

УДК 53.088:681.7.069.24

"Масштабный коэффициент" лазерного гироскопа

Б. В. Мелкумян

Московский институт экономики, менеджмента и права, Москва, Россия

E-mail: B.Melkumyan@miemp.ru

В рамках квазиклассической теории вычислен момент импульса света в кольцевом лазерном резонаторе и определен смысл масштабного коэффициента лазерного гироскопа (ЛГ). Определены квантовый предел чувствительности и аддитивная погрешность масштабного коэффициента ЛГ. Показано, что "зона захвата" на выходной характеристике обусловлена прецессией момента сил вокруг вектора угловой скорости, действующего на багрон света в кольцевом лазерном резонаторе ЛГ.

PACS: 06.30-k

Введение

Задачи управления и навигации для платформ и систем транспортных средств на плавающих, летающих и запускаемых объектах решаются как с помощью глобальных систем навигации (GPS), так и автономными средствами, которые целиком располагают на объекте измерения, поскольку любая проблема может быть решена двумя путями: "от земли" и "от неба".

Оптимальными для прецизионного управления и навигации в большинстве условий применения являются системы на лазерных датчиках.

Впервые в Йене в 1911 г. Ф. Харресс при изменении френелевского увеличения света в стекле обнаружил не ожидаемый им сигнал биений при вращательном движении стеклянных дисков [1]. Это явление называют эффектом Саньяка. Он изобрел "кольцевой интерферограф" (рис. 1), преобразовав в 1913—1914 гг. крестообразный "интерферограф" Майкельсона.

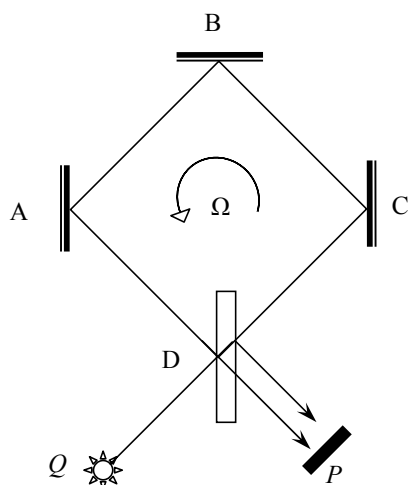


Рис. 1. "Кольцевой интерферограф" Саньяка

На рис. 1 зеркала A, B, C, полупрозрачная пластинка D, источник света Q и фотоприемник P зафиксированы на одном столе, который вращают на ртутной подушке с угловой скоростью Ω вокруг оси, перпендикулярной плоскости лучевого контура ABCD. Луч света от Q расщепляется пластинкой D на два луча — DABCDP и DCBADP.

Эти лучи, обегая контур ABCD во встречных направлениях, формируют кольцевую стоячую волну и интерферируют на площадке P:

$$\Delta\nu = \frac{4S\Omega}{\lambda L}, \quad (1)$$

где $\Delta\nu$ — разность частот двух компонент стоячей волны;

S — площадь осевого лучевого контура кольцевого резонатора, равная площади плоской фигуры ABCD;

L — периметр лучевого контура, равный периметру фигуры ABCD;

λ — длина волны света в кольцевом резонаторе без его вращения.

В формуле М. Ж. Саньяка (1) масштабным коэффициентом угловой скорости называют величину $M = (4S/\lambda L)$, которая связывает измеряемую величину Ω с выходным сигналом $\Delta\nu$ кольцевого оптического гироскопа.

М. Ж. Саньяк измерил угловую скорость стола с установкой $\Omega \geq 30$ град/с, проверил свою формулу (1), обнаружив "зону захвата" для меньших скоростей вращения и "хорошее" (1/100) совпадение с линейной зависимостью на больших скоростях, но не определил суточного вращения Земли в Париже. А. А. Майкельсон, Гейл и Пирс повторили в США в 1925 г. опыт Саньяка, расположив кольцевой интерферограф в замкнутом трубопро-

воде с периметром резонатора 1,9 км, откачав из этого устройства воздух [1].

А. А. Майкельсон с сотрудниками создали кольцевой резонатор с основным и дополнительными контурами. Они измерили суточную угловую скорость вращения Земли с точностью 2 %. Л. И. Мандельштам назвал рассматриваемое явление эффектом Харресса—Саньяка—Майкельсона [1].

Это был самый чувствительный на то время и самый большой в истории кольцевой оптический гироскоп — второй, после кольцевого интерферометра Саньяка, предок ЛГ, на которых сегодня летают аэробусы, крылатые ракеты, плавают корабли и субмарины [2—4].

А. А. Майкельсон с сотрудниками проводили относительные измерения для двух разных контуров резонаторов, усредненные за сутки. Они измеряли относительную разность "масштабных коэффициентов" при постоянной скорости вращения Земли и не заметили "зоны захвата".

Ниже рассмотрим смысл "масштабного коэффициента" ЛГ, причину возникновения "мертвой зоны" или "зоны захвата" и систематические погрешности ЛГ, обусловленные параметрами резонатора. Влияние движения потоков активной среды на "масштабный коэффициент" ЛГ и метод его компенсации рассмотрены в работе [5].

Классическая формула М. Ж. Саньяка

В современном ЛГ зеркала кольцевого резонатора также формируют осевой лучевой контур в виде замкнутого многоугольника. Возникает кольцевая стоячая волна света из двух компонент с различными волновыми векторами: $\mathbf{k}_1 = -\mathbf{k}_2$. Каждая из них претерпевает внутри кольцевого лазерного резонатора, на пути к выходному зеркалу, одно и то же число отражений. Но на выходе первый луч попадает прямо на приемник, а второй из лучей, которые внутри "ходили в разные стороны" от одного и того же направления вращения, необходимо повернуть в пространстве для соответствующего пересечения с первым.

Можно показать, что изменения фазы в каждой компоненте стоячей волны, обусловленные вращением кольцевого резонатора, не вычитаются на выходе, как в первом интерферографе А. А. Майкельсона, а складываются пропорционально угловой скорости вращения плиты с резонатором.

Отметим, что изначально все элементы интерферографов, как линейного, так и кольцевого, оставались неподвижными во время измерения. Заметив, что движение одного из зеркал позволяет точно измерить его сдвиг или скорость, Майкельсон изобрел интерферометр.

Классическую формулу М. Ж. Саньяка (1)

можно вывести различными способами. Не только как М. Ж. Саньяк, определяя разность времен запаздывания турбулентностей эфира, но и учитывая, что: "На вращающемся теле часы не могут быть однозначно синхронизованы во всех точках. Произведя синхронизацию вдоль некоторой замкнутой линии, мы получим, возвратясь в исходную точку, время, отличающееся от первоначального. ... Соответственно этому скорость света, измеренная как отношение L/t , оказывается равной $c \pm 2 \cdot \Omega \cdot S/L$ " [6, с. 325, 326].

В работах [4, 7, 8] вводится момент импульса света в кольцевом лазерном резонаторе, и получают новые результаты.

Характеристика ЛГ по формуле М. Ж. Саньяка (1) представлена на графике (рис. 2) пунктирной линией, а обычная экспериментальная характеристика — сплошными линиями.

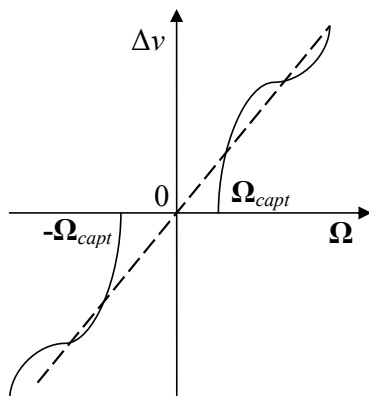


Рис. 2. Выходные характеристики ЛГ

На рис. 2 символы $\pm \Omega_{capt}$ — минимальные измеряемые значения угловой скорости вращения Ω моноблока ЛГ, установленного на стенде, в разные стороны вокруг оси, перпендикулярной плоскости лучевого контура. Переменный диапазон между ними и есть так называемая "зона захвата" ЛГ. Она определяется в (угл. град/ч) либо через масштабный коэффициент в единицах частоты (Гц).

Для анализа явлений в неравномерно движущихся линейных и кольцевых резонаторах свет с определенной фазовой структурой назвали "багрон" [7, 8]. Багрон — это ограниченная вдоль какой-либо координаты область пространства, заполненная полем, или бесконечное пространство, но с определенной фазовой структурой. Эта модель, или форма существования поля, не имеет массы, но обладает энергией и жесткой фазовой структурой, или определенными граничными условиями, определяющими собственную систему отсчета багрона. Лишь в подобных случаях можно говорить об определенном импульсе или моменте импульса багрона в зависимости от того, односвязной или

многосвязной является область тела багрона. Излучение выходит через его рукава.

Смысл "масштабного коэффициента" ЛГ

Для прояснения физической сущности некоторых новых явлений, связанных со свойствами ЛГ, достаточно применения квазиклассической теории [4, 7]. Энергия E некой физической системы в системе отсчета, вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω , связана с ее энергией E_0 в инерциальной системе, относительно которой происходит движение, преобразованием Галилея для энергии вращающейся системы:

$$E = E_0 - (\mathbf{M} \Omega), \quad (2)$$

где \mathbf{M} — момент импульса физической системы в собственной системе отсчета, инерциальной до действия внешних сил [10].

Авторы работ [2, 3] предлагали применить уравнение (2) для анализа эффекта Харресса—Саньяка—Майкельсона в кольцевом резонаторе, но практических результатов получено не было, так как применялось неадекватное выражение для момента импульса света.

В работах [4, 7] был определен момент импульса фотона с волновым вектором \mathbf{k} как вектор

$$\boldsymbol{\mu} = \hbar [\mathbf{r} \times \mathbf{k}]. \quad (3)$$

Вектор (3) остается квантово-неопределенным для свободного фотона или плоской электромагнитной волны. Если же нашей физической системой является стоячая волна с длиной волны генерации λ и плоским фронтом в кольцевом резонаторе ЛГ, то квантово-определенной величиной для одной из компонент стоячей волны будет момент импульса \mathbf{M} , усредненный за время обхода резонатора T с периметром L , в виде

$$\mathbf{M} = \int_0^T \boldsymbol{\mu} \frac{dt}{T} = \frac{\hbar}{L} \oint [\mathbf{r} \times \mathbf{k}] dl = \frac{2\pi\hbar L}{\lambda L} \int [\mathbf{r} \times d\mathbf{l}]. \quad (4)$$

Принимая во внимание точное соотношение для площади $d\mathbf{S}$ элементарного треугольника в последнем интеграле (4), которое равно

$$d\mathbf{S} = \frac{1}{2} [\mathbf{r} \times d\mathbf{l}],$$

а также учитывая уравнение $\Delta E = h\Delta\nu$ для изменения энергии света с изменением частоты, мы получим для каждой из компонент (1), (2) монохроматической стоячей волны соответственные сдвиги частоты:

$$(\Delta\nu)_{1,2} = \pm \frac{(\mathbf{M}\Omega)}{2\pi\hbar} = \pm \frac{2(\mathbf{S}\Omega)}{\lambda L}.$$

Стоячая волна света в наиболее часто встречающихся схемах ЛГ содержит две компоненты. Поскольку волновые векторы этих компонент $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}$ и $\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}$, то разность сдвигов частоты в двухкомпонентной схеме равна известному соотношению М. Ж. Саньяка:

$$\Delta\nu = 2 \frac{(\mathbf{M}\boldsymbol{\Omega})}{2\pi\hbar} = \frac{4(\mathbf{S}\boldsymbol{\Omega})}{\lambda L}. \quad (5)$$

Таким образом, соотношение Саньяка (5) обусловлено наличием определенного момента импульса света в резонаторе. В общем случае момент импульса кольцевого багрона неколлинеарен с вектором \mathbf{S} , а вращение вектора \mathbf{M} вокруг \mathbf{S} из-за связи момента с волновыми векторами (4) эквивалентно изменению состояния поляризации кольцевого багрона.

Вектор площади \mathbf{S} определяет "технологическое" направление оси чувствительности ЛГ. Это удобно, так как при прецессии \mathbf{M} вокруг \mathbf{S} мы выделяем постоянную ось, определяющую систему отсчета ЛГ и изменяемый сомножитель. Под "масштабным коэффициентом" обычно подразумевают константу, поэтому в заголовке статьи введены кавычки.

С другой стороны, направление площади \mathbf{S} , определяющее "технологическое" направление оси чувствительности ЛГ, не имеет смысла, точнее, оно имеет тот же смысл, что и направление \mathbf{S} в магнитном моменте элементарной рамки с током. Правильнее, но не очень удобно, говорить о плавающей оси чувствительности ЛГ, расположенной вдоль \mathbf{M} .

Квантовый предел эффекта М. Ж. Саньяка

В работах [4, 7] определено, как предельная чувствительность ЛГ, основанного на эффекте Харресса—Саньяка—Майкельсона, ограничена соотношениями неопределенности квантовой механики "энергия—время" и "число фотонов—фаза".

Минимальная неопределенность в определении угла поворота ЛГ с помощью одной компоненты багрона оказалась равной угловому размеру длины волны света, генерированного в этом кольцевом резонаторе, на длине "эффективной окружности лучевого контура кольцевого резонатора":

$$\delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi R_{eff}} (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\boldsymbol{\omega}})^{-1}, \quad (6)$$

где $R_{eff} = 2S/L$ — эффективный радиус периметра лучевого контура кольцевого резонатора;

орты в скобках (в скалярном произведении) определяют направления векторов площади контура \mathbf{S} и угловой скорости вращения $\boldsymbol{\Omega}$, соответственно.

Для наиболее часто встречающихся схем ЛГ с двумя компонентами кольцевой стоячей волны неопределенность в измерении угла $\delta\varphi$ в (6) должна быть помножена на коэффициент 1/2.

Предельная чувствительность ЛГ, вычисленная на основе квазиклассической теории, оказалась практически измерима современными приборами [4], и несколько меньшей, чем принятая ранее.

Аддитивная погрешность "масштабного коэффициента"

Была обнаружена систематическая погрешность ЛГ: аддитивное уменьшение "масштабного коэффициента", обусловленное неплоским фазовым фронтом багрона в резонаторе [4, 7].

В случае параксиальных пучков и длиннофокусных зеркал [8] кольцевого резонатора собственный момент \mathbf{M} каждой компоненты свободного кольцевого багрона коллинеарен вектору площади \mathbf{S} .

В первом приближении уменьшение момента импульса [4, 7] или "масштабного коэффициента" ЛГ за счет неплоскостности фазового фронта на участке резонатора багрона будет равно разности

$$\Delta\mathbf{M} = -\hbar R_{eff} (b_s^{-1} + b_m^{-1}) \hat{\mathbf{s}},$$

где b_s, b_m — "конфокальные параметры пучка" [8] в сагиттальной и меридиональной плоскостях багрона на данном участке кольцевого резонатора. Для нескольких участков неплоского фронта с определенными конфокальными параметрами уменьшения моменты импульса складываются.

Длиннофокусные зеркала необходимы не только для добротности кольцевого лазерного резонатора, но и для стабильности "масштабного коэффициента" и оси чувствительности прибора ЛГ. Чем "параксиальнее" пучки в резонаторе, тем ближе направление этой оси к орту $\hat{\mathbf{s}}$ вектора \mathbf{S} .

При деформациях резонатора кольцевого лазера его осевой контур (разрешенная пространственная область генерации) меняется, и ось чувствительности ЛГ определяется новым направлением вектора \mathbf{S} .

Прецессия момента и "зона захвата"

Обнаружено [4, 9], что существование "зоны захвата" на выходной характеристике ЛГ

обусловлено общими свойствами момента импульса.

Была определена ось чувствительности компоненты кольцевого багрона как направление ее момента импульса \mathbf{M} в собственной системе отсчета, инерциальной до действия внешних сил, когда этот момент коллинеарен с вектором площади осевого контура резонатора \mathbf{S} .

Изменение \mathbf{M} во вращающейся системе связано с его изменением в инерциальной системе отсчета соответствующим преобразованием Галилея

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{M}) = \frac{d'}{dt}(\mathbf{M}) + [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{M}], \quad (7)$$

где производная момента импульса со штрихом соответствует его изменению во вращающейся системе [10].

Скалярно помножив уравнение (7) на вектор $\boldsymbol{\Omega}$, получим условие существования инварианта ЛГ. Инвариант ЛГ примет вид:

$$\left(\hat{\boldsymbol{\omega}} \frac{d}{dt}(\mathbf{M}) \right) = \left(\hat{\boldsymbol{\omega}} \frac{d'}{dt}(\mathbf{M}) \right) = \text{invariant}. \quad (8)$$

Уравнение (8) допускает прецессию вектора $d(\mathbf{M})/dt = \dot{\mathbf{M}}$ вокруг направления орта $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ вектора $\boldsymbol{\Omega}$ угловой скорости вращения.

Полагая, что изменение поляризации света происходит без трения, ожидается старт прецессии в соответствии с принципом наименьшего действия [10] от экстремальной позиции, где проекция "возбужденного" данной угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}$ несвязанного вектора $\dot{\mathbf{M}}$ на ось чувствительности $\hat{\mathbf{s}}$ минимальна (рис. 3).

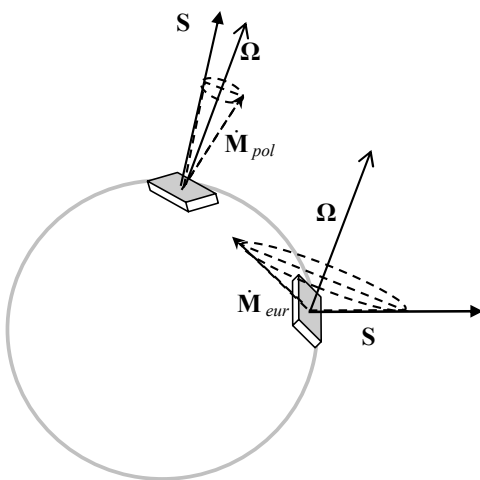


Рис. 3. Прецессия момента сил $\dot{\mathbf{M}}$ для одной из компонент кольцевого багрона в ЛГ:

\mathbf{S} — вектор площади; $\boldsymbol{\Omega}$ — угловая скорость суточного вращения Земли; вектор $\dot{\mathbf{M}}$ — момент сил

Эта проекция может быть равна нулю или даже быть меньше его в некоторых условиях. В каждый момент времени выходной сигнал ЛГ определяется проекцией вектора $\dot{\mathbf{M}}$ на ось чувствительности $\hat{\mathbf{s}}$ багрона к вращению, что ведет к возникновению "зоны захвата" на выходной характеристике ЛГ, когда без устройств "частотной подставки" ЛГ не реагирует на малые значения $\boldsymbol{\Omega}$.

Таким образом, единственное классическое соотношение для явления Саньяка (1) справедливо только когда векторы \mathbf{M} и $\boldsymbol{\Omega}$ почти коллинеарны, и тогда можно пренебречь прецессией (8), а в резонаторе — когда парааксиальные пучки с бесконечными плоскими фазовыми фронтами.

Таким образом, единственное классическое соотношение для явления Саньяка (1) справедливо только когда векторы \mathbf{M} и $\boldsymbol{\Omega}$ почти коллинеарны, и тогда можно пренебречь прецессией (8), а в резонаторе — когда парааксиальные пучки с бесконечными плоскими фазовыми фронтами.

Приложения явления прецессии момента

Новый подход позволяет создавать методики компенсации систематических погрешностей различных ЛГ. Кроме того, явление прецессии $\dot{\mathbf{M}}$ вокруг вектора действующей угловой скорости вращения $\boldsymbol{\Omega}$ позволяет создавать приборы для определения географических координат и др. На рис. 3 представлено горизонтальное расположение контура резонатора ЛГ в приполярной (pol) и в европейской (eur) области Земли.

После включения ЛГ вектор $\dot{\mathbf{M}}$, согласно закону сохранения момента импульса, начинает прецессию в собственной системе отсчета ЛГ вокруг вектора $\boldsymbol{\Omega}$ в сторону, противоположную вращению, под углом $\delta = 90^\circ - \lambda$, где λ — географическая широта местности горизонтального расположения ЛГ. "Зону захвата" характеризуем [9] "зонным углом" ζ между $\dot{\mathbf{M}}$ и осью $\hat{\mathbf{s}}$.

При горизонтальном расположении ЛГ на Земле зонный угол изменяется за сутки от $\zeta_{\min} = 180^\circ - 2\lambda$ до $\zeta_{\max} = 0^\circ$; при этом "масштабный коэффициент" ЛГ изменяется, соответственно, от минимального до максимального значения на данной местности.

Например, на экваторе: $\lambda_{eq} = 0^\circ$; $(\zeta_{eq})_{\min} = 180^\circ$; $(\zeta_{eq})_{\max} = 0^\circ$; "масштабный коэффициент" умножается на число от -1 до $+1$.

В средиземноморье: $\lambda_{med} = 45^\circ$; $(\zeta_{med})_{\min} = 90^\circ$; $(\zeta_{med})_{\max} = 0^\circ$; "масштабный коэффициент" умножается на число от 0 до $+1$.

В приполярной области: $\lambda_{pol} = 87^\circ$; $(\zeta_{pol})_{min} = 6^\circ$; $(\zeta_{pol})_{max} = 0^\circ$; "масштабный коэффициент" умножается на число от +0,995 до +1.

Известно, что в полярной Канаде, на острове Элсмир, в г. Алерт, севернее Гренландии (Ellesmere Island, Alert), группа компаний Litton в 80-х гг. проводила настройку производимых ЛГ. Эмпирическая сборка ЛГ производится в Алерте, потому что там ось чувствительности ЛГ почти перпендикулярна плоскости осевого контура генерации резонатора в течение всех техпроцессов сборки и настройки ЛГ. Горизонтальное же расположение ЛГ при настройке более технологично, его легче обеспечить и прецизионно контролировать.

В это же время автором на установке поворотной гироскопической УПГ-1 имитировались полярные условия, когда суммарный вектор Ω от вращений УПГ и от Земли (в Москве угловая скорость Земли $\approx 8,4$ град/ч) почти параллелен вектору \dot{M} .

УПГ включался до включения ЛГ. После включения ЛГ начиналась почти коллинеарная с суммарным вектором Ω прецессия вектора \dot{M} вокруг вертикальной оси вращения. Далее, когда после включения ЛГ быстро, много меньше суток, уменьшали угловую скорость стола УПГ — сигнал ЛГ менял свои характеристики, но не "захватывался". Измерения показывали, что граничные значения "зоны захвата" не превышали нижнего предела угловой скорости вращения на установке — выходной сигнал ЛГ уменьшался линейно, но не "захватывался".

При уменьшении угловой скорости поворотного стола УПГ начиналась прецессия вектора \dot{M} вокруг суммы векторов угловых скоростей от малого вращения УПГ и того же суточного вращения Земли, но сам уход вектора \dot{M} от вертикали происходил с малой угловой скоростью.

Для минимизации "зоны захвата" автор предложил [4, 9] включать подсистему переменного сдвига нулевой рабочей точки ЛГ на линейную часть его характеристики, или "частотную подставку" ЛГ до включения лазера, газового разряда, или любой другой лазерной активной среды.

В настоящее время это и делается в инерциальных навигационных системах отдельных компаний на основе эмпирических наблюдений без предлагаемой теории. При разработке необходимо также помнить, что активная среда в виде газового разряда имеет собственную эффективную электрическую индуктивность и электрическую емкость.

Выводы

1. Измерение угловой скорости необходимо проводить складывая действие переменной "частотной подставки" ЛГ с измеряемой медленно меняющейся угловой скоростью в тот момент времени, когда "масштабный коэффициент" почти равен своему максимальному расчетному значению, а угол ζ между этими векторами мал. Так, в Алерте при горизонтальном расположении ЛГ угол ζ мал.

2. С помощью ЛГ, осевой контур которого расположен горизонтально, можно измерять географическую широту местности.

3. С помощью ЛГ, осевой контур которого расположен на Земле вертикально, в экстремальных позициях по зонному углу ζ можно находить направление географической долготы или ось север—юг.

4. Большинство разработчиков все еще связывают "зону захвата" ЛГ исключительно с рассеянием света на некачественных зеркалах, что неверно. Из исследований автора следует, что обычно она значительно меньше провозглашаемой (например, менее 0,1 Гц вместо 1 кГц).

5. Формула М. Ж. Саньяка справедлива при $M \parallel \Omega$ (т. е. можно пренебречь изменением характеристики за счет прецессии) и бесконечных плоских фазовых фронтах излучения в резонаторе.

Данная работа выполнялась в ООО "Багрон" (1999—2002), Москва, Россия.

Литература

1. *Мандельштам Л. И.* Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. — М.: Наука, 1972.
2. *Heer C. V.* // The Phys. Rev. 1964. V. 134. P. A799.
3. *Померанцев Н. М., Скряцкий Г. В.* // УФН. 1970. Т. 100. № 3. С. 361.
4. *Мелкумян Б. В.* Влияние параметров резонатора и активной среды на выходной сигнал кольцевого лазера: Дис. ... канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика. М., 1991.
5. *Melkoutian B. V.* // Proceedings of SPIE. 1999. V. 4064. P. 4064-05.
6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — М.: Наука, 1973. — 326 с.
7. *Melkoutian B. V.* // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4348. P. 4348-02.

8. Ищенко Е. Ф. Открытые оптические резонаторы. — М.: Радио и связь, 1980.

9. Melkounian B. V. // Proceedings of SPIE. 2005. V. 5978. P. 5978-1Q.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1973.

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2009 г.

"Scale factor" of laser gyro

B. V. Melkounian

Moscow Institute of Economy, Management and Legality, Moscow, Russia

E-mail: B.Melkumyan@miemp.ru

Momentum of pulse of light and the sense of so-called "scale factor" of laser gyro (LG) are determined on the base of semiclassical theory. Quantum restriction of Sagnac effect and additive error of "scale factor" of LG are determined. Here is shown that "dead zone" on output characteristics of LG is conditioned with precession of momentum of forces vector around the vector of angular velocity, acting on ring baghron of light inside the LG.

PACS: 06.30-k

* * *