



УДК 681.2.083:681.2.084

О физических основах работы сверхвысокочастотных электромагнитно-волновых гироскопов, базирующихся на эффекте Саньяка



П. К. Плотников, Л. А. Мельников, Ю. А. Мажирин

Плотников Пётр Колестратович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., plotnikovpk@mail.ru

Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры «Приборостроение», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., lam-pels@ya.ru

Мажирин Юлия Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Приборостроение», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., mazhirinayua@ya.ru

Излагаются физические основы трёх разновидностей СВЧ-гироскопов. На основе аналогий с оптическими гироскопическими устройствами выводятся соотношения для выходных характеристик, основных параметров гироскопов сверхвысокочастотного радиоволнового диапазона на основе магнетрона, настраиваемого напряжением (митрона), и для СВЧ-гироскопов на основе резонаторного волновода и гироскопов катушечного типа. Результаты могут быть использованы для определения основных параметров и свойств приборов, сопоставления расчетов с параметрами и свойствами лазерных, волоконно-оптических и других гироскопов, а также при обсуждении возможности их реализации и последующего применения на подвижных объектах.

Ключевые слова: радиочастотный гироскоп, эффект Саньяка, митрон, магнетрон, замедленные волны, показатель преломления, параметр замедления.

Поступила в редакцию: 28.11.2019 / Принята: 15.02.2020 / Опубликовано: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-193-201>

1. Состояние исследуемого вопроса и постановка задачи

В настоящее время известны гироскопы двух классов: гироскопы, основанные на принципах классической механики [1], и гироскопы, основанные на новых физических принципах – теории относительности и квантовой механики. Последние, в свою очередь, подразделяются в основном на два подкласса.

1. Гироскопы, базирующиеся на свойствах элементарных частиц, сходных со свойствами классических гироскопов, а именно: на свойстве сохранять угловое положение оси собственно-

го вращения в пространстве неизменным и на свойстве прецессии. К этой разновидности относятся ядерные (корпускулярные) [2], ионные и радиоизотопные гироскопы. К ним также можно отнести поляризационные гироскопы в силу свойства сохранения ими инерциального характера плоскости поляризации электромагнитных волн при поворотах основания вокруг оси поляризатора или резонатора. К этой же разновидности можно отнести и некоторые другие типы гироскопов [2].

2. Гироскопы, базирующиеся на эффекте Саньяка (ГЭС), т. е. на зависимости разности фаз встречных потоков электромагнитных волн или материальных элементарных частиц в кольцевых интерферометрах от абсолютной угловой скорости. Эффект предсказан в [3], а подтвержден Саньяком экспериментально [4]. В [5] выделены этапы развития трех поколений ГЭС:

- 1 – лазерные гироскопы (ЛГ),
- 2 – волоконно-оптические гироскопы (ВОГ),
- 3 – гироскопы на «медленных» волнах.

Известно, что ЛГ были продемонстрированы сразу после создания лазеров. Важные положения их теории были изложены в первых статьях [6, 7]. Развитие теории, а также состояние теории, применения и перспективы развития изложены в ряде обзорных трудов, в том числе [5, 8–14 и др.].

К ГЭС относятся гироскопы радиоволнового диапазона, а также СВЧ-диапазонов и близких к ним разновидностей гироскопов. В патенте [15] заявлен СВЧ-гироскоп радиотехнического типа с многоступенчатыми гетеродинами для снижения исходных высоких частот выходов одного-двух круговых волноводных резонаторов до значений, при которых удобно определять фазу Саньяка. Она пропорциональна измеряемой угловой скорости основания. В патенте [16] также описана одна из схем гироскопа с круговым волноводом с электромагнитными встречными потоками волн и выявлением разности фаз Саньяка. В [17] изложены теоретические проработки схем гироскопов с замкнутыми контурами встречных потоков электронов с нахождением фазы Саньяка. В [18] – гироскопов на поверхностных акустических волнах (ПАВ), а в [19] – на магнитостатических волнах. Последние три типа гироскопов пока не нашли практического применения из-за низкой чувствительности.



В данной работе излагаются физические основы трех разновидностей СВЧ-гироскопов. На основе аналогий между оптическими гироскопическими устройствами и микроволновыми получены соотношения для выходных характеристик, основных параметров гироскопов сверхвысокочастотного радиоволнового диапазона на основе магнетрона, настраиваемого напряжением (митрона) [20–24], а также для СВЧ-гироскопов на основе резонаторного волновода [15, 25, 22, 26], а также катушечного типа [27]. Результаты могут быть использованы для определения основных параметров и свойств приборов, сопоставления расчетов с параметрами и свойствами ЛГ, ВОГ и других гироскопов, а также при обсуждении возможности их реализации и последующего применения на подвижных объектах.

2. Физические основы работы

Первый СВЧ-гироскоп был описан в [28] его автором И. Л. Берштейном в 1950 г. Прибор представлял собой экспериментальный образец, в котором был обнаружен вихревой эффект Саньяка. В нем разность фаз сигналов двух встречных потоков электромагнитных радиоволн СВЧ диапазона частоты 30.4 МГц пропорциональна абсолютной угловой скорости поворота барабана с намотанным на нем 250-метровым коаксиальным кабелем-волноводом. Недостатки этого образца – низкая чувствительность, необходимость переключать направление распространения волн в кабеле и большие габариты – были устранены в ЛГ и ВОГ, нашедших широкое практическое применение. Некоторые недостатки схемы [28] устраняются и в указанных выше разновидностях СВЧ-гироскопов. Главное их достоинство – способность функционировать в более тяжелых по сравнению с другими приборами условиях работы: при ударах, больших скоростях и ускорениях углового и поступательного движений, при радиации, при температурных и других возмущениях. В магнетронных приборах присутствует источник магнитного поля с достаточно большой напряженностью, существенно превышающей напряженность магнитного поля Земли. Это приводит к тому, что небольшие изменения магнитного поля из-за ориентации прибора или присутствия сторонних полей не влияют на характеристики СВЧ-гироскопов. Электроны в СВЧ-гироскопах движутся под действием скрещенных магнитных и электрических полей по окружностям с большой угловой скоростью (циклотронное движение). Причем центры окружностей участвуют в мед-

ленном, по сравнению с циклотронной частотой, дрейфовом движении, которое происходит синхронно с замедленной электромагнитной волной. Эти движения мало-чувствительны к ускорениям, в том числе вызванным вибрациями. Срок службы СВЧ-приборов составляет сотни тысяч часов, что существенно превышает срок службы приборов, основанных на лазерном эффекте в смеси гелия и неона в лазерных гироскопах, вследствие утечек гелия или изменения состава смеси. Это может быть важным фактором при выборе того или иного типа приборов в тех случаях, когда нет нужды в высокой точности измерений.

Рассматриваемые три разновидности СВЧ-гироскопов будем обозначать как:

СВЧ-ГМ (гироскоп – магнетрон) на основе магнетрона, настраиваемого напряжением, т. е. митрона [16];

СВЧ-ГВ (гироскоп – волновод) на основе волновода-резонатора [25];

СВЧ-ГБ (гироскоп Берштейна) на основе гироскопа И. Л. Берштейна или его аналогов [27, 28].

Основные формулы для вычисления выходных характеристик получены из теории ЛГ и ВОГ, построенной в соответствии с положениями теории относительности, изложенными, в частности, в [3–4, 6, 12, 14 и др.], а также с учётом теории митронов и магнетронов [24, 26]. Основная идея состоит в том, что коэффициент преломления в оптических средах совпадает с коэффициентом замедления волны в замедляющей системе магнетрона, т.е. в СВЧ-электромагнитных полях. Это позволило применить с корректировкой соответствующие соотношения из теории оптических гироскопов в теории СВЧ-гироскопов.

2.1. Гироскоп-митрон

Сверхвысокочастотный гироскоп на основе митрона – гироскоп-митрон (ГМ) – является аналогом лазерного гироскопа [20]. Это рассмотрение относится и к гироскопу-магнетрону. Гироскоп состоит из двух митронов, развернутых относительно друг друга на 180° так, что векторы индукции магнитов коллинеарны измерительной оси подвижного объекта и направлены встречно. Работа гироскопа основана на вихревом эффекте Саньяка, т.е. на принципе сложения угловых скоростей вращения бегущих электромагнитных волн, синхронных с вращением «электронных спиц», и поворота подвижного объекта (ПО) с выделением разностной частоты двух встречно бегущих потоков волн, пропорциональной абсолютной угловой скорости ПО. В отличие от ЛГ «спицы» в каждом митроне вращаются в одну сторону, поэтому при-



менены два митрона, а также схема выделения их разностной частоты. В [20] описан прибор, состоящий из двух отдельных митронов, что приводит к большой погрешности при отличии их масштабных коэффициентов. В [23] представлено техническое решение, при котором оба митрона размещены в едином герметичном корпусе так, что их резонаторы имеют общую часть с единичными магнитом (оно слабое по сравнению с обычными митронами) и электрическим полями. Кроме того, митроны имеют одни и те же источники питающих напряжений. В [24] применена схема вычитания частот не на резисторах, а на волноводе для повышения точности устройства.

В нормальном режиме на подвижном объекте прибор ГМ работает следующим образом. После включения питания электронные пушки начинают инжектировать электронные потоки в пространства взаимодействий, находящиеся между катодами и анодными системами. Электроны попадают в скрещенные магнитные и электрические поля и под действием радиальных электростатических сил и тангенциальных сил Лоренца начинают двигаться по окружностям с циклотронной частотой. Электроны отдают свою энергию электромагнитному полю при синхронизме, когда вращение электронного облака и электронных спиц происходит синхронно с распространением электромагнитной волны в азимутальном направлении в замедляющей системе. Возникают бегущие электромагнитные волны, характеризуемые колебаниями π -типа, фазовые скорости распространения этих волн являются замедленными по сравнению со скоростью света.

Конструктивная схема резонансного гироскопа сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ-ГМ) представлена в [20].

Рассмотрим работу прибора при настройке и в нормальном режиме функционирования. После подключения питающих напряжений вначале к накальным катодам, а затем к анодам с помощью переменных резисторов производят настройку частот колебаний митронов, контролируя их по показаниям прецизионного частотомера до полного уравнивания. Прибор при этом должен быть установлен измерительной осью в направлении, при котором измеряемая угловая скорость равна нулю, например, направление Восток – Запад. Питание от прибора отключают и его устанавливают на подвижном объекте.

В нормальном режиме прибор работает следующим образом. За счет перевернутого положения

второго митрона по отношению к первому направления вращения электронных втулок со спицами являются встречными. При отсутствии измеряемой угловой скорости частоты вращения спиц одинаковы, а разность частот равна нулю. При наличии вращения объекта вокруг измерительной оси с абсолютной угловой скоростью Ω частота выходного сигнала, например, в первом митроне, уменьшается на величину, пропорциональную Ω , а во втором – на эту же величину возрастает. Разность частот выходных сигналов резонаторов митронов пропорциональна измеряемой угловой скорости. Сигналы снимаются электродами анодов и вводятся в систему вычитания. Следует отметить, что в СВЧ-магнетроне генерация происходит на одной волне (а не на двух встречных волнах), т. е. эффект связи встречных волн отсутствует. Но при этом приходится использовать два идентичных магнетрона для измерения угловой скорости вращения. Появление сдвига частоты во вращающемся магнетроне можно пояснить следующим образом. Азимутальная зависимость поля в кольцевом резонаторе замедляющей системы может быть записана как $\exp(im\varphi)$, где m – целое число. Для типа колебания, при котором поля в соседних резонаторах колеблются в противофазе, m следует заменить на $N/2$, где N – число резонаторов в анодном блоке. При вращении анодного блока с угловой скоростью Ω находящиеся в инерциальном пространстве электроны будут воспринимать осциллирующее поле в резонаторах анодного блока с собственной частотой ω в неподвижном блоке на частоте $\omega + N\Omega/2$ вследствие пространственной модуляции поля [21], так как можно записать, что азимутальные углы в инерциальной и вращающейся системе координат связаны соотношением $\varphi' = \varphi + \Omega t$. На этой же частоте и будет происходить генерация из-за синхронизма вращения спиц и изменения поля. Так как направления вращения электронных облаков в митронах противоположны, то разностная частота $\Delta\omega = K_M \cdot \Omega$, где K_M – безразмерный масштабный коэффициент, т. е. с учетом изложенного выше $K_M = N$. Для выходного сигнала в круговых частотах он является безразмерным. K_M^K – масштабный коэффициент для выходного сигнала, в обычных частотах имеет размерность рад^{-1} .

Пример. Получим выражение для масштабного коэффициента K_M^K для $N = 4$. Как следует из соображений, приведенных выше, частота митрона соответствует частоте поля в резонаторах анодного блока, измененной из-за вращения. Ко-



эффицент K_M^K в случае отсчета выходного сигнала $\Delta\nu$ в обычных частотах, т.е. при $\Delta\omega_k = 2\pi\Delta\nu$, определяется выражением $K_M^K = \frac{4}{2\pi}$.

Значит $\Delta\nu = 4\Omega / 2\pi$, и $\Omega = 0.01$ рад/с.

$\Delta\omega_k = 0.04$ рад/с = 137.51 угл. мин/с.

Параметры вполне приемлемы для реализации, но для выходного сигнала СВЧ-ГМ прежде всего не по частоте, а по интегралу от этой частоты (углу поворота):

$$\frac{d\psi_k}{dt} = K_M^K \Omega(t); \quad \psi^k = \psi^k(0) + \int_0^t 4\Omega(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\psi^k(0)$, $\psi^k(t)$ – начальный и текущий фазовые углы периодически изменяющегося разностного выходного сигнала. Величина масштабного коэффициента сравнима с аналогичной для широко используемых волновых твердотельных гироскопов.

Следует отметить, что в качестве чувствительных элементов СВЧ-ГМ можно применять многорезонаторные магнетроны, в которых обеспечивается большая стабильность несущей частоты, но сложнее осуществлять их перестройку в связи с более высокой, чем у митронов, добротностью резонаторов. Для функционирования чувствительных элементов достаточна мощность потребления на уровне долей-единиц Ватт в отличие от их обычного промышленного применения.

Нетрудно видеть, что масштабный коэффициент ГМ на несколько порядков меньше, чем в ЛГ. Но в ряде применений это не имеет решающего значения. Недостатком прибора является невозможность обеспечения одинаковости масштабных коэффициентов, приводящих к разности их частот даже при невращающемся объекте. С целью устранения этого недостатка было предложено несколько решений [22–25, 29, 30], одними из перспективных являются одномагнетронные гироскопы [29, 30].

Частота магнетрона при вращении изменяется на $\Delta\nu$ из-за эффекта Саньяка:

$$\nu = \nu_0 + \Delta\nu. \quad (2)$$

На выходе микропроцессора наблюдают разность частот, равную:

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \nu - \frac{4S}{4L}, \quad (3)$$

где $S = \pi R^2$ – площадь контура, охватываемого осевой линией замедляющей системы, L – периметр этого контура, R – полусумма радиусов катода и анода.

Приращение фазы выходного сигнала измеряют через приращение τ времени, задаваемое генератором в микропроцессоре:

$$\varphi - \varphi_0 = \nu_0 \tau; \quad \tau = \frac{\varphi - \varphi_0}{\nu_0} = K_M^K \int_{t_0}^t \Omega(\tau) d\tau / \nu_0. \quad (4)$$

В России и за рубежом выпускается большое количество микропроцессоров. В частности, в США – это микропроцессоры Intel Xeon 3403, которые характеризуются тактовой частотой 2 ГГц, разрядностью 64 бит и другими параметрами, обеспечивающими функционирование одномагнетронных гироскопических измерителей угловой скорости (ОМ ГИУС). Могут быть применены и микроконтроллеры, например, Texas Instrument CC2640 с тактовой частотой 2.4 ГГц и разрядностью 32 бит. В его состав входят также два компаратора. Выпускаются промышленностью и сборки компараторов. Например, отечественная микросхема цифрового фазового генератора 5861 ДФ2У предназначена для измерения фазового расхождения между двумя гармоническими сигналами. В ее состав входят два делителя частоты, фазовый компаратор и формирователь сигналов рассогласования.

Рассмотрим процесс работы одномагнетронного гироскопа-магнетрона более подробно. После подключения питания прибор через небольшое время готов к работе. Фазовый компаратор включают в работу при неподвижном объекте для определения собственной частоты генерации магнетрона. Производят калибровку прибора при размещении магнетрона, например, осью чувствительности по линии Восток–Запад в плоскости горизонта. Определяют по выходным сигналам магнетрона и генератора номинальную (при $\Omega = 0$) частоту магнетрона. В итоге частоты выходных сигналов магнетрона и генератора регулируют так, чтобы они стали равными ν_0 . После этого, например, с помощью поворотного стола, измерительную ось прибора направляют в плоскости горизонта на Север, т.е. вдоль северной составляющей угловой скорости вращения Земли. Затем, после обработки, сигналов в микропроцессоре и калибраторе, определяют масштабный коэффициент прибора K_M^K . Масштабный коэффициент ОМ ГИУС вдвое меньше, чем в двухмагнетронных гироскопических измерителях угловых скоростей (ДМ ГИУС), поскольку в одномагнетронной системе, как отмечалось выше, сдвиг частоты равен $\Delta\nu$ (формулы (2, 3)). Для двухмагнетрон-



ной системы он равен $2\Delta\nu$, так как сдвиги частот генерации в каждом магнетроне одинаковы и противоположны по знаку.

Имеется схема одномагнетронного гироскопического измерителя угловых скоростей с реверсированием вектора магнитной индукции (ОМРГИУС) [30]. Отличием от описанного выше прибора является реверсирование вектора магнитной индукции, что усложняет конструкцию, но приводит к повышению точности. Математические модели приборов во многом аналогичны. Отметим, что частота генерации митрона зависит от напряжения между катодом и анодом. Таким образом, для гироскопических применений необходимо использовать стабилизированные источники питания или питать оба магнетрона (митрона) от одного источника.

2.2. Сверхвысокочастотный гироскоп волноводного типа

Чувствительным элементом сверхвысокочастотного резонансного гироскопа является круговой в плане волновод с прямоугольным или другим поперечным сечением, например, круглым [15], с тонкими металлическими стенками, – тогда основу этого прибора составляет тороидальный резонатор, в котором добротность выше, чем в волноводах других типов. К косвенному аналогу рассматриваемого прибора можно отнести микроволновый гироскоп по патенту [15].

В состав прибора входит круговой волновод-резонатор с прямоугольным или круглым поперечным сечением оболочки с тонкими стенками, закрепленный на корпусе подвижного объекта, абсолютная угловая скорость ω которого подлежит определению. Плоскость осевой линии кругового резонатора перпендикулярна измерительной оси OZ прибора. При прямоугольном сечении резонатора широкая сторона параллельна измерительной оси OZ . В полость резонатора вводится возбудитель в виде, например, круглого штыва для подведения энергии электромагнитных сверхвысокочастотных колебаний. Частота подводимого напряжения и размеры резонатора соответствуют условиям резонанса электромагнитных волн. Кроме того, вводятся еще n электродов, конструктивно аналогичных возбудителю, но предназначенных для отвода энергии электромагнитных колебаний и являющихся зондами. Количество зондов должно быть таким, чтобы они позволяли отобразить кривую электрической напряженности не менее чем для полной волны неподвижной интерференционной картины, образованной встречными

бегущими волнами, следовательно, их должно быть по крайней мере 8. В резонаторе размещено фазовращающее устройство, основанное, например, на эффекте Фарадея и представляющее собой невзаимный элемент. Фазовращающее устройство может быть выполнено в виде ферритового фазовращателя. За счет этого невзаимного элемента встречные электромагнитные волны претерпевают при проходе через него различные фазовые сдвиги, что может быть использовано для коррекции дрейфа и для других целей. Возбудитель электромагнитных колебаний соединен с выходом генератора СВЧ колебаний с помощью коаксиального кабеля, этот же выход соединен аналогичным коаксиальным кабелем с соответствующим входом схемы обработки сигналов. Зонды также с помощью коаксиальных кабелей соединены с соответствующими им входами схемы обработки сигналов. Один из входов этой схемы соединен кабелем с источником постоянного напряжения. Схема обработки сигналов представляет собой совокупность $n+1$ фазочувствительных выпрямителей, выполненных на основе СВЧ-транзисторов и входящих в блок фазочувствительных выпрямителей, с последовательно соединенными с ними фильтрами, составляющими блок фильтров. Фильтры предназначены для сглаживания СВЧ-колебаний несущей частоты, выходы которых соединены со входами $n+1$ аналого-цифровых преобразователей, составляющих блок. Выходы $n+1$ аналого-цифровых преобразователей, входящих в блок, соединены со входами бортового компьютера.

Функционирование прибора происходит следующим образом. После его подключения к источникам питания генератор начинает вырабатывать напряжение СВЧ-колебаний, которое через коаксиальный кабель подводится к штыву. Последний возбуждает электромагнитное поле в полости резонатора, в результате чего в направлении по часовой стрелке, а также в противоположном направлении в кольцевом резонаторе формируются два встречных потока бегущих электромагнитных волн одинаковой частоты, задаваемой генератором.

Интерферируя, они создают систему стоячих электромагнитных волн – неподвижную относительно резонатора интерференционную картину. При появлении постоянной угловой скорости ω поворота корпуса вокруг измерительной оси интерференционная картина, оставаясь неподвижной по углу в инерциальном пространстве, смещается относительно корпуса и, соответственно,



резонатора на величину, равную фазе Саньяка и пропорциональную измеряемой угловой скорости ω . При этом относительно каждого из зондов фазы Саньяка будут иметь различные значения.

Известно, что показатель преломления не влияет на чувствительность ВОГ: в работе [12] приведена следующая формула для фазы Саньяка для катушки из одного витка:

$$\Delta\varphi = 8\pi S n^2(1-\alpha) \frac{\Omega}{\lambda c}, \quad (6)$$

где $\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$ – коэффициент увлечения Френеля.

Остальные обозначения описаны выше. Полагая, как и в случае с ГМ $K_3 = n$, делаем вывод о том, что коэффициент замедления не влияет на масштабный коэффициент, и имеем с учетом многократного числа пробегов m электромагнитных волн по резонатору следующую формулу для фазы Саньяка:

$$\Delta\varphi = 8\pi S m \frac{\omega}{\lambda c}. \quad (7)$$

Число пробегов m электромагнитных волн оценивается при калибровке СВЧ-ГВ путем подачи импульсов СВЧ-сигналов и определения времени уменьшения амплитуды напряжения на выходных штырях, например в 1.41 раза. Этот же режим (в [26] представлен как рабочий) используется для определения в дискретные моменты времени фазовых сдвигов.

Пример. Условие резонанса в волноводном резонаторе $K=L/\lambda=1,2,3,4\dots$

Зададим $\lambda = 0.25$ см; $K = 100$. Имеем:

$$K = \frac{2\pi r}{\lambda} \leftrightarrow r = \frac{K\lambda}{2\pi}, \text{ откуда } r = 3.98 \text{ см.}$$

Несущая частота, задаваемая генератором, равна: $\nu = c/\lambda = 12 \cdot 10^{10}$ Гц. При $m = 10^5$ масштабный коэффициент равен:

$$K_M = m \frac{8\pi S}{\lambda c} = 2mk^2 / \nu, \quad (8)$$

$K_M = 0.0166 c^{-1}$. Учитывая путь волны, $L_g = 2\pi r m = 2.499 \cdot 10^4$ м.

Для сравнения рассчитаем масштабный коэффициент ВОГ при длине волоконной катушки $L_1 = 2.499 \cdot 10^3$ м; $\lambda = 1$ мкм:

$$\begin{aligned} K_M^{ВОГ} &= L_1 \frac{4\pi\Gamma}{\lambda c} = 2.499 \cdot 10^3 \cdot \frac{12.56 \cdot 3.98 \cdot 10^{-2}}{10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8} = \\ &= 4.164 c^{-1}. \end{aligned}$$

Масштабный коэффициент в ВОГ при выбранных параметрах на два порядка больше, чем в СВЧ-ГВ, при $m = 10^4$ – на три порядка. Следовательно, данный тип гироскопов целе-

сообразно применять на ПО с большими угловыми скоростями, где не требуются высокие точность и чувствительность.

Третий тип СВЧ-гироскопов – это катушечный гироскоп, являющийся развитием гироскопа И. Л. Берштейна [2] в направлении миниатюризации. Вместо барабана и коаксиального кабеля в [27] применены несколько вставленных друг в друга цилиндрических каркасов с катушками-волноводами микрополоскового типа. Благодаря этому принципу габариты прибора могут быть уменьшены более чем на порядок.

Заключение

В статье рассмотрены физические основы работы и схемные решения для СВЧ-гироскопов: гироскопа-магнетрона, настраиваемого напряжением (митрона), резонансного волноводного гироскопа и гироскопа катушечного типа на базе усовершенствованного гироскопа И. Л. Берштейна. Приведены основные соотношения, описывающие их свойства. Соотношения для определения выходных величин приборов получены на основе использования теории лазерных и волоконно-оптических гироскопов, в которой учтено влияние коэффициента преломления среды на их свойства. В работе использована аналогия коэффициента замедления в СВЧ-гироскопах с показателем преломления в оптических гироскопах со средами. На основе этой аналогии и получены основные соотношения (3), (5), (6), (7). Вычислено значение масштабного коэффициента, который связывает выходной сигнал СВЧ-гироскопов с угловой скоростью вращения объектов и характеризует, в том числе, чувствительность к изменениям угловой скорости. Значения этого коэффициента для СВЧ-гироскопов почти в 10 раз превышают значения этого параметра для твердотельных волновых гироскопов, что дает возможность использовать СВЧ-гироскопы в высокоточных навигационных системах.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 9.2108.2017/4.6).

Список литературы

1. Граммель Р. Гироскоп. Его теория и применения : в 2 т. М. : Изд-во иностр. лит., 1952. Т. 1, 319 с. ; Т. 2, 359 с.



2. *Малеев П. И.* Новые типы гироскопов. Л. : Судостроение, 1971. 160 с.
3. *Lodge O. J.* Aberration Problem. A Discussion concerning the Motion of the Ether near the Earth, and concerning the connection between Ether and Cross Matter, with Some New Experiments // *Phil. Trans. A.* 1893. Vol. 184. P. 727–804.
4. *Sagnac G.* L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme // *C. R. Acad. Sci.* 1913. Vol. 157. P. 708–710.
5. *Кробка Н. И.* Квантовая микромеханика : гироскопы на волнах де Бойля и квантовых свойствах сверхтекучих жидкостей. Тенденции развития и состояния разработок // Сб. материалов 16-й междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : ЦНИИ «Электронприбор», 2009. С. 124–137.
6. *Хромых А. М.* Кольцевой генератор во вращающейся системе отсчета // *ЖЭТФ.* 1966. Т. 50, вып. 1. С. 281–282.
7. *Post E. J.* Sagnac Effect // *Rev. Mod. Phys.* 1967. Vol. 39, № 2. P. 475–493.
8. *Вавилов С. И.* Экспериментальные основания теории относительности // *Собр. соч. : в 4 т. М. : Изд-во АН СССР,* 1956. Т. 4. С. 13–110.
9. *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Оптика движущихся тел. М. : Наука, 1972. 212 с.
10. *Anderson R., Bilger H. R., Stedman G. E.* «Sagnac» effect : A century of Earth-rotated interferometers // *Am. J. Phys.* 1994. Vol. 62. P. 975–985. DOI: doi.org/10.1119/1.17656
11. *Малькин Г. Б.* Ранние исследования эффекта Саньяка // *УФН.* 1997. Т. 167. С. 337–342. DOI: 10.3367/UFN.0167.199703i.0337
12. *Малькин Г. Б.* Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // *УФН.* 2000. Т. 170, № 12. С. 1325–1349. DOI: 10.3367/UFN.0170.200012c.1325
13. *Loukianov D., Sorg H., Rodloff R., Stieler B.* Optical Gyros and their Application. North Atlantic Treaty Organization, 2000. 336 p. DOI: 10.14339/RTO-AG-339
14. *Вугальтер Г. А., Малькин Г. Б.* Эффект Саньяка в кольцевых интерферометрах на «медленных» волнах // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. XLII, № 4. С. 373–382.
15. *Fesenthal Jr., Harry D.* Microwave gyro. Patent USA, no. 3861220, 1973.
16. *Speller J. B.* Relativistic inertial reference device. Patent USA, no. 3395270, 1968.
17. *Dressler E. R.* Angular rotation detection system utilizing the displacement of electron beam. Patent US, no. 3218871, 1965.
18. *Karapetyan G. G.* Microwave gyroscope – novel rotation sensor // *Microwave and Optical Tech. Lett.* 2000. Vol. 37, № 4. P. 255–257. DOI: https://doi.org/10.1002/1098-2760(20001120)27:4%3C255::AID-MOP10%3E3.0.CO;2-X
19. *Stancil D. D.* Theory of Magnitostatic Waves in Moving Ferrite Films and Applications to Rotation Rate Sensing // *IEEE Trans. MTT.* 1989. Vol. 37, № 5. P. 851–859. DOI: 10.1109/22.17451
20. Патент № 2207511 Рос. Федерация, МПК G01C19/64. Кольцевой резонансный гироскоп сверхвысоко-частотного диапазона / Плотников П. К. ; Заявл. 06.12.01 ; Опубл. 27.06.03, Бюл. № 18. 4 с.
21. *Петров Б. М.* Электродинамика и распространение радиоволн. 2-е изд., испр. М. : Горячая линия-Телеком, 2004. 558 с.
22. *Melnikov L. A., Plotnikov P. K.* The perspective of microwave gyros // *Symp. Gyro Tech. Lett.* 2000. Vol. 27, № 4. P. 255–257.
23. Патент на полезную модель № 111632 Рос. Федерация, МПК G01C 19/64. Кольцевой резонансный гироскоп сверхвысоко-частотного диапазона / Плотников П. К., Мельников Л. А. ; Заявл. 03.10.11 ; Опубл. 20.12.11, Бюл. № 35. 14 с.
24. Патент на полезную модель № 116999 Рос. Федерация, МПК G01C 19/64. Резонансный гироскоп сверхвысоко-частотного диапазона / Мельников Л. А., Плотников П. К., Бессонов Д. Ю. ; Заявл. 29.12.11 ; Опубл. 10.06.12, Бюл. № 16. 14 с.
25. Патент № 2258908 Рос. Федерация, МПК G01C 19/64. Сверхвысоко-частотный резонансный гироскоп / Плотников П. К. ; Заявл. 21.07.03 ; Опубл. 20.08.05, Бюл. № 23. 14 с.
26. *Плотников П. К., Сивяков Б. К., Слаповская Ю. П.* Математическое моделирование работы СВЧ-резонансного гироскопа // Сб. материалов 14-й междунар. науч. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : ЦНИИ «Электронприбор», 2007. С. 44–46.
27. Патент № 2090842 Рос. Федерация, МПК G01C 19/64. Кольцевой гироскоп радиоволнового диапазона / Плотников П. К. ; Заявл. 07.05.93 ; Опубл. 20.09.97.
28. *Берштейн И. Л.* Опыт Саньяка на радиоволнах // *Доклады АН СССР.* 1950. Т. 75, № 5. С. 475–493.
29. Патент на полезную модель № 163266 Рос. Федерация, МПК G01C 19/00. Однорезонаторный гироскоп – магнетрон / Плотников П. К. ; Заявл. 11.01.16 ; Опубл. 10.07.16, Бюл. № 19. 12 с.
30. Патент на полезную модель № 174674 Рос. Федерация, МПК G01C 19/00. Одномагнетронный гироскоп с реверсированием вектора магнитной индукции / Плотников П. К., Мельников Л. А., Наумов С. Г. ; Заявл. 05.06.17 ; Опубл. 25.10.17, Бюл. № 30. 12 с.

Образец для цитирования:

Плотников П. К., Мельников Л. А., Мажирин Ю. А. О физических основах работы сверхвысоко-частотных электромагнитно-волновых гироскопов, базирующихся на эффекте Саньяка // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика.* 2020. Т. 20, вып. 3. С. 193–201. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-193-201



On the Physical Basis of Ultra-High-Frequency Electromagnetic Wave Gyroscopes Based on the Sagnac Effect

P. K. Plotnikov, L. A. Melnikov, Yu. A. Mazhirina

Petr K. Plotnikov, <https://orcid.org/0000-0002-3441-4012>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410054, Russia, plotnikov.pk@mail.ru

Leonid A. Melnikov, <https://orcid.org/0000-0002-0423-3982>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410054, Russia, lam-pels@ya.ru

Yuliya A. Mazhirina, <https://orcid.org/0000-0002-5495-7604>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410054, Russia, mazhirinayua@ya.ru

Background and Objectives: In the present paper the physical backgrounds of three types of microwave gyroscopes are presented.

Materials and Methods: Using the relativistic approach the relations for output characteristics are derived to determine the main parameters and properties of the microwave gyro devices: voltage tuned magnetron (mitron) and microwave gyros based on the resonant cavity, and for microwave gyro with coil. **Results and Conclusion:** The results can be used to determine the main parameters of these devices and their properties. The calculated parameters are compared with the parameters and properties of Laser Gyros, Fiber Optics Gyros and with other types of gyros. The discussion of their realizations issues and subsequent applications at the moving objects is given.

Keywords: microwave gyro, Sagnac effect, mitron, magnetron, slow waves, refraction index, slowing parameter.

Received: 28.11.2019 / Accepted: 15.02.2020 /

Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 9.2108.2017/4.6).

References

1. Grammel R. *Girooskop. Ego teoriya i primeneniya* [The gyro. Theory and applications]. Moscow, Izd-vo inostr. lit., 1952, vol. 1. 359 p.; vol. 2. 319 p. (in Russian).
2. Maleev P. I. *Novye tipy giroskopov* [New kinds of gyros]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1971. 160 p. (in Russian).
3. Lodge O. J. Aberration Problem. A Discussion concerning the Motion of the Ether near the Earth, and concerning the connection between Ether and Cross Matter, with Some New Experiments. *Phil. Trans. A*, 1893, vol. 184, pp. 727–804.
4. Sagnac G. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. *C.R. Acad. Sci.*, 1913, vol. 157, pp. 708–710.
5. Krobka N. I. Quantum micromechanics: the gyro which use the de-Broglie waves and quantum properties of superfluids. The trends and state of developments. *Proc. of 16th International Conference on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, TsNII "Elektropribor", 2009, pp. 124–137 (in Russian).
6. Hromyh A. M. Ring cavity laser in rotated coordinate. *JETP*, 1966, vol. 50, no. 1, pp. 281–282 (in Russian).
7. Post E. J. Sagnac Effect. *Rev. Mod. Phys.*, 1967, vol. 39, no. 2, pp. 475–493.
8. Vavilov S. I. Eksperimental'nye osnovaniya teorii otноситel'nosti. *Sobranie sochinenij. T. 4* [Experimental foundations of relativity theory. Vol. 4]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1956, pp. 13–110 (in Russian).
9. Frankfurt U. I., Frenk A. M. *Optika dvizhushchikhsya tel* [Optics of moving]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 212 p. (in Russian).
10. Anderson R., Bilger H. R., Stedman G. E. "Sagnac" effect: A century of Earth-rotated interferometers. *Am. J. Phys.*, 1994, vol. 62, pp. 975–985. DOI: doi.org/10.1119/1.17656
11. Malykin G. B. Earlier investigations of Sagnac effect. *Sov. Phys. Uspekhi*, 1997, vol. 167, pp. 337–342. DOI: 10.3367/UFNr.0167.199703i.0337
12. Malykin G. B. Correct and noncorrect explanations. *Sov. Phys. Uspekhi*, 2000, vol. 170, no. 12, pp. 1325–1349 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0170.200012c.1325
13. Loukianov D., Sorg H., Rodloff R., Stieler B. *Optical Gyros and Their Application*. North Atlantic Treaty Organization, 1999. 336 p. DOI: 10.14339/RTO-AG-339
14. Vugalter G. A., Malykin G. B. Sagnac effect in the ring interferometers with slow waves. *Sov. Radielectronics, Radiophysics*, 1999, vol. XLII, no. 4, pp. 373–382 (in Russian).
15. Fesenthal Jr., Harry D. *Microwave gyro*. Patent USA, no. 3861220, 1973.
16. Speller J. B. *Relativistic inertial reference device*. Patent USA, no. 3395270, 1968.
17. Dressler E. R. *Angular rotation detection system utilizing the displacement of electron beam*. Patent USA, no. 3218871, 1965.
18. Karapetyan G. G. Microwave gyroscope – novel rotation sensor. *Microwave and Optical Tech. Lett.*, 2000, vol. 37, no. 4, pp. 255–257. DOI: [https://doi.org/10.1002/1098-2760\(20001120\)27:4%3C255::AID-MOP10%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1098-2760(20001120)27:4%3C255::AID-MOP10%3E3.0.CO;2-X)
19. Stancil D. D. Theory of Magnitostatic Waves in Moving Ferrite Films and Applications to Rotation Rate Sensing. *IEEE Trans. MTT*, 1989, vol. 37, no. 5, pp. 851–859. DOI: 10.1109/22.17451



20. Plotnikov P. K. *Ring resonant microwave gyro*. Patent RF, no. 2207511, 2003 (in Russian).
21. Petrov B. M. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. 2nd ed. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2004. 558 p.
22. Melnikov L. A., Plotnikov P. K. The perspective of microwave gyros. *Symp. Gyro Tech. Lett.*, 2000, vol. 27, no. 4, pp. 255–257.
23. Plotnikov P. K., Melnikov L. A. *Ring resonant microwave gyro*. Patent RF, no. 111632, 2011 (in Russian).
24. Melnikov L. A., Plotnikov P. K. *Resonant microwave gyro*. Patent RF, no. 116999, 2012 (in Russian).
25. Plotnikoiv P. K. *Microwave resonant gyro*. Patent RF, no. 2258908, 2005 (in Russian).
26. Plotnikov P. K., Sivyakov B. K., Slapovskaya Yu. P. Mathematical modeling of the operation of microwave resonant gyro. *Proc. of 16th International Conference on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, TsNII “Elektropribor”, 2007, pp. 44–46 (in Russian).
27. Plotnikov P. K. *Ring microwave gyro*. Patent RF, no. 2090842, 1997 (in Russian).
28. Bershtein I. L. Sagnac experiment at microwaves. *Proceeding of RAS (doclady)*, 1950, vol. 75, no. 5, pp. 475–493 (in Russian).
29. Plotnikov P. K. *Singlecavity gyro-magnetron*. Patent RF, no. 163266, 2016 (in Russian).
30. Plotnikov P. K., Melnikov L. A., Naumov S. G. *Singlemagnetron gyro with reversible magnetic induction*. Patent RF, no. 174674, 2017 (in Russian).

Cite this article as:

Plotnikov P. K., Melnikov L. A., Mazhirina Yu. A. On the Physical Basis of Ultra-High-Frequency Electromagnetic Wave Gyroscopes Based on the Sagnac Effect. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 193–201 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-193-201>
