Sanders, G.**, Passive cavity optical rotation sensor, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1978, vol. 157, p. 68.
8. **Lefevre, H.C.**, The Fiber Optic Gyroscope, Boston, MA, USA, Artech House, 2014, pp. 15–18.
9. **Armenise, M.N., Ciminelli, C., Dell'olio, F.**, Advances In Gyroscope Technologies, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, Springer, 2010, pp. 29–49.
10. **Shupe, D.M.**, Fiber resonator gyroscope: sensitivity and thermal nonreciprocity, *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, pp. 286–289.
11. **Carroll, R., Coccoli, C.D., Cardarelli, D., Coate, G.T.**, The Passive Resonator Fiber Optic Gyro and Comparison to the Interferometer Fiber Gyro, *Proc. SPIE*, 1987, vol. 0719, pp. 169–177.
12. **Hotate, K., Kikuchi, Y.**, Analysis of the thermo-optically induced bias drift in resonator fiber optic gyro, *Proc. SPIE*, 2001, vol. 4204, pp. 81–88.
13. **Haavisto, J.R.**, Thin-Film Waveguides For Inertial Sensors, *Proc. SPIE*, 1983, vol. 0412, pp. 221–228.
14. **Rosenthal, A.H.**, Regenerative Circulatory Multiple-Beam Interferometry for the Study of Light-Propagation Effects, *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, vol. 52, no. 10, pp. 1143–1148.
15. **Iwatsuki, K., Hotate, K., Higashiguchi, M.**, Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro, *Appl. Opt.*, 1984, vol. 23, no. 21, pp. 3916–3924.
16. **Ma, H., He, Z., Hotate, K.**, Reduction of Backscattering Induced Noise by Carrier Suppression in Waveguide-Type Optical Ring Resonator Gyro, *J. Lightwave Technol.*, 2011, vol. 29, no. 1, pp. 85–90.
17. **Wang, J., Feng, L., Wang, Q., Wang, X., Jiao, H.**, Reduction of Angle Random Walk by In-Phase Triangular Phase Modulation Technique for Resonator Integrated Optic Gyro, *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 5463–5468.
18. **Zhu, J., Liu, W., Pan, Z., Tao, Y., Yin, S., Tang, J., Liu, J.**, Combined Frequency-Locking Technology of a Digital Integrated Resonator Optic Gyroscope with a Phase-Modulated Feedback Loop, *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, no. 36, pp. 9914–9920.

19. Mao, H., Ma H., Jin, Z., Resonator micro-optic gyroscope based on the double phase modulation technique, *CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications, San Jose, CA, USA*, 2010, pp. JWA52.
20. Wang, Q., Feng, L., Li, H., Wang, X., Jia, Y., Liu, D., Enhanced differential detection technique for the resonator integrated optic gyro, *Opt Lett.*, 2018, vol. 43, no. 12, pp. 2941–2944.
21. Liu, L., Liu, S., Hu, J., Ma, H., Jin, Z., Resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation and double demodulation technique, *Opt Express.*, 2022, vol. 30, no. 7, pp. 12192–12203.
22. Zhang, Y., Feng, L., Li, H., Jiao, H., Liu, N., Zhang, C., Resonant fiber optic gyroscope with three-frequency differential detection by sideband locking, *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 6, pp. 8423–8435.
23. Liu, L., Li, H., Liu, S., Jin, Z., Ma, H., Suppressing backscattering noise of a resonant fiber optic gyroscope using coherent detection, *Appl. Opt.*, 2022, vol. 61, no. 15, pp. 4421–4428.
24. Benser, E., Sanders, G., Smickilas, M., Wu, J., Strandjord, L., Development and evaluation of a navigation grade resonator fiber optic gyroscope, *2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS), Karlsruhe, Germany*, 2015, pp. 1–11.
25. Strandjord, L.K., Qiu, T., Salit, M., Narayanan, C., Smickilas, M., Wu, J., Sanders, G.A., Improved Bias Performance in Resonator Fiber Optic Gyros using a Novel Modulation Method for Error Suppression, in *26th International Conference on Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2018)*, 2018, p. ThD3.
26. Niu, J., Liu, W., Pan, Z., Tao, Y., Zhou, Y., Xing, E., Tang, J., Liu, J., The Noise Suppression in Resonant Micro Optic Gyroscopes Based on Dual Light Sources Method, *Optics Communications*, 2021, vol. 488, p. 126839.
27. Shen, H., Chen, K., Zou, K., Gong, Y., Bi, R., Shu, X., A Hollow-Core Photonic-Crystal Fiber-Optic Gyroscope Based on a Parallel Double-Ring Resonator, *Sensors (Basel)*, 2021, vol. 21, no. 24, p. 8317.
28. Iwatsuki, K., Hotate, K., Higashiguchi, M., Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro. *Appl Opt.* 1986, vol. 25, no. 15, pp. 2606–2612.
29. Strandjord, L.K., Sanders, G.A., Resonator fiber optic gyro employing a polarization-rotating resonator, *Proc. SPIE*, 1992, vol. 1585, pp. 163–172.
30. Ma, H., Yan, Y., Chen, Y., Jin, Z., Improving Long-Term Stability of a Resonant Micro-Optic Gyro by Reducing Polarization Fluctuation, *IEEE Photonics Journal*, 2012, vol. 4, no. 6, pp. 2372–2381.
31. Ma, H., Chen, Z., Yang, Z., Yu, X., Jin, Z., Polarization-induced noise in resonator fiber optic gyro, *Appl. Opt.*, 2012, vol. 51, no. 28, pp. 6708–6717.
32. Bobbili, P.R., Nayak, J., Pinnaji, P.D., Reddy, D.V.R.K., Parameter optimization analysis to minimize the polarization error in a localized thermal tunable fiber ring resonator gyro, *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, no. 8, pp. 1996–2001.
33. Ma, H., Zhang, J., Chen, Z., Jin, Z., Tilted Waveguide Gratings and Implications for Optical Waveguide-Ring Resonator, *J. Lightwave Technol.*, 2015, vol. 33, no. 19, pp. 4176–4183.
34. Yan, Y., Ma, H., Jin, Z., Reducing polarization-fluctuation induced drift in resonant fiber optic gyro by using single-polarization fiber, *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 3, pp. 2002–2009.
35. Feng, C., Zhang, D., Zhang, Y., Qing, C., Ma, H., Li, H., Feng, L., Resonant integrated optical gyroscope based on Si3N4 waveguide ring resonator, *Opt. Express*, 2021, vol. 29, no. 26, pp. 43875–43884.
36. Feng, C., Zhang, Y., Ma, H., Li, H., Feng, L., Improving long-term temperature bias stability of an integrated optical gyroscope employing a Si3N4 resonator, *Photon. Res.*, 2022, vol. 10, no. 7, pp. 1661–1668.
37. Liu, S., Lin, Y., Jin, X., Ma, H., Jin, Z., Polarization error in resonant micro-optic gyroscope with different waveguide-type ring resonator structures, *Appl. Opt.*, 2022, vol. 61, no. 15, pp. 4287–4295.
38. Iwatsuki, X., Hotate, K., Higashiguchi, M., Kerr Effect in Optical Passive Ring-Resonator Gyros, *Optical Fiber Sensors (Optica Publishing Group, 1985)*, 1985, p. ThGG13.
39. Takiguchi, K., Hotate, K., Method to reduce the optical kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, vol. 4, no. 2, pp. 203–206.
40. Li, X., Zhang, J., Ma, H., Jin, Z., Test and Analysis of the Optical Kerr-Effect in Resonant Micro-Optic Gyros, *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 1–7.
41. Ma, H., Li, X., Zhang, G., Jin, Z., Reduction of optical Kerr-effect induced error in a resonant micro-optic gyro by light-intensity feedback technique, *Appl Opt.*, 2014, vol. 53, no. 16, pp. 3465–3472.
42. Yin, S., Liu, W., Xing, E., Pan, Z., Tao, Y., Zhu, J., Tang, J., Tang, J., Suppression of laser intensity fluctuation in resonator optical gyro by a simple light intensity feedback technique, *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 3, p. 036112.
43. Niu, J., Liu, W., Pan, Z., Tao, Y., Zhou, Y., Xing, E., Liu, J., Tang, J., Reducing backscattering and the Kerr noise in a resonant micro-optic gyro using two independent lasers, *Appl. Opt.*, 2021, vol. 60, no. 10, pp. 2761–2766.

44. Iwatsuki, K., Hotate, K., Higashiguchi, M., Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro, *Journal of Lightwave Technology*, 1986, vol. 4, no. 6, pp. 645–651.
45. Ying, D., Ye, K., Wang, Z., Xie, T., Jin, Z., A harmonic subtraction technique to suppress intensity modulation induced Kerr effect drift in a closed-loop RFOG, *Optics Communications*, 2018, vol. 426, pp. 562–569.
46. Yu, X., Liao, Y., Zhang, M., Shi, Q., Yu, Y., Li, D., Kerr effect in a passive optical ring-resonator gyroscope using a hollow-core photonic-band fiber, *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6830, p. 683024.
47. Ying, D., Demokan, M.S., Zhang, X., Jin, W., Analysis of Kerr effect in resonator fiber optic gyros with triangular wave phase modulation, *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 3, pp. 529–535.
48. Filatov, Y.V., Kukaev, A.S., Shalymov, E.V., Venediktov, V.Yu., Investigation of a ring confocal resonator sample designed to work as an optical resonator gyroscope sensitive element, *Proc. SPIE*, 2022, vol. 12274, pp. 1227417.
49. Ito, T., Hotate, K., Closed-loop operation in the resonator fiber optic gyro using faraday effect with a twisted single-mode-fiber resonator, in *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, 1996, vol. 2837, pp. 260–271.
50. Wang, Z., Wang, G., Gao, W., Cheng, Y., Suppression of Kerr-effect induced error in resonant fiber optic gyro by a resonator with spun fiber, *Opt. Express*, 2021, vol. 29, no. 13, pp. 19631–19642.
51. Li, H., Lin, Y., Liu, L., Ma, H., Jin, Z., Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique, *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 12, pp. 18103–18111.
52. Zhang, X., Ma, H., Jin, Z., Ding, C., Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique, *Appl. Opt.* 2006, vol. 45, no. 31, pp. 7961–7965.
53. Jin, Z., Yu, X., Ma, H., Closed-loop resonant fiber optic gyro with an improved digital serrodyne modulation, *Optics express*, 2013, vol. 21, no. 22, pp. 26578–26588.
54. Ma, H., Zhang, J., Wang, L., Jin, Z., Double closed-loop resonant micro optic gyro using hybrid digital phase modulation, *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 12, pp. 15088–15097.
55. Ying, D., Ma, H., Jin, Z., Resonator fiber optic gyro using the triangle wave phase modulation technique, *Optics Communications*, 2008, vol. 281, no. 4, pp. 580–586.
56. Ma, H., Chen, Y., Li, M., Jin, Z., Transient response of a resonator fiber optic gyro with triangular wave phase modulation, *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 32, pp. 6253–6263.
57. Jiang, Z., Hu, Z., Kang, W., Wang, J., Fu, C., Residual intensity modulation-induced error in resonator fiber optic gyroscopes with triangular phase modulation, *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, no. 27, pp. 7597–7602.
58. Ma, H., Yu, X., Jin, Z., Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator integrating in-line polarizers, *Opt. Lett.*, 2012, vol. 37, no. 16, pp. 3342–3344.
59. Wang, J., Feng, L., Tang, Y., Zhi, Y., Resonator integrated optic gyro employing trapezoidal phase modulation technique, *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 2, pp. 155–158.
60. Hotate, K., Harumoto, M., Resonator Fiber Optic Gyro using Digital Serrodyne Modulation, in *Optical Fiber Sensors (Optica Publishing Group, 1996)*, pp. Tu35.
61. Mao, H., Ma, H., Jin, Z., Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique, *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 4632–4643.
62. Feng, L., Lei, M., Liu, H., Zhi, Y., Wang, J., Suppression of backreflection noise in a resonator integrated optic gyro by hybrid phase-modulation technology, *Appl. Opt.*, 2013, vol. 52, no. 8, pp. 1668–1675.
63. Hotate, K., Takiguchi, K., Hirose, A. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, vol. 2, no. 1, pp. 75–77.
64. Jiao, H., Feng, L., Zhang, C., Liu, N., Zhang, Y., Ma, H., Design of low-crosstalk polarizing resonator and homologous multi-frequency differential detection for hollow-core photonic-crystal fiber optic gyro, *Opt. Express*, 2019, vol. 27, no. 14, pp. 19536–19547.
65. Jiao, H., Wang, T., Gao, H., Feng, L., Ma, H., Dynamic Free-Spectral-Range Measurement for Fiber Resonator Based on Digital-Heterodyne Optical Phase-Locked Loop, *Optics and Photonics J.*, 2021, vol. 11, pp. 332–340.
66. Ma, H., Zhang, X., Jin, Z., Ding, C., Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique, *Optical Engineering*, 2006, vol. 45, no. 8, p. 080506.
67. Duan, R., Feng, L., Jiao, H., Wang, X., Research on Reducing the Influence of Laser Frequency Noise on Resonator Optical Gyro, *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 8, pp. 2422–2427.

68. Filatov, Y.V., Kukaev, A.S., Nikolaeva, N.A., Shalymov, E.V., Venediktov, V.Y., Method for measuring angular velocity using a passive ring resonator and a Mach-Zehnder modulator, *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 7, p. 074106.
69. Filatov, Y.V., Gilev, D.G., Goncharova, P.S., Krishtop, V.V., Kukaev, A.S., Ovchinnikov, K.A., Sevryugin, A.A., Shalymov, E.V., Venediktov, V.Y., Experimental Investigation of an Optical Resonator Gyroscope with a Mach-Zehnder Modulator and Its Sensitive Elements, *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 1, p. 4.
70. Geng, J., Yang, L., Zhao, S., Zhang, Y., Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking, *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 22, pp. 32907–32915.
71. Li, Y., Liu, W., Pan, Z., Tao, Y., Zhang, W., Xing, T., Xing, E., Zhou, Y., Tang, J., Liu, J., Self-injection locking technique for resonant micro-optical gyroscope, *Optical Engineering*, 2022, vol. 60, no. 1, p. 014103.
72. Новиков М.А., Иванов В.В. Оптический гироскоп с пассивным кольцевым резонатором. Российское агентство по патентам и товарным знакам. Патент на изобретение № 2124185. Приоритет от 13.05.97.
73. Новиков М.А., Иванов В.В. Резонансная кольцевая интерферометрия на некогерентном свете // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 17. С. 24–29.
74. Иванов В.В., Новиков М.А., Геликонов В.М. Наблюдение эффекта Саньяка в кольцевом резонансном интерферометре с низкокогерентным источником света // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 2. С.119–124.
75. Zhao, S., Liu, Q., Liu, Y., Ma, H., He, Z., Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry, *Photon. Res.*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 542–549.
76. Zhao, S., Liu, Q., Ma, H., He, Z., White-light-driven resonant fiber-optic gyro based on round trip filtering scheme, *Opt. Lett.*, 2022, vol. 47, no. 5, pp. 1137–1140.
77. Liu, S., Liu, L., Hu, J., Liu, Q., Ma, H., He, Z., Reduction of relative intensity noise in a broadband source-driven RFOG using a high-frequency modulation technique, *Opt. Lett.*, 2022, vol. 47, no. 19, pp. 5100–5103.
78. Ovchinnikov, K.A., Gilev, D.G., Krishtop, V.V., Volyntsev, A.B., Maximenko, V.A., Garkushin, A.A., Filatov, Y.V., Kukaev, A.S., Sevryugin, A.A., Shalymov, E.V., Venediktova, A.V., Venediktov, V.Y., A Prototype for a Passive Resonant Interferometric Fiber Optic Gyroscope with a 3×3 Directional Coupler, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, p. 1319.

Venediktov, V.Yu., Filatov, Yu.V., and Shalymov, E.V. (St. Petersburg State Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia)
State-of-the-Art Optical Resonator Gyroscopes, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 1 (120), pp. 45–57.

Abstract. The paper discusses the modern state of optical resonator gyroscopes. The basic concept of this type of gyros is described. The main approaches to their design and the method for angular rate measurement are considered, with the main focus made on the pioneer and most popular approach based on the use of phase modulation spectroscopy and a tuned laser. An alternative approach based on low-coherent sources of light is also analyzed. The main sources of measurement errors and the methods to overcome them are considered. The best value of random drift has been so far achieved using fiber ring resonators: 2.0 deg/h with the ring diameter 60 mm and the integration time 1 s, and 1.23 deg/h in 5 s; with the diameter 120 mm, 0.37 deg/h has been achieved with the integration time 1 s and 0.06 deg/h with 370 s. The reasons that currently hinder the commercial development of optical resonator gyros are studied.

Key words: Sagnac effect, optical resonator gyro, resonant fiber-optic gyro, integrated optical gyro, micro-optic gyro, passive ring resonator.

Материал поступил 22.02.2023