
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.372.82
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-117-122

ПРОСТАЯ СХЕМА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Д. А. МАТРЕХИН, А. Н. ТЫНЫНЫКА

*Одесский национальный политехнический университет, 65044, Одесса, Украина
E-mail: polalek562@gmail.com*

Специфика конструкции волоконно-оптических датчиков, используемых в гироскопах гражданского и военного назначения, обуславливает дополнительные требования к источникам излучения: соответствие длины волны излучения номинальной длине волны световода, где потери минимальны; достаточно высокая эффективность ввода излучения в световод; возможность работы источника излучения в непрерывном режиме без охлаждения; достаточно высокий уровень выходной мощности излучателя; долговечность, воспроизводимость характеристик, жесткость конструкции, а также минимальные габариты, масса, потребляемая мощность и стоимость. Рассмотрены конструктивные параметры, оказывающие наибольшее влияние на чувствительность датчика, и предложена структурная схема недорогого волоконно-оптического датчика угловой скорости, обеспечивающая заданные технические показатели. Рассмотрены особенности составных частей структурной схемы: источника излучения, разъемов, поляризатора, оптоволокну, конструкции сенсорной катушки, фазового модулятора и др.

Ключевые слова: эффект Саньяка, волоконно-оптический датчик, угловая скорость, структурная схема, требования к составным частям

Навигационные системы в авиации, военно-морские и космические системы для гражданских и военных областей применения требуют использования очень чувствительных датчиков угловой скорости. Существуют четыре типа датчиков угловой скорости: динамически настроенный гироскоп [1], микроэлектромеханическая система [2], кольцевой лазерный гироскоп [3] и волоконно-оптический гироскоп [4]. Волоконно-оптические гироскопы наиболее предпочтительны и выгодны в применении. По сравнению с другими датчиками оптоволоконный имеет следующие технологические преимущества [5—7]:

- отсутствие движущихся частей (роторов, подшипников);
- нечувствительность к ударам и вибрациям;
- нечувствительность к гравитации или ускорениям;
- простота блокировки;
- малое время инициализации;
- хорошая чувствительность;
- длительный срок службы и высокая надежность;
- низкое энергопотребление;
- широкий динамический диапазон;

— высокая линейность характеристик;
 — малые масса и габариты;
 — невысокая стоимость конструирования и серийного производства, а следовательно — экономическая привлекательность.

Цель настоящей статьи — разработка экономически привлекательного датчика угловой скорости на основе волоконно-оптических конструкций.

Описание работы датчика. В 1912 г. Гаррес и затем Саньяк в 1913 г. продемонстрировали, что можно обнаружить поворот оптической системы относительно инерциального пространства. Предложенный ими метод обладал весьма малой чувствительностью и потому был далек от практического применения в датчиках угловой скорости. В 1962 г. Розенталь [3] увеличил чувствительность, применив кольцевую полость вместо интерферометра Саньяка, а после 1963 г. на ее основе [8—10], был создан кольцевой лазерный гироскоп [10]. С использованием оптических волокон с низким коэффициентом потерь и твердотельных полупроводниковых источников света и детекторов в 1976 г. В. Вали и Р. У. Шортилл [4] создали первый интерферометрический волоконно-оптический гироскоп.

В волоконно-оптическом датчике угловой скорости используется эффект Саньяка — создание разности фаз $\Delta\varphi$, пропорциональной скорости вращения Ω кольцевого интерферометра. Схема интерферометра с круговым оптическим путем в вакууме (рис. 1) иллюстрирует эффект Саньяка. Лучи света противоположных направлений проходят весь одновитковый контур, после чего измеряется смещение фаз. Контур вращается вместе с объектом с угловой скоростью Ω , и для неподвижного наблюдателя точка P сдвигается на угол $\Omega\tau$ за время распространения излучения τ [11, 12].

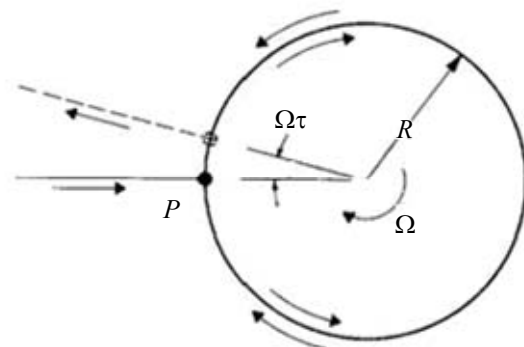


Рис. 1

Если окружная скорость движения оптического волокна v , то скорость распространения света в волокне в направлении вращения $c - v$, а в противоположном — $c + v$ (c — скорость света в вакууме). Следовательно, свет попутного направления попадет в точку встречи (к измерителю фазы) с опозданием по времени $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = L[1/(c-v) - 1/(c+v)] = 2Lv/(c^2 - v^2), \quad (1)$$

где L — длина оптоволоконна.

За время Δt луч света пройдет расстояние

$$\Delta L = \Delta t(c-v) = 2Lv/(c+v). \quad (2)$$

Окружная скорость оптического волокна гироскопа v на много порядков меньше скорости света c , с учетом этого выражение (2) можно упростить и записать в виде

$$\Delta L = 2Lv/c. \quad (3)$$

Отставание по фазе $\Delta\varphi$ света попутного направления запишется как

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta L/c\lambda, \quad (4)$$

где λ — длина волны света.

Подставив в (4) выражение окружной скорости $v = \Omega R$ и длины оптического волокна $L = 2\pi R$ и учитывая, что произведение πR^2 представляет собой площадь S , ограниченную волокном, можно записать:

$$\Delta\varphi = 8\pi S\Omega/c\lambda. \quad (5)$$

Эта формула применима и для одновиткового контура, и для многовитковой катушки, в последнем случае S представляет собой сумму площадей всех витков.

Анализ формулы показывает, что круговая форма навивки оптоволоконна предпочтительна, поскольку окружность ограничивает максимальную площадь при фиксированной длине волокна. Если требуется связать чувствительность с габаритами датчика, следует записать формулу так, чтобы в явном виде в нее входили длина волокна и радиус навивки:

$$\Delta\varphi = 4\pi LR\Omega/c\lambda, \quad (6)$$

$4\pi LR/c\lambda$ — масштабный коэффициент гироскопа. Его погрешность в серийных приборах лежит в пределах 0,005—0,5 %.

Из такой записи видно, что смещение фаз встречных излучений пропорционально длине и радиусу навивки оптического волокна гироскопа. Эти параметры, выбираемые при конструировании прибора, оказывают наибольшее влияние на чувствительность гироскопа. При максимально возможной фиксированной величине L чувствительность гироскопа прямо зависит от радиуса навивки волокна.

В гироскопе, используемом на авиалайнере в качестве датчика угловой скорости крена, максимально возможный радиус укладки оптоволоконна не может превышать радиуса фюзеляжа самолета. Поскольку средний радиус фюзеляжа на два порядка больше радиуса навивки волокна выпускаемых гироскопов, этот прием позволит увеличить разрешающую способность гироскопа на те же два порядка и обойтись одним витком. Таким образом, для повышения качества измерения при малых угловых скоростях необходимо увеличивать окружную скорость оптоволоконна за счет увеличения радиуса его укладки. Если величина ограничена по конструктивным соображениям, следует L увеличивать за счет числа витков, и требуемую чувствительность будет обеспечивать одномодовая многооборотная волоконная катушка.

Известно [13], что в отсутствие вращения в двулучевом интерферометре максимальное количество света возвращается к детектору. При увеличении угловой скорости мощность обрабатываемого детектором сигнала постепенно уменьшается по косинусоидальному закону и достигает нуля при $\Delta\varphi = \pm\pi$ [14]. Диапазон измерения фазы в пределах $\pm\pi$ вокруг нуля соответствует рабочему диапазону $\pm\Omega_p$ [11]:

$$\Omega_p = \lambda c/4LR. \quad (7)$$

В случае малой угловой скорости приращение на выходе интерферометра тоже мало. Если полная разность фаз много меньше 1 рад, значение косинуса будет близко к максимальному, когда крутизна косинусоидальной функции почти не меняется при изменении аргумента, и невозможно зафиксировать принятый световой сигнал и определить знак сдвига фазы Саньяка. Чтобы преодолеть эти проблемы, можно сдвинуть рабочую точку с вершины косинусоидальной кривой в область квазилинейного отклика [14, 15].

Невысокую стоимость датчика угловой скорости обеспечивает структурная оптическая схема, приведенная на рис. 2.

Световой поток из светодиода источника поступает в одномодовое волокно и доходит до 2×2 -направленного ответвителя. Здесь половина света попадает на поляризатор, а выходя из него, входит во второй 2×2 -направленный ответвитель, затем перемещается через 1000-метровую катушку оптического волокна и переходит в фазовый модулятор. Из оптического соединителя волна поступает на детектор, усиливается и демодулируется.

Специфика конструкции волоконно-оптических датчиков обуславливает дополнительные требования к источникам излучения: соответствие длины волны излучения номинальной длине волны световода, где потери минимальны; достаточно высокая эффективность ввода

излучения в световод; возможность работы источника излучения в непрерывном режиме без охлаждения; достаточно высокий уровень выходной мощности излучателя; долговечность, воспроизводимость характеристик, жесткость конструкции, а также минимальные габариты, масса, потребляемая мощность и стоимость.

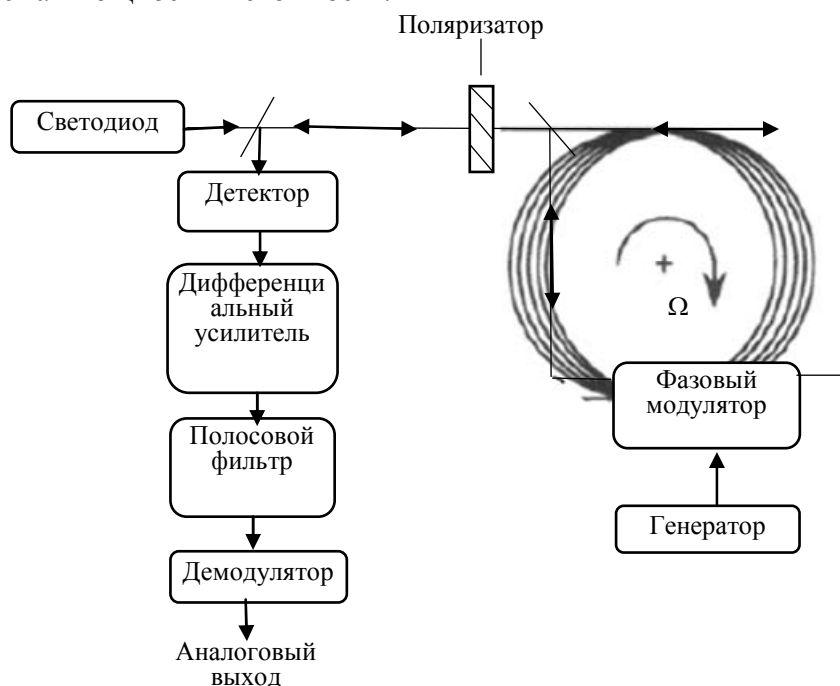


Рис. 2

Перечисленным требованиям удовлетворяет InGaAsP-светодиодный излучатель. Он работает на длине волны 1310 нм и обеспечивает на этой волне выходную мощность 10 мВт, ширина его спектра составляет 40 нм. Светодиод снабжен разъемом типа ST.

Сенсорная катушка содержит 1000 м одномодового оптического волокна ALCATEL (затухание — 0,328 дБ/км для 1310 нм, диаметр сердечника и оболочки 9,3 и 125 мкм соответственно) модели SM (тип E), ее диаметр — 12,3 см — достаточен, чтобы потери на изгибах возрастали незначительно без увеличения габаритов датчика. Такая катушка обеспечивает регистрацию фазы с разрешением порядка 10^{-5} рад, чего достаточно для обнаружения скорости вращения в 1 °/ч.

Рассчитанный по формуле $4\pi LR/c\lambda$ масштабный коэффициент с такой катушкой оказался равным 1,966, а динамический диапазон — 91,53 °/с (уравнение (6)).

Подходящий для работы с длиной волны 1310 нм InGaAs-детектор имеет дифференциальный выход. Он обеспечивает достаточную интегральную чувствительность, минимальные эквивалентную мощность шумов и темновой ток.

Направленные оптические соединители с коэффициентом разделения 50% / 50% обладают затуханием 3,6 дБ на длине волны 1310 ± 40 нм. Встроенный поляризатор вносит потери 0,8 дБ, а коэффициент экстинкции 26 дБ. Оба порта поляризатора имеют разъемы типа FC.

Динамический фазовый модулятор позволяет сдвинуть рабочую точку системы в линейную область.

Любая фазовая невязанность для двух направлений движения света приводит к изменению показаний датчика. Если величина невязанности зависит от времени, имеет место некоторый временной дрейф в показаниях датчика.

В соответствии с теоремой взаимности Лоренца в случае линейной системы оптические пути взаимны, если входная пространственная мода соответствует выходной. В схему на рис. 2 помещен второй расщепитель пучка вдоль входного оптического пути, уравнивающий число

отражений от расщепителей для пучков света, распространяемых по часовой стрелке и против нее.

Достигнутые параметры оптического волокна, оптических соединителей, светоделителей, оптоинтегральных схем таковы, что предложенная схема обеспечивает требуемые точность, нестабильность сдвига нуля и масштабного коэффициента, динамический диапазон, приемлемые не только в автомобильной и робототехнике, но и в более сложных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howe E. W., Savet P. H. The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro // Control Engineering. 1964. June. P. 67—72.
2. Piyabongkarn D., Rajanmani R., Greminger M. The Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement // IEEE Transact. on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13, N 2. P. 185—195.
3. Rosenthal A. H. Regenerative Circulatory Multiple Beam Interferometry for the Study of Light Propagation Effect // JOSA. 1962. Vol. 52. P. 1143—1148.
4. Vali V., Shorthill R. W. Fiber Ring Interferometer // Applied Optics. 1976. Vol. 15. P. 1099—1100. DOI: org/10.1364/AO.15.001099.
5. Lee B. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors // Optical Fiber Technology, Science direct. 2003. N 9. P. 57—79.
6. Burns W. K. Current status of fiber-optic gyroscopes // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. OSA Technical Digest Series. Optical Society of America, 1998. P. FA1.
7. Ono K., Nishiura Y., Nishikawa M. A small sized, compact, open-loop fiber-optic gyroscope with stabilized scale factor // Meas. Sci. Technol. 1990. N 1. P. 1078—1083.
8. Macek W. M., Davis D. T. M. Rotation-Rate Sensing With Traveling-Wave Ring Laser // Applied Physics Letters. 1963. Vol. 2. P. 67—68.
9. Боронахин А. М., Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб: Элмор, 2008. 400 с.
10. Laser Internal Rotation Sensors / Ed. by S. Ezekil, G. E. Knausenberger // SPIE Proc. 1978. Vol. 157.
11. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. 2nd ed. Artech House, 2014. 405 p.
12. Ruffin P. B. Fiber Optic Gyroscope Sensors // Fiber Optic Sensors. Taylor & Francis, 2008. P. 334—364.
13. Bergh R. A., Lefevre H. C., Shaw H. J. An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes // J. of Lightwave Technology. 1984. Vol. 2, N 2. P. 91—107.
14. Toyama K. Brillouin Fiber-Optic Gyroscope and Digital Integration Gyroscope. PhD Thesis, Stanford University, 1996.
15. Polynkin P. Sagnac and In-Line Interferometer Technology Advances. PhD Thesis. Texas A&M University, USA, 2000.

Сведения об авторах

- Дмитрий Александрович Матрехин** — магистрант; Одесский национальный политехнический университет, кафедра электронных средств и компьютерных технологий; E-mail: matrtihin.dumuch@gmail.com
- Александр Николаевич Тыныныка** — канд. техн. наук, доцент; Одесский национальный политехнический университет, кафедра электронных средств и компьютерных технологий; E-mail: polalek562@gmail.com

Поступила в редакцию
07.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Матрехин Д. А., Тыныныка А. Н. Простая схема волоконно-оптического датчика угловой скорости // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 117—122.

SIMPLE SCHEMATIC OF FIBER-OPTIC SENSOR OF ANGULAR VELOCITY

D. A. Matryokhin, A. N. Tynnyka

Odessa National Polytechnic University, 65044, Odessa, Ukraine

E-mail: polalek562@gmail.com

Specifics of design of fiber-optic sensors used in gyroscopes for civil and military purposes are discussed. The specifics are reported to cause additional requirements for radiation sources: compliance with the wavelength of radiation of the nominal wavelength of the light guide, where the loss is minimal; sufficiently high efficiency of the input of radiation into the light guide; the possibility of a radiation source operation in continuous mode without cooling; a sufficiently high level of the output power of the radiator; durability, reproducibility of characteristics, rigidity of the structure, as well as minimum dimensions, weight, power consumption and cost. Parameters of the sensor design that have the greatest impact on its sensitivity are considered. A block diagram of an inexpensive fiber-optic angular velocity sensor providing the specified technical parameters is proposed. The features of the block diagram components are considered, including the radiation source, connectors, polarizer, optical fiber, as well as design of the sensor coil, phase modulator, etc.

Keywords: Sagnac effect, fiber optic sensor, angular velocity, block diagram, component requirements

REFERENCES

1. Howe E.W., Savet P.H. *Control Engineering*, 1964, June, pp. 67–72.
2. Piyabongkarn D., Rajanmani R., Greminger M. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, no. 2(13), pp. 185–195.
3. Rosenthal A.H. *JOSA*, 1962, vol. 52, pp. 1143–1148.
4. Vali V., Shorthill R.W. *Applied Optics*, 1976, vol. 15, pp. 1099–1100. DOI: org/10.1364/AO.15.001099.
5. Lee B. *Optical Fiber Technology, Science direct*, 2003, no. 9, pp. 57–79.
6. Burns W.K. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, OSA Technical Digest Series. Optical Society of America, 1998, p. FA1.
7. Ono K., Nishiura Y., Nishikawa M. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, no.1, pp. 1078–1083.
8. Macek W.M., Davis D.T.M. *Applied Physics Letters*, 1963, vol. 2, pp. 67–68.
9. Boronakhin A.M., Luk'yanov D.P., Filatov Yu.V. *Opticheskiye i mikromekhanicheskiye inertial'nyye pribory* (Optical and Micromechanical Inertial Devices), St. Petersburg, 2008. 400 p. (in Russ.)
10. Ezekil S., Knausenberger G.E., eds., *Laser Internal Rotation Sensors*, SPIE Proc., 1978, vol. 157.
11. Lefevre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*, 2nd ed., Artech House, 2014, 405 p.
12. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S., eds., *Fiber Optic Gyroscope Sensors*, Taylor & Francis, 2008, pp. 334–364.
13. Bergh R.A., Lefevre H.C., Shaw H.J. *J. of Lightwave Technology*, 1984, no. 2(2), pp. 91–107.
14. Toyama K. *Brillouin Fiber-Optic Gyroscope and Digital Integration Gyroscope*, PhD Thesis, Stanford University, August, 1996.
15. Polynkin P. *Sagnac and In-Line Interferometer Technology Advances*, PhD Thesis, Texas A&M University, USA, May. 2000.

Data on authors

- Dmitry A. Matryokhin** — Master student; Odessa National Polytechnic University, Department of Electronic Tools and Computer Technologies;
E-mail: matrohin.dumuch@gmail.com
- Alexander N. Tynnyka** — PhD, Associate Professor; Odessa National Polytechnic University, Department of Electronic Tools and Computer Technologies;
E-mail: polalek562@gmail.com

For citation: Matryokhin D. A., Tynnyka A. N. Simple schematic of fiber-optic sensor of angular velocity. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 117–122 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-117-122