



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014108145/28, 03.03.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.03.2014

(45) Опубликовано: 27.06.2015 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2392625 C1, 20.06.2010. RU 81317
U1, 10.03.2009. US 6256101 B1, 03.07.2001. WO
1991003703 A1, 21.03.1991

Адрес для переписки:

347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А,
Некрасовский пер., 44, Южный федеральный
университет

(72) Автор(ы):

Петров Борис Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

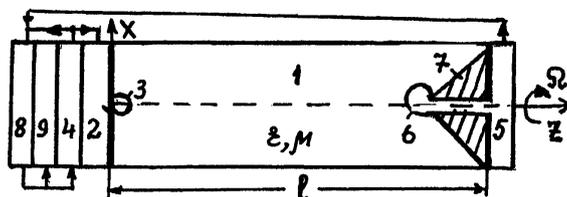
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Южный
федеральный университет" (Южный
федеральный университет) (RU)

(54) ОДНОВОЛНОВЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области измерительной техники и касается способа измерения частоты вращения интерферометра. Частоту вращения определяют как разность между критической частотой вращения интерферометра на выбранном типе электромагнитной волны (частотой «отсечки» при вращении) и критической частотой «покоящегося» интерферометра (частотой

«отсечки» при «покое») на том же типе электромагнитной волны, деленную на постоянное число, определяемое выбранным при расчете интерферометра типом электромагнитной волны. Направление вращения определяют знаком этой разности. Технический результат заключается в повышении точности измерений и уменьшении размеров устройства. 1 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2014108145/28, 03.03.2014
 (24) Effective date for property rights:
03.03.2014
 Priority:
 (22) Date of filing: 03.03.2014
 (45) Date of publication: 27.06.2015 Bull. № 18
 Mail address:
 347928, Rostovskaja obl., g. Taganrog, GSP-17A,
 Nekrasovskij per., 44, Juzhnyj federal'nyj universitet

(72) Inventor(s):
Petrov Boris Mikhajlovich (RU)
 (73) Proprietor(s):
federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovanija "Juzhnyj
federal'nyj universitet" (Juzhnyj federal'nyj
universitet) (RU)

(54) **SINGLE-WAVE METHOD OF MEASUREMENT OF INTERFEROMETER RPM**

(57) Abstract:

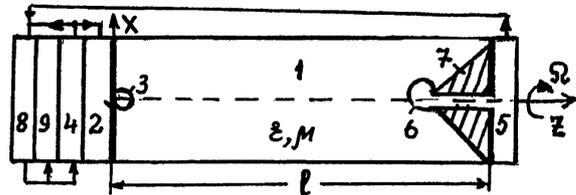
FIELD: instrumentation.

SUBSTANCE: rpm is determined as a difference between the critical rpm of the interferometer for the selected type of electromagnetic wave ("cut-off" frequency during rotation) and the critical frequency of the "resting" interferometer ("cut-off" frequency during "rest") for the same type of electromagnetic wave, divided by a constant value depending on the type of electromagnetic wave selected at the interferometer estimation. The direction of rotation depends on the

sign of this difference.

EFFECT: improvement of accuracy of measurements and reduction of the device sizes.

1 dwg



RU 2 554 316 C1

RU 2 554 316 C1

Предлагаемое изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано при создании таких средств измерения угловой скорости вращения объектов, как интерферометры, гироскопы.

В настоящее время существует только один способ измерения частоты вращения интерферометра - многоволновый (многомодовый) способ, основанный на «вихревом эффекте Саньяка». Соображения о физических и количественных свойствах электромагнитного (ЭМ) поля в этом способе опираются на результаты опытов Саньяка [Панов М.Ф., Соломонов А.В., Филатов Ю.В. Физические основы интегральной оптики. - М.: Учебное пособие. Изд. Радиоэлектроника. - 2010. - 432 с.; Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. Лазерный гироскоп. - М.: Сов. Радио. - 1975. - 424 с.; Лауэ М. К опыту Харреса. // В кн. Статьи и речи. - М.: Изд. Наука. Пер. с нем. - 1969. - с.367; Зоммерфельд А. Оптика. / А. Зоммерфельд. - М.: Изд. ИЛ. - 1953. - 486 с.]. Наиболее полно существо «вихревого эффекта Саньяка» изложено С.И. Вавиловым [Вавилов С.И. Собрание сочинений. Т.4. - Экспериментальные основания теории относительности. - М.: Изд. АН СССР. - 1956 г. - 470 с.]. Считают, что во вращающемся интерферометре ЭМ-поле, распространяясь в двух противоположных (относительно направления вращения) направлениях, испытывает разный набег фазы, а разность фаз $\Delta\phi$ пропорциональна частоте вращения $\Omega=2\pi F$, где F - число оборотов в секунду. Расчетное соотношение для разности времен прохождения ЭМ-полем путей по направлению движения часовой стрелки и против движения часовой стрелки $\Delta t=8\pi FS/c^2$, где S - площадь, ограниченная «путями распространения ЭМ-поля», c - скорость света в свободном пространстве. Разность фаз при этом за счет разности хода «лучей» вычисляют по формуле

$$\Delta\phi = \omega_0 \Delta t = 8\pi S \Omega / c \lambda_0, \quad (1)$$

где ω_0 и λ_0 - частота и длина волны тока излучающего источника в свободном пространстве. Это выражение получено на основе разного рода допущений об ЭМ-поле внутри вращающегося интерферометра.

Например, допускают, что для «пучка лучей», движущихся навстречу вращающимся точкам материальной среды со скоростью v , скорость $v_1=c+v$ распространения «луча» больше скорости света, а для «пучка лучей», распространяющегося в направлении вращения, скорость $v_2=c-v$ меньше скорости света. Тогда коэффициенты фаз этих лучей

$$\beta_{1,2} = \frac{\omega_0}{v_{1,2}} = \frac{\omega_0}{c(1 \pm v/c)} \approx \frac{\omega_0}{c} \left(1 \mp \frac{v}{c}\right) = \beta_0 \left(1 \mp \frac{v}{c}\right), \quad (2)$$

где $\beta_0 = \omega_0/c$ - коэффициент фазы в свободном пространстве, $v=\Omega a$, a - максимальный радиус поперечного сечения интерферометра. Так как $\beta_1 = \omega_1/c, \beta_2 = \omega_2/c$, то считают, что выражение (2) позволяет ввести понятия частот $\omega_1 \approx \omega_0 \times (1 - v/c)$ и $\omega_2 \approx \omega_0 (1 + v/c)$. Это значит, что во вращающемся интерферометре проявляется только первичный эффект Доплера для «набегающей» и «убегающей» его частей. Разность частот

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \approx 2\omega_0 \frac{v}{c} = 2\beta_0 \frac{v}{c} = 2\beta_0 \Omega a = 4\pi a \frac{\Omega}{\lambda_0}. \quad (3)$$

При этом разность фаз (ширину интерференционной полосы) $\Delta\phi = \Delta\beta \cdot L$ (где $L=2\pi a$ -

длина периметра, по которому распространяются «пучки лучей», $\Delta\beta = \Delta\omega/c$) определяют

по (1): $\Delta\phi = 8\pi S \Omega / \lambda_0 c$. Направление вращения определяют знаком правой части

выражения (3).

А. Зоммерфельд [Зоммерфельд А. Оптика. / А. Зоммерфельд. - М.: Изд. ИЛ. - 1953. - 486 с.] и М. Лауэ [Лауэ М. Статьи и речи. - М.: изд. Наука. Пер. с нем. - 1969 г. - С.367] показали, что для анализа ЭМ-поля во вращающемся интерферометре и вычисления разности фаз $\Delta\phi$ необходимо поставить и решить граничную задачу для ЭМ-поля в неинерциальной системе отсчета, поскольку на ЭМ-поле во вращающемся интерферометре воздействует эквивалентное гравитационное поле.

Попытки строгих постановки и решения этой задачи предприняты в многочисленных работах (см. библиографию в [Петров Б.М. Прикладная электродинамика вращающихся тел. - М.: Изд. Г. линия-Телеком. 2009. - 288 с.]). Но при этом применялась или нековариантная формулировка уравнений Максвелла, или в материальных, или в дифференциальных уравнениях делались упрощающие допущения, что приводило к решениям, эквивалентным, по существу, решениям классической электродинамики, т.е. к формулам (1) и (3). Поэтому многоволновый способ измерения частоты вращения интерферометра по внутреннему ЭМ-полю, основанный на «вихревом эффекте Саньяка», не выражает ни физических, ни количественных свойств ЭМ-поля.

Анализ результатов строгих постановок и решений граничных задач для математических моделей вращающихся интерферометров [Петров Б.М. Волны во вращающемся волноводе. Эффект Саньяка. // Известия ВУЗов России.

Радиоэлектроника. Вып.5. - 2009. - с.13-21; Электродинамическая теория эффекта Саньяка. // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. Т.53, №10. - 2010. - с.3-11; Волны электрического типа в интерферометре на основе вращающейся коаксиальной линии. // Антенны. Вып.10. - 2013. - с.56-61] показывает, что при применении многоволнового

способа измерения частоты Ω параметры $S/c\lambda_0$ или a/λ_0 должны быть большими для того, чтобы $\Delta\phi$, или $\Delta\omega$ были измеряемыми величинами, значит, реализация способа возможна только в оптическом диапазоне длин волн λ_0 , где поперечные электрические размеры интерферометра велики. Значит, геометрические поперечные размеры интерферометра не поддаются микроминиатюризации. Многомодовый способ измерения Ω принципиально является приближенным, величину Ω по формулам (1) и (2) определяют приближенно. Направление вращения определяют по знаку фаз $\Delta\phi$.

Для того чтобы поперечные размеры интерферометра можно было минимизировать и увеличить точность измерений, предлагается использовать для измерения частоты его вращения одноволновый (одномодовый) способ измерения. Он состоит в следующем.

Решения ковариантных уравнений Максвелла при выполнении граничных условий (решения граничных задач) для моделей интерферометра на основе вращающейся регулярной по длине линии показывают, что составляющие векторов напряженностей

ЭМ-поля в интерферометре зависят от продольной координаты z по закону $\exp(-i\chi_{n,m}^{\lambda,\omega}z)$,

где $\chi_{n,m}^{\lambda,\omega} = \sqrt{k_n^2 - k_{1nm}^2}$ - продольный коэффициент распространения ЭМ-волны, $k_n = \omega/v_\phi$,

$\omega_n = \omega_0 + n\Omega$, $v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, ϵ, μ - относительные диэлектрическая и магнитная

проницаемости вещества, заполняющего интерферометр, $k_{\perp nm}^{2,u} = v_{nm}^{2,u}/d$, $v_{nm}^{2,u}$ - корни

5 дисперсионного (характеристического) уравнения для поля волн электрического (E_{nm} -волн) или магнитного (H_{nm} -волн) типа, d - геометрический размер поперечного сечения интерферометра (например, для поперечного сечения в виде круга $d=a$, где a - радиус, для сечения в виде коаксиальной линии d - радиус внутреннего коаксиального проводника), индекс «э» или «м» обозначает параметр соответственно E_{nm} -волн или
10 H_{nm} -волн [Б.М. Петров. Электромагнитные волны и колебания во вращающихся волноводах и резонаторах. - Таганрог: Изд. Южного федерального университета. 2013. - 205 с.].

15 Критическая частота (частота «отсечки») $\omega_{o,nm,sp}^{2,u}$ при вращении интерферометра наступает при $\chi_{nm}^{2,u} = 0$. Тогда

$$\omega_{o,nm,sp}^{2,u} = v_\phi v_{nm}^{2,u}/d - n\Omega, \quad (4)$$

20 где $v_\phi v_{nm}^{2,u}/d = \omega_{om,nm}^{2,u}$ - критическая частота (частота «отсечки») покоящегося интерферометра.

При частоте ω_0 источника ЭМ-поля, меньшей этой частоты, продольный коэффициент

25 $\chi_{nm}^{2,u}$ становится чисто реактивным: $\chi_{nm}^{2,u} = -i \cdot \alpha_{nm}^{2,u}$, где $\alpha_{nm}^{2,u} = \sqrt{(v_{nm}^{2,u}/d)^2 - k_n^2}$. При этом

поперечные составляющие векторов ЭМ-поля сдвинуты по фазе на $\pi/2$, продольный вектор Пойнтинга становится чисто реактивным и, значит, переноса ЭМ-энергии вдоль
30 интерферометра нет. Все составляющие векторов ЭМ-поля, если частота источника меньше критической частоты вращения, по амплитуде экспоненциально убывают по закону $\exp(-\alpha_{nm}^{2,u} z)$ при z увеличивающемся.

При расчете интерферометра выбирается тип ЭМ-волны. Тогда $n=N$ и $m=M$ -
35 фиксированы. Из выражения (4) следует, что парциальные гармоники, распространяющиеся в положительном направлении по азимутальной координате (при $N>0$), имеют меньшую критическую частоту вращения

$$\omega_{0,nm,sp}^{+,+u} = \omega_{o1,nm}^{2,u} - N\Omega, \quad (5)$$

40 по сравнению с критической частотой вращения

$$\omega_{0,nm,sp}^{-,-u} = \omega_{oT,nm}^{2,u} + |N|\Omega \quad (6)$$

парциальных гармоник, распространяющихся в отрицательном направлении ($N<0$), т.е.

$$45 \omega_{0,NM,sp}^{-,-u} > \omega_{0,NM,sp}^{+,+u}. \quad (7)$$

Частоту «отсечки» «покоящегося» интерферометра определяют при расчете интерферометра. Тогда, измеряя частоту «отсечки» при вращении, находят по (5) или (6) круговую частоту вращения

$$\Omega = \frac{1}{N} (\omega_{0T, NM} - \omega_{0, NM, sp}^{+, +, u}), \quad N > 0 \quad (8)$$

или

$$\Omega = \frac{1}{N} (\omega_{0, NM, sp}^{-, -, u} - \omega_{0I, NM}), \quad |N| \neq 0. \quad (9)$$

Если измерены критические частоты вращения при «положительном» и «отрицательном» направлениях вращения, то круговую частоту вращения определяют из выражения

$$\Omega = \frac{1}{2|N|} (\omega_{0, NM, sp}^{-, -, u} - \omega_{0, NM, sp}^{+, +, u}), \quad N \neq 0. \quad (10)$$

Знак правой части в (10) определяет направление вращения.

Таким образом, строгая постановка и решения граничных задач о возможности распространения ЭМ-поля во вращающихся интерферометрах показывают, что каждой критической частоте (частоте «отсечки») «покоящегося» интерферометра во вращающемся интерферометре соответствует серия критических частот (частот «отсечки») вращения, определяемая разностью между критической частотой «покоящегося» интерферометра и частотой вращения, умноженной на номер парциальной (азимутальной) гармоники. Поэтому измерить частоту вращения можно как разность между критической частотой вращения и частотой «отсечки» покоящегося интерферометра, деленной на номер азимутальной гармоники.

Измерить критическую частоту вращения с высокой точностью можно в радиодиапазоне хорошо разработанными радиотехническими методами. Возможность применения ЭМ-поля частот радиодиапазона позволяет использовать для заполнения интерферометра магнитодиэлектрик с большими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Это позволяет минимизировать поперечные геометрические размеры интерферометра, в то время как способ, основанный на «вихревом оптическом эффекте Саньяка», не позволяет применить магнитодиэлектрик для заполнения интерферометра и принимать меры для минимизации геометрических размеров интерферометра.

Заявляемый способ поясняется и следующим: предлагается измерять радиотехническим методом только частоту «отсечки» при вращении и по этой частоте определять частоту вращения, поэтому способ является прямым. По способу, основанному на «вихревом оптическом эффекте Саньяка», измеряют ширину интерференционной полосы $\Delta\phi$ в оптическом диапазоне частот и по приближенной

формуле (1) вычисляют частоту вращения $\Omega = \frac{\Delta\phi c \lambda_0}{8\pi S}$, где величина S тоже определена

приближенно, поэтому способ является косвенным.

Задачей заявляемого способа измерения частоты вращения интерферометра является возможность миниатюризации поперечных геометрических размеров интерферометра с одновременным увеличением точности измерения частоты вращения за счет использования частот радиодиапазона, свойств ЭМ-поля внутри интерферометра и свойств заполняющего интерферометр магнитодиэлектрика.

Для достижения технического результата в одноволновом способе измерения частоты вращения интерферометра частоту вращения интерферометра определяют как разность между критической частотой вращения интерферометра на выбранном типе ЭМ-волны

(частотой отсечки при вращении) и критической частотой «покоящегося» интерферометра (частотой «отсечки» при «покое») на том же типе ЭМ-волны, деленную на постоянное число, определяемое выбранным при расчете интерферометра типом ЭМ-волны, а направление вращения определяют знаком этой разности.

- 5 Работа заявляемого способа поясняется чертежом, где
 1 - интерферометр (цилиндрической формы, длины l , заполнен магнитоэлектриком),
 2 - источник ЭМ-поля (генератор энергии ЭМ-поля малой мощности)
 перестраиваемой частоты,
 3 - устройство индуктивной связи источника с интерферометром,
 10 4 - устройство перестройки частоты источника,
 5 - измеритель малой мощности поглотительного типа,
 6 - устройство индуктивной связи измерителя (5) с ЭМ-полем,
 7 - согласованная поглощающая нагрузка,
 8 - решающее устройство,
 15 9 - частотомер.

В состоянии покоя интерферометра (1) генератор (2) настроен на частоту

$$\omega_0 = \omega_{0I, NM}^{2, u} + \Delta\omega_I, \text{ где сдвиг частоты } \Delta\omega_I \ll \omega_{0I, NM}^{2, u} - \text{ частота «отсечки» покоя. Тогда}$$

20 продольный коэффициент распространения выбранного типа E_{NM} -волны или H_{NM} -волны

$$\chi_{NM}^{2, u} = \sqrt{k_0^2 - (v_{NM/d}^{2, u})^2} \approx \sqrt{2\omega_{0I, NM}^{2, u} \cdot \Delta\omega_I} / v_\phi,$$

коэффициент фазы волны: $\beta_{NM}^{2, u} \approx \sqrt{2\omega_{0I, NM}^{2, u} \cdot \Delta\omega_I} / v_\phi$, коэффициент затухания $\alpha_{NM}^{2, u} = 0$.

25 В (1) обеспечивается режим бегущей волны, на устройство связи (6) воздействует ЭМ-поле с активным вектором Пойнтинга, согласованная нагрузка (7) поглощает падающую волну. С измерителя мощности (5) поступает сигнал на устройство (8), перестраивающее с помощью (4) частоту генератора (2) так, что она становится равной $\omega_0 = \omega_{0I, NM}^{2, u} - \Delta\omega_I$.

30 При этом $\chi_{NM}^{2, u} = -i\alpha_{NM}^{2, u}$, $\beta_{NM}^{2, u} = 0$ и режим бегущей волны в (1) разрушается, ЭМ-поле становится чисто реактивным, вектор Пойнтинга у устройства связи (6) становится чисто реактивным и по модулю его значение пропорционально $\exp(-2\alpha_{NM}^{2, u} \ell)$, измеритель
 35 мощности (5) посылает сигнал в (8) об отсутствии мощности, переносимой волной.

При вращении интерферометра $\Omega \neq 0$ и в нем устанавливается режим бегущей волны, так как $\omega_{0I, NM}^{2, u} + \Delta\omega_I$ становится больше $\omega_{0I, NM}^{2, u}$, коэффициент фазы $\beta_{NM}^{2, u} > 0$, $\alpha_{NM}^{2, u} = 0$. О
 40 появлении мощности из (5) поступает сигнал на решающее устройство (8), которое дает «указание» устройству (4) уменьшить частоту генератора (2) на $2\Delta\omega_I$, частота которого становится равной

$$\omega_0 = \omega_{0I, NM}^{2, u} + \Delta\omega_I - 2\Delta\omega_I = \omega_{0I, NM}^{2, u} - \Delta\omega_I.$$

45 Тогда $\omega_n = \omega_0 + N\Omega = \omega_{0I, NM}^{2, u} - \Delta\omega_I + N\Omega$. Устройство (8) с помощью устройства перестройки частоты генератора (4) изменяет значение $\Delta\omega_I$ так, что $\Delta\omega_I = N\Omega$, при этом разрушается режим бегущей волны в (1), мощность не поступает в измеритель мощности

(5), о чем подается сигнал на (8). Решающее устройство (8) запоминает частоту $\Delta\omega_{\Gamma}$, вычисляет значение частоты $\Omega = \Delta\omega_{\Gamma} / N$ и выдает в (9). При выборе волны H_{1M} или E_{1N} измеряется частота вращения $\Omega = \Delta\omega_{\Gamma}$.

Возможны другие функциональные схемы определения частоты вращения.

Формула изобретения

Одноволновый способ измерения частоты вращения интерферометра, отличающийся тем, что частоту вращения определяют как разность между критической частотой вращения интерферометра на выбранном типе электромагнитной волны (частотой «отсечки» при вращении) и критической частотой «покоящегося» интерферометра (частотой «отсечки» при «покое») на том же типе электромагнитной волны, деленную на постоянное число, определяемое выбранным при расчете интерферометра типом электромагнитной волны, а направление вращения определяют знаком этой разности.