

УДК 681.7.069.24: 53.088; 53.043

Применение резонаторного датчика ускорения

Б. В. Мелкумян

Обсуждаются приложения явлений динамического изменения моды компонент стоячих волн излучения при ускоренном движении их фазовой структуры. Предложен новый акселерометр на основе автономного резонаторного датчика (АРД, ардатчика) без движущихся частей и без кольцевых резонаторов, размещённый неподвижно на объекте.

PACS: 01.65.+g, 03.30.+p, 07.60.Ly, 42.87.Bg

Ключевые слова: акселерометр, лазер, инерциальная навигационная система, динамическое изменение моды излучения.

Введение

Задачи управления и навигации транспортных средств и систем объектов, движущихся по местности, плавающих или летающих, решаются как с помощью глобальных систем навигации, 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. Сегодня это инерциальные навигационные системы (ИНС) на лазерных гироскопах и кварцевых акселерометрах, которые лучше защищены от атак хакеров, и их стоимость меньше, чем у спутниковых систем для многих приложений.

Существующие ИНС можно условно разделить на три группы.

I. Бесплатформенные ИНС (БИНС) на основе автономных, в том числе лазерных средств измерения, расположенных целиком на движущемся объекте, как предлагают компании Honeywell, Litton, SFENA или IMAR-navigation Co.

II. Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), такие как GPS (США), проект Галилео (Евросоюз) или ГЛОНАСС (Россия).

III. Интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (INS/GNSS), как предлагает Teknol Co. (www.teknol.ru).

ИНС исторически были разработаны до GNSS. Основными преимуществами ИНС являются высокоскоростной вывод данных для полного решения навигационной задачи и независимость системы от внешних источников данных.

Наиболее точные навигационные системы основаны, по меньшей мере, на 3-х лазерных гироскопах [1] и 3-х маятниковых кварцевых механических акселерометрах [2]. Размеры блока такой стандартной БИНС могут быть 500×400×300 мм, мощность блока питания — не менее 100 Вт, масса блока БИНС для аэробуса — не менее 3 кг. Они широко применяются в авиации, морской навигации, робототехнике и космонавтике.

Измерение с помощью маятникового акселерометра производят за счёт определения величины отклонения кварцевого подвеса маятника при ускорении системы, что ограничивает преимущества INS. Поскольку, прежде всего, после ускоренного движения остаточное напряжение в упругом подвесе приводит к неконтролируемой систематической погрешности акселерометра. Сигнал нуля маятникового акселерометра зависит от точки измерения над Землёй, а при свободном падении, когда подвес движется вместе корпусом прибора и вместе с объектом, такой акселерометр не измеряет.

В современных системах применяются два типа акселерометров: механические [2] и интерферометрические [3]. Последние, хотя и считаются оптическими приборами, но функционально подобны первым, потому что принцип работы акселерометров по [3] — это воздействие инертной массы на материал оптического канала. В [4] интерпретируются измерения подобными интерферометрическими акселерометрами, когда показатели преломления сред для прямого и обратного прохода излучения различны.

Целью данной работы является рассмотрение явлений динамического изменения моды ком-

Мелкумян Баграт Владимирович, докторант¹, доцент².

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

²Московский университет им. С. Ю. Витте.

Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, 12.

Тел. 8 (495) 500-03-63, доб. 41-29.

E-mail: bgo@bk.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2014 г.

понент стоячих волн излучения при ускоренном движении их фазовой структуры, приводящих к возможности создания автономного резонаторного датчика (АРД, ардатчика) без движущихся частей и без кольцевых резонаторов, который, в свою очередь, может быть ядром нового типа акселерометра, размещаемого неподвижно на объекте.

Предлагаемая ИНС на АРД

Предлагается ИНС на основе АРД с однородной неподвижной средой в резонаторе для измерения линейных ускорений и высоких угловых скоростей вращения по [5]. Предлагаемая система будет компактной, без каких-либо механических движущихся или напрягающихся частей и без кольцевых лазерных резонаторов в составе чувствительных элементов, располагаясь неподвижно на измеряемом объекте (см. рис. 1). Предварительные результаты докладывались в работах [6—10].

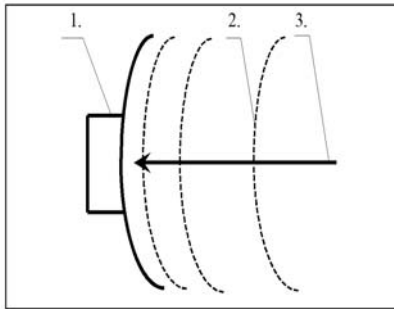


Рис. 1. Решение газодинамических и гидродинамических задач: 1 — ардатчик, 2 — мембрана поверхности или фазовая поверхность в жидкости, 3 — действующая сила

Предлагается блок БИНС на 6-и унифицированных ардатчиках, каждый массой не более 20 грамм, работающих в течение всего движения объекта с одной и той же точностью и одним и тем же сигналом нуля. При этом можно измерять 3 угловые скорости вращения и 3 ускорения линейного движения объекта, поскольку пара ардатчиков измеряет угловую скорость с одной и той же высокой точностью во всём диапазоне измерений.

Отклики от АРД

Для решения навигационных и аэродинамических задач создан прототип нового лазерного акселерометра на основе автономного резонаторного датчика [5] без движущихся частей и без кольцевых резонаторов, с однородной неподвижной средой в резонаторе, который при измерениях целиком располагают неподвижно на объекте. Основные работы проводились в ИОФ РАН и МРТИ РАН.

Измерение с помощью ардатчика производят за счёт обнаруженного изменения простран-

венно-временных характеристик излучения из линейного лазерного резонатора при его ускоренном движении. Динамическое изменение моды излучения позволяет измерять линейное ускорение объекта относительно инерциальной системы отсчёта.

Наличие внешнего воздействия (неравномерного движения) сопровождается градиентом фазы излучения в направлении, перпендикулярном вектору ускорения, и подтверждается экспериментально [9—12]. Окончательно, фаза излучения в прямоугольном резонаторе, движущемся с постоянным ускорением \vec{a} , определяется формулой

$$\Phi_{\pm} = \left[\omega_0 t - \left(\frac{\vec{a} \cdot t^2}{2} \cdot \vec{\nabla} \right) \tilde{\Phi}(0; \vec{r}) \right] + i \cdot \left[T(t) \pm \frac{a^2 t^4}{6} \Xi^2 \right] \cdot \sin(\vec{\Xi} \cdot \vec{r}). \quad (1)$$

Здесь в (1) функция $T(t)$ — временная часть решения однородного уравнения для фазы, которая является функцией Бесселя с индексом (1/4) для постоянного ускорения. Два индекса в величине Φ_{\pm} соответствуют двум разрешённым направлениям излучения для каждой моды линейного резонатора, $\vec{\Xi}$ — вектор излучения, спектр которого определяет разрешённые направления излучения из движущегося резонатора, $\tilde{\Phi}(0; \vec{r})$ — начальное, до ускоренного движения, распределение фазы излучения в резонаторе [9, 10].

Основные конструктивные и схемные решения прототипа АРД отражены на рис. 2—5.

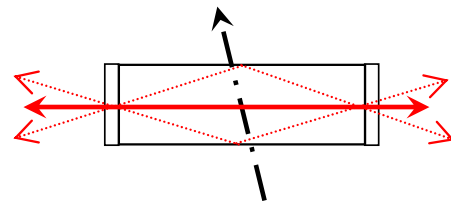


Рис. 2. Изменение пространственных характеристик излучения при неравномерном движении резонатора вдоль итрих — пунктирной стрелки. Сплошная двойная стрелка соответствует излучению неподвижного резонатора. Стрелки точечных линий соответствуют направлениям излучения при неравномерном движении резонатора

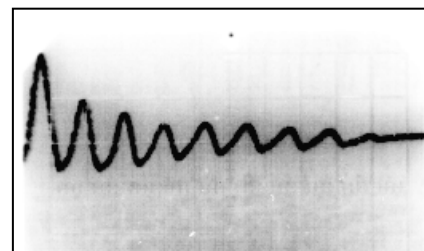


Рис. 3. Переменная часть отклика АРД для постоянного ускорения (ударное воздействие). Здесь на экране осциллографа усиление — 100 мВ/дел, шкала развёртки — 10 мс/дел

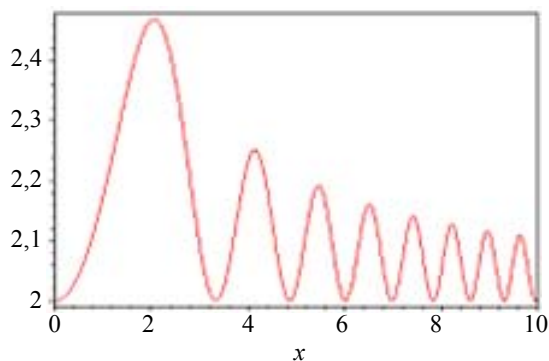


Рис. 4. Вычисленная переменная часть отклика АРД при постоянном ускорении

На рис. 5 усиление для сигнала отклика — 5 мВ/дел; частота гармонических колебаний — 200 Гц; усиление для гармонического сигнала — 5 В/дел.

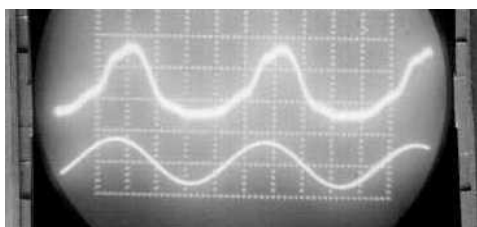


Рис. 5. Вверху — переменная часть отклика АРД при гармоническом воздействии на датчик, зафиксированный на мембране. Внизу — гармонический входной сигнал на мембрану от звукового генератора

Выходной сигнал на рис. 5 имеет увеличенную, по сравнению с отсутствием движения, постоянную составляющую сигнала и малую, существенно негармоническую, переменную часть. Виден результат последовательных наложений переменной составляющей. Заметно смещение «амплитуды» и «частоты» нелинейных колебаний и огибающей. Наблюдения колебаний с АРД опубликованы в [7—9].

На рис. 5 ардатчик был закреплён на колеблющейся мембране. Верхняя кривая получается «жирной» в результате многократного прохождения увеличивающегося сигнала отклика на экране осциллографа. Нижняя гармоническая кривая — это входной сигнал от звукового генератора на мембрану динамика. Входной гармонический сигнал на рис. 5 изменяется вокруг нуля, а постоянная составляющая отклика АРД при вибрациях с увеличенным ускорением приводит усилитель фотоприёмника в насыщение.

Иногда график функции отклика колебаний как бы переворачивается. В данном случае, на рис. 6

«затяжка» одного графика находится у максимума, другого — вблизи минимума. Это связано не с другим знаком действующего на АРД ускорения, а с иными параметрами нелинейного колебания.

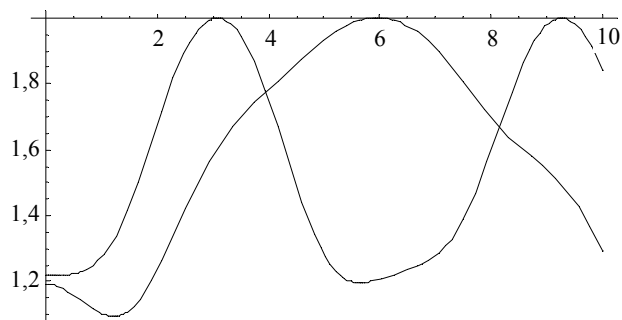


Рис. 6. Рассчитанные отклики АРД, закреплённого на мембране с различными параметрами колебаний при гармоническом воздействии на акселерометр

АРД на основе полупроводникового лазера

Оптическая схема прототипов ардатчиков из нижеприведенной таблицы представлена на рис. 7.

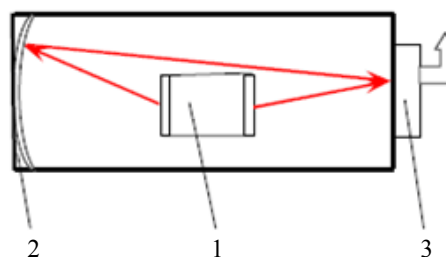


Рис. 7. Оптическая схема «В-1АС» и «В-1АМ», где 1 — резонатор полупроводникового лазера; 2 — сводящее зеркало; 3 — фотоприёмник

Характеристики прототипов ардатчиков «В-1АС» и «В-1АМ», разработанных по [5], и аналога по точности, кварцевого акселерометра «А-4», приведены в таблице.

Подчеркнём, что инертность линейной стоячей волны, согласно предложенной теории и экспериментальным результатам [5—10], заключается в сильном искажении входного сигнала ускорения. В зависимости от воздействия и параметров резонатора, функция отклика АРД перестаёт замечать сильное постоянное внешнее воздействие $1 \div 0,1 \text{ g}$ через $1 \div 100 \text{ мс}$ соответственно. Время нарастания первого максимума отклика АРД при ускорении $< 10^{-6} \text{ g}$ составляет до сотни секунд при малой амплитуде.

Характеристики прототипов «В-1АС» и «В-1АМ»

Характеристики	«В-1АС»	«В-1АМ»	Аналог по точности «А-4»
Масса	< 0,015 кг	< 0,020 кг	0,050 кг
Размеры с предусилителем	12×12×32 мм	∅12×32 мм	∅38×21 мм
Динамический диапазон	±12 g	±12 g	±7 g
Блок питания постоянного тока	±5 В; +2 В; 0,1 Вт	±5 В; +2 В; 0,1 Вт	±15 В; +9 В; 100 мА
Частотный диапазон работы	(0÷100) кГц Определяет предусилитель	(0÷100) кГц Определяет предусилитель	(0÷100) Гц Определяют материалы
Выходной сигнал	Аналоговый	Аналоговый	Аналоговый
Чувствительность	< 10 ⁻⁶ g	< 10 ⁻⁵ g	5·10 ⁻⁷ g
Нестабильность нулевого сигнала за всё время движения	Не зависит от g, определяется электроникой	Не зависит от g, определяется электроникой	Не хуже 5·10 ⁻⁵ g при постоянном ускорении свободного падения
Нестабильность крутизны во всём динамическом диапазоне	Не зависит от g, определяется электроникой	Не зависит от g, определяется электроникой	Не более 0,02 % при постоянном ускорении свободного падения

Лазерный гироскоп без кольцевого резонатора из 2-х АРД

При вращении объекта с угловой скоростью Ω каждая его точка с радиус-вектором r в плоскости, перпендикулярной Ω , получает ускорение a , направленное к оси вращения. Для любых двух точек 1 и 2 такого объекта можно написать:

$$a_{1,2} = \Omega^2 r_{1,2}. \tag{2}$$

В уравнении (2) r_1 и r_2 — радиус-векторы 2-х точек объекта. Для разности (Δa_{12}) сигналов двух акселерометров, зафиксированных на объекте на расстоянии $|b|_{12}$, имеем:

$$\Delta a_{12} = \Omega^2 b_{12}. \tag{3}$$

В уравнении (3) вектор b_{12} — это векторная разность радиус-векторов r_1 и r_2 , которая уже не зависит от положения оси вращения.

Поэтому 2-х ардатчиков с одинаковым преобразователем и одинаковым нулевым сигналом достаточно для измерения одной компоненты угловой скорости Ω_i . Ошибка нуля в ардатчике не зависит от ускорения.

Отметим, что для обеспечения измерения малых угловых скоростей базовое расстояние $|b|_{12}$ должно быть значительным.

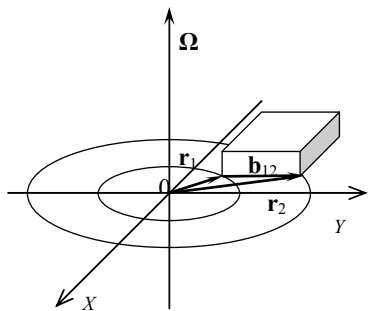


Рис. 8. Блок лазерного гироскопа (без кольцевого резонатора) из двух однотипных АРД

На рис. 8 обозначено: (X), (Y) и (Z) — оси координат собственной системы отсчёта ИНС; b_{12} — вектор базового расстояния между двумя 1-осными АРД.

Навигационная система на 6-и АРД

Возможность создания нового лазерного гироскопа (ЛГ) из двух АРД позволяет предложить автономный блок чувствительных элементов из 6-и унифицированных мини модулей АРД. Каждая из 2-х остроугольных трёхосных систем координат этой системы управления содержит 3 оси чувствительности от 3-х одноосных АРД.

Навигационная система составляется из пары неподвижных друг относительно друга 3-осных АРД, каждый из которых составляет косоугольную систему координат объекта (см. рис. 9).

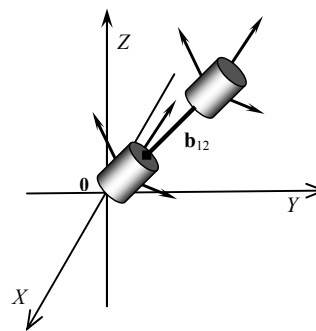


Рис. 9. Схема системы управления и навигации из шести однотипных АРД

На рис. 9 обозначено: (X), (Y) и (Z) — оси координат собственной системы отсчёта ИНС; b_{12} — вектор базового расстояния между двумя 3-осными АРД. Каждая из 2-х остроугольных трёхосных систем координат этой системы управления содержит 3 оси чувствительности от 3-х одноосных АРД.

Заключение

Предлагаемый ардатчик является основой компактной и доступной автономной инерциаль-

ной навигационной системы. Она применима для управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), для автономного контроля движения группы летательных аппаратов без использования ГЛОНАСС, в цепях обратной связи систем контроля и управления транспорта, станков и инструмента, для анализа разрушающих высокочастотных колебаний, в системах сертификации протезов, в мембранных системах, а также в компьютерной 3D-мыши без коврика.

Автор выражает свою глубокую благодарность А. А. Рухадзе и участникам руководимого им семинара в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН за полезные замечания и плодотворные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелкумян Б. В. // Прикладная физика. 2009. № 5. С. 137.
2. Ишлинский А. Ю. Классическая механика и силы инерции. — М.: «Наука» (1987).
3. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчёта и применения. — М.: «Энергоатомиздат» (1990).
4. Деветисильный А. С. // ЖТФ. 2002. Т. 74. Вып. 9. С. 141.
5. Melkougian B. V. Method and device for autonomous measurement of an irregular movement based on resonatory sensor. App. № 08/568,815; priority date: Dec. 07, 1995; US patent № 5,652,390; date of patent: July 29, 1997. Class: 073-657.000.
6. Melkougian B. V. // SPIE paper. 2007. No. 6736-10. P. 67360B-1.
7. Melkougian B. V. // SPIE paper. 2002. No. 4627-37.
8. Melkougian B. V. // SPIE paper. 2001. No. 4365-28.
9. Melkougian B. V. / Proceedings of the 11th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Ed. Bityurin V. A., Moscow, Joint Institute of High Temperature of RAS, (2012), pp. 366-372.
10. Melkougian B. V. New solutions for autonomous control & navigation, The 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (Abstracts), M.
11. Мелкумян Б. В. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 17.
12. Мелкумян Б. В. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 97.

Using the resonator sensor of acceleration

B. V. Melkougian

A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: bgo@bk.ru

Received November 20, 2014

We discuss new phenomena of altering of the spatial-temporal characteristics of the components of standing waves of light in the cavity during accelerated motion of the cavity. The earlier theoretical results that provide to create the autonomous resonatory device — accelerometer with fixed content based on the patent of the author are summarized. The applications and the main benefits of its application are discussed.

PACS: 01.65.+g, 03.30.+p, 07.60.Ly, 42.87.Bg

Keywords: accelerometer, laser, mode, radiation.

REFERENCES

1. B. V. Melkougian, Prikladnaya Fizika, No. 5, 137 (2009).
2. A. Yu. Ishlinsky, *Classical Mechanics u Inertia Forces* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
3. V. I. Busurun and Yu. R. Nosov, *Fiber-Optic Current Sensors* (Energoatomizdat, Moscow, 1990) [in Russian].
4. A. S. Devisitsilnyi, Tech. Phys. **74**, 141 (2002).
5. B. V. Melkougian, *Method and device for autonomous measurement of an irregular movement based on resonatory sensor*. App. № 08/568,815; priority date: Dec. 07, 1995; US patent № 5,652,390; date of patent: July 29, 1997. Class: 073-657.000.
6. B. V. Melkougian, SPIE paper. No. 6736-10, 67360B-1 (2007).
7. B. V. Melkougian, SPIE paper. No. 4627-37, (2002).
8. B. V. Melkougian, SPIE paper. No. 4365-28, (2001).
9. B. V. Melkougian, in *Proceedings of the 11th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics*. Ed. Bityurin V. A. (Moscow, Joint Institute of High Temperature of RAS, 2012), pp. 366-372.
10. B. V. Melkougian, *New solutions for autonomous control & navigation*, in *Abstracts of the 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics* (Moscow).
11. B. V. Melkougian, Prikladnaya Fizika, No. 3, 17 (2014).
12. B. V. Melkougian, Prikladnaya Fizika, No. 4, 97 (2014).