

14. M. Liebling, T. Blu, M. Unser, Complexwave retrieval from a single off-axis hologram, J. Opt. Soc. Am. A 21, 2004, 367 – 377.
15. P. Ferraro et al., "Compensation of the inherent wave front curvature in Digital Holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging" Appl. Opt., 42, 2003, 1938-1946.
16. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, edited by Peter H. Lehmann, Proc. of SPIE Vol. 7389, 2009.
17. U. Schnars, W. Jüptner, Digital Holography, Springer-Verlag, Heidelberg, 2005.
18. D. Carl, B. Kemper, G. von Bally, Digital holographic microscope for living cell analysis, BMT 49 Extension Part 2, 2004, 978-979.
19. Laurent Sache, Hannes Bleuler, Massively Parallel Scanning Probes Microscope with Digital Holographic Readout, Materials Research Society Symp. Proc. Vol. 961, 2007.
20. G. Di Caprio, G. Coppola, S. Grilli, P. Ferraro, R. Puglisi, D. Balduzzi and A. Galli, Microfluidic system based on the digital holography microscope for analysis of motile sperm, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Proc. of SPIE Vol. 7389, 2009.
21. <http://www.phiab.se/>
22. www.numericalvision.com
23. Каленков С.Г., Власов Н.Г., Крылов Д.В., Штанько А.Е. «Безлинзовая цифровая микроскопия», Естественные и технические науки, Т. 3, 2004, № 12, стр. 117-120.

Надійшла до редакції
21.10.2010 р.

УДК 621.372.81: 531.383

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины

И.Н. ХОМА

Хмельницкий национальный университет

ИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА С. САНЬЯКА

В статье проанализирован процесс измерения угловой скорости на основе эффекта С. Саньяка. Представлено одно из технических решений задачи измерения угловой скорости.

In the article analysed proces measurings of angulator on the basis of effect S. San'yaka. One of technical decisions of task of measuring of angulator is presented.

Ключевые слова: угловая скорость, эффект Саньяка.

Введение

Ориентация объекта в пространстве невозможна без использования гироскопов. Среди всего многообразия гироскопов наибольший интерес имеют волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), обеспечивающие: высокую чувствительность, небольшие габариты и массу, невысокую стоимость производства при массовом изготовлении и относительную простоту технологии, низкое потребление энергии, большой динамический диапазон измерения угловых скоростей (от 1 град/ч до 300 град/с), высокую надежность за счет отсутствия вращающихся элементов, работоспособность в условиях больших механических перегрузок и т.д.

Исследованиям ВОГ посвящены работы Шереметьева А.Г., Окоси Т., Малыкина Г.Г., Малыкина Г.Б., Поздняковой В.И., Андроновой И.А., Геликонова В.М., Логунова А.А., Чугреева Ю.В., Лукашина Т.П., Са-вельева В.В., Курбатова А.М., Прилуцкого В.Е и других ученых. Однако проблема измерения угловой скорости еще не достаточно исследована. По-прежнему актуальна задачи повышения точности измерений ВОГ. Это обусловлено тем, что от точности измерения угловой скорости зависит и точность определения местоположения объекта.

Объект исследований – процесс измерения угловой скорости на основе эффекта С. Саньяка.

Предмет исследований – процесс избыточных измерений угловой скорости.

Целью работы является ознакомление ученых и специалистов с одним из технических решений задачи измерения угловой скорости на основе эффекта С. Саньяка.

Результаты исследований

Основные виды гироскопов, разработанных на сегодняшний день, представлены на рис. 1.

По количеству степеней свободы различают: гироскопы с двумя степенями свободы (2-степенные) (интегрирующие, дважды интегрирующие, дифференцирующие) и гироскопы с тремя степенями свободы (3-степенные гироскопы). По режиму действия гироскопы делятся на: датчики угловой скорости и указатели направления. В настоящее время известно более ста различных явлений и физических принципов, которые позволяют решать гироскопические задачи. В настоящее время в открытой печати описаны следующие, различающиеся по используемым физическим эффектам, гироскопы: механические,

вибрационные, кольцевые лазерные, волоконно– оптические, волновые твердотельные, магнитодинамические, гидродинамические, электростатические, квантовые, камертонного типа и гироскопы со сферическим электромагнитным подвесом ротора и другие (рис. 1) [1-13].

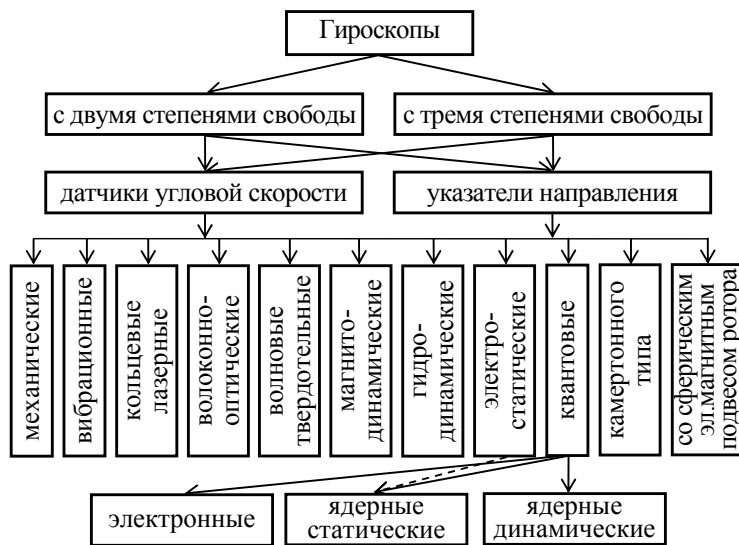


Рис. 1. Классификация гироскопов

В основу квантового гироскопа, например, положены гироскопические свойства электронов, атомных ядер или фотонов. В результате квантовые гироскопы подразделяют на электронные, ядерные статические и ядерные динамические [10]. В ядерных квантовых гироскопах используются вещества с ядерным парамагнетизмом (вода, органические жидкости, газообразный гелий, пары ртути). Атомы или молекулы таких веществ в основном (невозбужденном) состоянии обладают моментами количества движения, обусловленными только спинами ядер (электронные же спиновые моменты у них скомпенсированы, т. е. все электроны спарены). Со спинами ядер связаны их магнитные моменты. Если ориентировать магнитные моменты ядер, например при помощи внешнего магнитного поля, а затем ориентирующее поле выключить, то в отсутствие других магнитных полей (например, земного) возникший суммарный магнитный момент будет некоторое время сохранять своё направление в пространстве, независимо от изменения ориентации датчика. Такой статический квантовый гироскоп позволяет определить изменение положения тела, связанного с датчиком гироскопа.

Из всех разновидностей гироскопов наибольший интерес для нас представляют ВОГ, основанные на эффекте Саньяка. Сущность данного эффекта состоит в том, что фазовые набег двух электромагнитных волн, которые распространяются по замкнутому контуру неизменной конфигурации во встречных направлениях, зависят от значения и направления угловой скорости вращения этого контура [1]. Измеряя разность фаз, можно получить информацию об угловой скорости вращения объекта, на котором закреплен этот контур. Интегрирование угловой скорости вращающегося объекта по времени позволяет определить угол поворота, как функцию времени. Эта информация затем используется для управления движением и стабилизации положения объекта.

Рассмотрим классификацию методов измерения угловой скорости на основе эффекта Саньяка. В основу классификации положим следующие существенные признаки: вид измерений, используемый эффект прохождения встречно направленных потоков оптического излучения (ПОИ), наличие поляризации, способ фазовой модуляции ПОИ, способ получения эффекта интерференции и способ повышения чувствительности.

По виду измерений выделяют оптико-электронные методы прямых измерений угловой скорости и методы избыточных измерений (рис. 2). Методы прямых измерений угловой скорости являются более простыми и привычными, но точность этих методов не достаточно высокая. Методы избыточных измерений обеспечивают исключение аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности и исключение дополнительных погрешностей, обусловленных действием внешних дестабилизирующих факторов. В этом их преимущество.

Известны методы измерения угловой скорости, основанные на физических эффектах, возникающих при использовании контура с газовой средой, волоконно-оптического контура или при использовании прохождения встречно направленных ПОИ через резонатор. Представителем первой группы методов является кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ). Путь прохождения ПОИ в таком гироскопе образован тремя или четырьмя зеркалами, которые создают замкнутый путь в контуре резонатора. Особенностью этого метода является то, что пространство между зеркалами заполнено активной газовой средой (смесью гелия и неона). При вращении резонатора лазерного гироскопа оптический путь, который проходят встречные ПОИ по контуру, становится разным и возникает разность частоты встречных волн, по которой и судят об угловой скорости.

Волновые фронты ПОИ интерферируют один с другим, образуя интерференционные полосы.

Вращение резонатора лазерного гироскопа приводит к тому, что интерференционные полосы начинают перемещаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения гироскопа. Интегрирование во времени выходного сигнала лазерного гироскопа, пропорционального угловой скорости, позволяет определить угол поворота объекта, на котором установлен гироскоп [4].

Кольцевому лазерному гироскопу присущи нелинейность выходного сигнала при малой угловой скорости (влияние синхронизма), дрейф выходного сигнала, измерение длины оптического пути под влиянием теплового расширения, давления и механических деформаций.

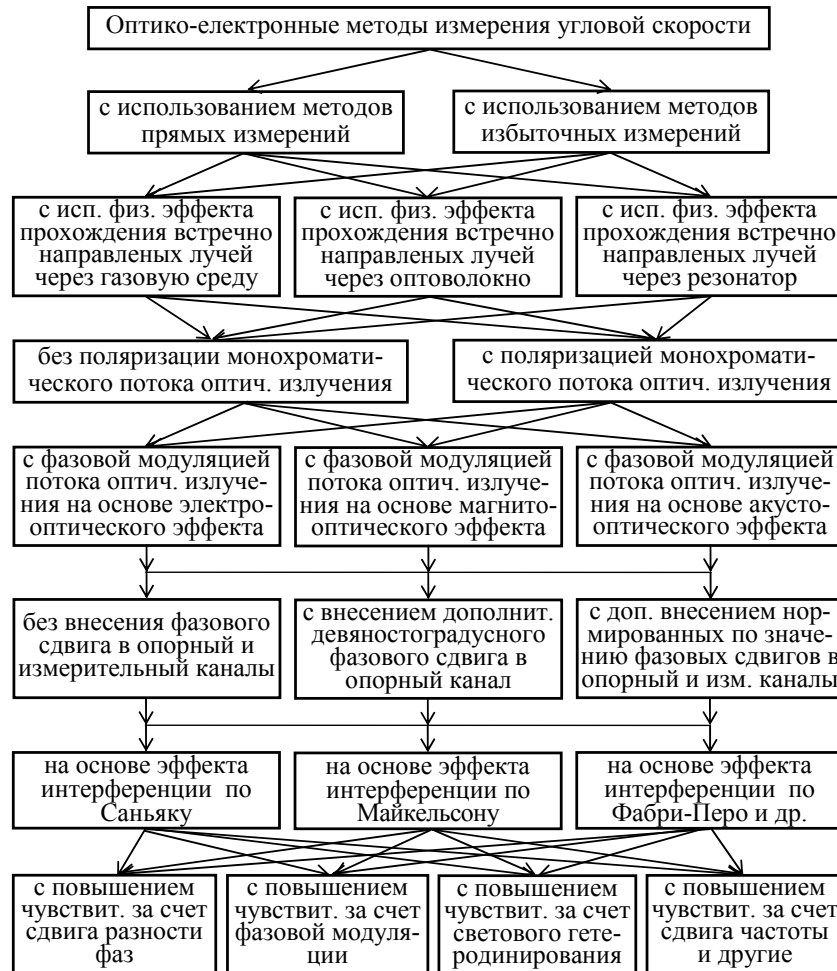


Рис. 2. Методы измерения угловой скорости

Другая группа методов измерения угловой скорости предполагает использование замкнутого контура, выполненного в виде многвитковой катушки из волоконного световода. Они реализуются в ВОГ.

По сравнению с первой группой методов (реализованных в кольцевых лазерных гироскопах) ВОГ имеют множество достоинств. Во-первых, эффект Саньяка, на котором основан принцип работы прибора, проявляется на несколько порядков сильнее из-за малых потерь в оптическом волокне и большой длины волокна. Во-вторых, нет необходимости в синхронизации противоположно направленных типов колебаний вблизи нулевого значения угловой скорости вращения. Это позволяет измерять очень малые угловые скорости. В-третьих, нет необходимости конструирования устройств смещения нулевого уровня. В-четвертых, в целом ВОГ могут изготавливаться в виде твердого тела. Это облегчает эксплуатацию и повышает их надежность по сравнению с КЛГ. В-пятых, ВОГ измеряет скорость вращения, а КЛГ только фиксирует увеличение скорости. В-шестых, благодаря поляризации монохроматического ПОИ обеспечивается более эффективная оптическая фильтрация сигнала. В-седьмых, конфигурация ВОГ позволяет "чувствовать" реверс направления вращения.

Третья группа методов связана с использованием в структуре гироскопа кольцевого резонатора пассивного типа. При одноразовом прохождении пучком света кольцевого оптического пути выходной сигнал светоприемника резко реагирует на изменение фазы. Это позволяет уменьшить длину волокна чувствительного контура. Методы данной группы обеспечивают повышение чувствительности гироскопов на основе эффекте Саньяка. Недостатком является необходимость источника света с высокой когерентностью излучения и использования полупрозрачного зеркала с высоким коэффициентом отражения.

По наличию поляризации все методы можно разделить на методы без поляризации монохроматического ПОИ и с поляризацией монохроматического ПОИ. Использование лазерных

источников оптического излучения обусловили необходимость использования в ВОГ повышенной точности специальных «поляризационных» оптических волокон, обеспечивающих линейное состояние поляризации на выходе. Наиболее распространенным типом таких волокон являются так называемые HiBi (high birefringence) волокна, т.е. оптические волокна с высоким линейным внутренним двулучепреломлением на уровне 10^{-4} или больше [12].

По способу осуществления фазовой модуляции ПОИ различают методы измерений угловой скорости с фазовой модуляцией ПОИ на основе электрооптического, магнитооптического и акустооптического эффектов.

По признаку «наличие дополнительного фазового сдвига» известны методы, в которых внесение фазового сдвига отсутствует вообще; методы, в которых используется внесение дополнительного девяностоградусного фазового сдвига в опорный ПОИ и методы с использованием внесения фазовых сдвигов в опорный и измерительный ПОИ. Внесение девяностоградусного фазового сдвига обеспечивает повышение чувствительности к малым изменениям фазы Саньяка в волоконном контуре и при малых значениях фазового сдвига, то есть когда угловая скорость гироскопа незначительная, за счет изменения косинусоидальной зависимости на синусоидальную. Внесение дополнительных фазовых сдвигов используется для создания информативной избыточности при реализации методов избыточных измерений. Дополнительные фазовые сдвиги вносятся в ПОВ разными способами: с использованием оптических фазовых модуляторов, фазосдвигающих устройств, оптических элементов и т.д.

По способу воспроизведения интерференционной картины, обеспечивающему повышения точности ВОГ и улучшение его метрологических характеристик, известны методы измерения угловой скорости на основе интерференции по Саньяку, по Фабри-Перо, по Майкельсону и другие.

По способу повышения чувствительности методы измерения угловой скорости делятся на методы с использованием сдвига разности фаз, фазовой модуляции, изменения частоты и светового гетеродинамирования.

Методы сдвига разности фаз. Если между двумя световыми волнами, идущими по кольцу навстречу друг другу, установить смещение разности фаз равное $\pi/2$ рад, то измерение выходного интерференционного сигнала будет пропорционально $\sin \Delta\varphi$. Это обеспечивает повышение чувствительности при измерении малых угловых скоростей. В то же время для высокоточных гироскопов инерциальной навигации необходимо определение очень малых изменений фазы и, поскольку, сдвиг в $\pi/2$ рад является достаточно большим, то возникает проблема высокоточной стабилизации этого смещения [2].

Методы фазовой модуляции. Модуляция световых волн, распространяющихся по часовой стрелке и против неё, зависит от их взаимной синхронизации [2]. Составляющая U_0 основной гармоники в выходном сигнале, полученном в результате интерференции двух световых волн, выражается следующим уравнением величин:

$$U_0 = K \cdot J_1(\eta) \cdot \sin \Delta\varphi$$

где K – постоянная; J_1 – функция Бесселя; $\eta = 2\varphi \cdot \sin \pi f_0 T$, f_0 ($f_0 = c/2nL$) та φ , соответственно, модулирующая частота и глубина модуляции, n – эквивалентный коэффициент преломления; L – длина волокна, T – время распространения световой волны в оптическом волокне.

Благодаря методу фазовой модуляции достигается разрешающая способность и стабильность нулевой точки в соответствии с требованиями инерциальной навигации.

Методы изменения частоты. При использовании фазовой модуляции трудно обеспечить широкий диапазон измерений и стабильное значение масштабного коэффициента. Одним из технических решений этой проблемы является включение в оптическую систему фазовых сдвигателей с большим динамическим диапазоном и хорошими линейными характеристиками, а также использование нулевого метода (гомодинамирования) [2]. Все это сводится к получению изменения частоты, пропорциональное угловой скорости, т.е. $\Delta f = \Omega \cdot 2a/n\lambda$, где a – радиус катушки. Методы изменения частоты базируются на методах фазовой модуляции и позволяют повысить разрешающую способность и стабильность нулевой точки. При этом основные сложности связаны с частотным сдвигателем. Наряду с акустооптическими модуляторами используются частотные сдвигатели в виде волоконно-оптических функциональных элементов и световых волноводов, а также системы с частотным сдвигом, полученным на основе фазового метода [13].

Методы светового гетеродинамирования. Данный метод основан на разделении световых лучей, двигающихся в противоположных направлениях, на два луча с чрезвычайно малым углом расхождения (миллирадианы). Эти лучи модулируются, сдвигаются по частоте и взаимодействуют на входе светоприемного устройства. На выходе последнего появляется сигнал разностной частоты, пропорциональный угловой скорости.

С помощью метода светового гетеродинамирования также достигается широкий динамический диапазон измерений (от пяти до девяти порядков) угловой скорости и стабильный масштабный коэффициент.

Избыточные измерения угловой скорости на основе эффекта Саньяка

Известный метод измерения угловой скорости основан на формировании линейно поляризованного ПОИ (ИК-излучения) заданой длинны волны λ_0 и мощности Φ_0 . ПОИ расщепляют на два равных по

мощности ПОИ ($\{\Phi'_0\} = \{\Phi''_0\}$), которые поступают в волоконный контур Саньяка во встречных направлениях. Причем, в один из потоков вносится дополнительный 90° фазовый сдвиг с целью повышения точности измерений малых угловых скоростей. ПОИ, прошедшие контур Саньяка во встречных направлениях, объединяются, а их интерференционная картина преобразуется в соответствующее напряжение [1, с. 29-35].

$$U_x = S_{л}\Phi_0 [1 - \sin \Delta\varphi_{cx}], \quad (1)$$

де $S_{л}$ – крутизна преобразования мощности сведенных ПОИ (ИК-излучения) в напряжение, $\Delta\varphi_{cx}$ – фазовый сдвиг между ПОИ.

При вращении контура Саньяка между ПОИ возникает фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{cx}$. Последний измеряется, а о значении угловой скорости судят по уравнению измерений

$$\Omega_x = \Delta\varphi_{cx} \frac{c\lambda_0}{k_0 S_0}, \quad (2)$$

где S_0 – площадь волоконного контура; c – скорость света, λ_0 – длина волны ИК-излучения, $k_0 = 8\pi$.

Известный метод не обеспечивает исключение систематических погрешностей измерений, обусловленных действием дестабилизирующих факторов на стабильность параметров функции преобразования оптико-электронного канала ВОГ и его дрейф нуля.

Нами решена задача повышения точности измерения угловой скорости за счет исключения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности результата измерений и дополнительных погрешностей, обусловленных действием внешних дестабилизирующих факторов. В основу решения положен метод избыточных измерений угловой скорости. Была создана математическая модель процесса измерений, описываемая системой уравнений величин

$$\left. \begin{aligned} U_{x1}|_{t_1} &= S_{л}\Phi_0 - S_{л}\Phi_0 \sin \Delta\varphi_{c0}, \\ U_{x2}|_{t_2} &= S_{л}\Phi_0 - S_{л}\Phi_0 \sin(\Delta\varphi_{cx} + \Delta\varphi_{c0}), \\ U_{x3}|_{t_3} &= S_{л}\Phi_0 - S_{л}\Phi_0 \sin \Delta\varphi_{cx}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

описывающая процесс избыточных измерений в каждом из трех тактов, а точнее – описывающая состояния измерительной системы в дискретные моменты времени.

В момент времени t_1 измеряется выходной сигнал фотоприемника при нулевом значении угловой скорости, т.е. при $\{\Omega_x\} = 0$, когда $\{\Delta\varphi_{cx}\} = 0$. В момент времени t_2 измеряется выходной сигнал фотоприемника при неизвестном (рабочем) значении угловой скорости ($\{\Omega_x\} \neq 0$) и дополнительно внесенном и нормированном по значению фазовом сдвиге $\Delta\varphi_{cx1}$ ($\{\Delta\varphi_{cx1}\} = \{\Delta\varphi_{cx}\} + \{\Delta\varphi_{c0}\}$). В третий момент времени t_3 измеряется выходной сигнал фотоприемника при неизвестном значении угловой скорости, т.е. при $\{\Omega_x\} \neq 0$ и соответствующем ему фазовом сдвиге $\Delta\varphi_{cx2}$ ($\{\Delta\varphi_{cx2}\} = \{\Delta\varphi_{cx}\}$).

В результате решения системы уравнение величин (3) получено уравнение избыточных измерений в неявном виде

$$\frac{U_{x2} - U_{x3}}{U_{x1} - U_{x3}} = \frac{\sin(\Delta\varphi_{cx} + \Delta\varphi_{c0}) - \sin \Delta\varphi_{cx}}{\sin(\Delta\varphi_{cx} + \Delta\varphi_{c0}) - \sin \Delta\varphi_{c0}}. \quad (5)$$

Полученное по (5) действительное значение фазового сдвига подставляется в (2) и определяется действительное значение угловой скорости. Как видно из уравнения избыточных измерений (5), результат измерений не зависит от параметров функции преобразования оптико-электронного канала и их долговременных изменений в результате действия внешних дестабилизирующих факторов.

Автоматическое исключение аддитивной составляющей погрешности результата измерения осуществляется за счет выполнения операции вычитания, а мультипликативной – операции деления.

Уменьшение более, чем в \sqrt{n} раз случайной составляющей погрешности измерения осуществляется классическим методом: 1) за счет многократных измерений в каждом такте полученных напряжений с последующим вычислением среднего значения фазового сдвига $\overline{\Delta\varphi_{cx}}$ по усредненным значениям полученных напряжений ($\overline{U_{x1}}$, $\overline{U_{x2}}$ и $\overline{U_{x3}}$) или 2) за счет многократного измерения фазового сдвига $\Delta\varphi_{cxi}$

с последующей статистической обработкой полученных результатов ($\overline{\Delta\varphi_{cx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_{cxi}$, где n – число измерений).

На рис. 3 приведена функциональная схема ВОГ, реализующего метод избыточных измерений.

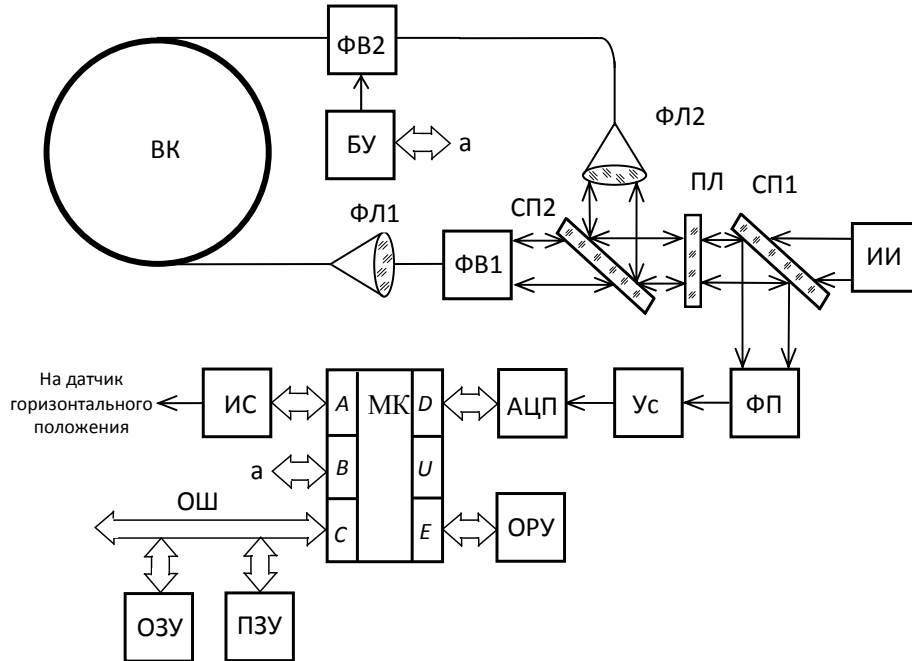


Рис. 3. Функциональная схема цифрового измерителя угловой скорости на основе эффекта Саньяка

На рис. 3 используются следующие обозначения: ИИ – источник линейно поляризованного потока ИК-излучения; СП1, СП2 – светоделительные пластинки; ПЛ – поляризатор; ФЛ1, ФЛ2 – фокусирующие линзы; ФВ1, ФВ2 – фазовращатели; ВК – волоконный контур; ФП – фотоприемник; Ус – усилитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; БУ – блок управления; ОРУ – отсчетно-регистрающее устройство; ИС – интерфейс связи с датчиком горизонтального положения; ОШ – общая шина; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство.

Работа цифрового измерителя угловой скорости (ЦИУС) состоит из трех тактов измерений и одного такта вычисления. После включения ЦИУС все блоки устанавливаются в начальное положение. ОРУ показывает нуль. По команде, поступившей на БУ с МК в цепь оптического сигнала включается ФВ2. На последовательный порт А МК через ИС подается сигнал с датчика горизонтального положения (на рис. 3 не показан) в момент времени, когда подвижный объект находится в горизонтальном положении. В ПОИ первого оптического канала с помощью ФВ1 вносится 90° фазовый сдвиг, а в ПОИ второго оптического канала с помощью ФВ2 вносится нормированный по значению фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{c0}$.

В первом такте в напряжение U_{x1} преобразуется мощность сведенного ПОИ при условии отсутствия вращения. Полученное напряжение преобразуется в код числа N_1 ($N_1 = S_0 U_{x1} = S_0 S_L \Phi_0 (1 - \sin \Delta\varphi_{c0})$, где S_0 – крутизна аналого-цифрового преобразователя) и запоминается в ОЗУ.

Во втором такте в первом потоке оптического ИК-излучения сохраняется 90° фазовый сдвиг, а во второй поток ИК-излучения вносят нормированный по значению фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{c0}$. Измерение осуществляется при вращении объекта. В результате на фотоприемник ФП поступают оба сведенные потоки. После усиления и аналого-цифрового преобразования выходного сигнала ФП получают код числа N_2 ($N_2 = S_0 U_{x2} = S_0 S_L \Phi_0 [1 - \sin(\Delta\varphi_{cx} + \Delta\varphi_{c0})]$), который также запоминается в ОЗУ.

В третьем такте, по команде с МК, второй фазовращатель исключается из оптического канала. В первом потоке ИК-излучения сохраняется только внесенный 90° фазовый сдвиг. На вход ФП поступают сведенные потоки ИК-излучения. После усиления и аналого-цифрового преобразования выходного сигнала ФП получают код числа N_3 ($N_3 = S_0 U_{x3} = S_0 S_L \Phi_0 (1 - \sin \Delta\varphi_{cx})$), содержащий информацию о фазовом сдвиге между монохроматическими потоками ИК-излучения, который также запоминается в ОЗУ.

В четвертом такте осуществляется обработка результатов промежуточных измерений согласно уравнения числовых значений

$$\frac{N_2 - N_3}{N_1 - N_3} = \frac{\sin(\{\Delta\varphi_{cx}\} + \{\Delta\varphi_{c0}\}) - \sin\{\Delta\varphi_{cx}\}}{\sin(\{\Delta\varphi_{cx}\} + \{\Delta\varphi_{c0}\}) - \sin\{\Delta\varphi_{c0}\}}, \quad (6)$$

где фигурные скобки означают числовые значения фазовых сдвигов. Искомое значение фазового сдвига $\Delta\varphi_{cx}$ определяется методом перебора числовых значений.

Выводы

Установлено большое многообразие средств измерения угловой скорости – гироскопов. Приведена

их классификация, отмечены особенности некоторых из них. Констатируется, что основное внимание ученых уделяется исследованиям и совершенствованиям ВОГ на основе эффекта С.Саньяка.

Разработана классификация методов измерения угловой скорости на основе эффекта С. Саньяка. Приведены особенности некоторых методов измерений. Отмечается перспективность использования методов избыточных измерений для высокоточного измерения угловой скорости на основе эффекта С. Саньяка.

Разработан и описан метод избыточных измерений угловой скорости и соответствующее техническое решение ЦИУС. Показано, что метод избыточных измерений обеспечивает автоматическое исключение систематических погрешностей результата измерений и, при использовании статистической обработки, уменьшение в \sqrt{n} раз случайной составляющей погрешности результата измерений.

Литература

1. Шереметьев А.Г. Волоконно-оптический гироскоп / А.Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
3. [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Гироскоп.](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гироскоп)
4. Бороздин В. Н. Гироскопические приборы и устройства систем управления: Учеб. пособие для ВТУЗов / В. Н. Бороздин. – М.: Машиностроение, 1990.
5. Павловский М. А. Теория гироскопов: Учебник для ВУЗов / М. А., Павловский. – Киев, Вища Школа, 1986.
6. Сафронов А. Малогабаритные пьезоэлектрические вибрационные гироскопы: особенности и области применения / А. Сафронов, В. Никифоров, Д. Шахворостов, А. Калифатиди, В. Барыкин.. // www.elpiezo.ru/gyroscopes.pdf
7. <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/443.html/> Тенденции развития современной гироскопии (Мартыненко Ю.Г., 1997).
8. <http://www.bestreferat.ru/referat-95099.html>. Реферат: Волоконный оптический гироскоп.
9. <http://www.bestreferat.ru/referat-85027.html>. Реферат: Анализ погрешностей волоконно-оптического гироскопа.
10. [http://slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Квантовый %20гироскоп/.](http://slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Квантовый_%20гироскоп/)
11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Гироскоп.](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гироскоп)
12. <http://www.compeljournal.ru/enews/2009/14/5>. Новое семейство одно- и двухосевых гироскопов.
13. <http://www.textreferat.com/referat-2525-3.html>. Волоконно-оптические гироскопы.

Надійшла до редакції
21.10.2010 р.

УДК 681.7.068.4

О.М. ВЛАСОВ, О.В. БОНДАРЕНКО, Н.В. ОМЕЦИНСЬКА, І.О. СЕРГІЄНКО

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ПОЛЯРИЗОВАНА МОДОВА ДИСПЕРСІЯ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

Надано структуровану інформацію щодо основних понять і термінів для опису явища поляризованої модової дисперсії (ПМД) у швидкісних волоконно-оптичних лініях зв'язку, проаналізовано методи вимірювання величини ПМД і тестування ліній на ПМД та систематизовано норми на величину ПМД, у відповідності до базових стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) і до останніх Рекомендацій Міжнародного союзу електров'язку (МСЕ).

The structured information concerning the basic concepts and terms for the description of the phenomenon polarization modal dispersion (PMD) in high-speed fiber-optical communication lines, methods of measurement of size PMD and testing of lines on PMD are analysed and is systematized norms on size PMD, according to base standards of the International Electrotechnical Commission (IEC) and to last Recommendations of the International Telecommunication Union (ITU).

Ключові слова: поляризованої модової дисперсії, волоконно-оптичних лініях зв'язку, вимірювання, тестування, рекомендації МЕК

1. Вступ

Одномодові волоконні світловоди (ООВ) завдяки низьким втратам оптичної потужності і малій дисперсії світлового імпульсу є найкращим напрямлювальним середовищем у сучасних мережах зв'язку для передачі високошвидкісних ширококутових сигналів на великі відстані. За передавання по ООВ цифрового сигналу у вигляді послідовності оптичних імпульсів останні зазнають спотворення – змінюється їхня ширина в часі, спотворюється їхня форма тощо. Основними причинами спотворення імпульсу є погонне загасання оптичної потужності, хроматична дисперсія, дисперсія поляризованої моди та нелінійні ефекти,