

Дополнение Б

Волоконно-оптические гироскопы с замкнутым контуром обратной связи

Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев,
И. В. Морев, С. М. Кострицкий, Е. М. Падерин, А. И. Зуев,
В. К. Варнаков

Научно-производственная компания «Оптолинк»

ООО НПК «ОПТОЛИНК»,
124498, Москва, Зеленоград,
проезд 4806, дом. 5
Тел. (495) 651-0960,
Факс (495) 651-0961,
E-mail: opto@optolink.ru,
www.optolink.ru

Введение

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) используются для измерения угловой скорости вращения и угла поворота и имеют широкую область практического применения для целей ориентации и навигации различных подвижных объектов. ВОГи используются в навигационных системах для авиации, судоходства, ракет и космических аппаратов, а также для наземных средств передвижения, к которым относятся автомобили, роботы, сельскохозяйственные машины, железнодорожный транспорт и др. Кроме того, ВОГи используются при бурении скважин, прокладке и контроле автомобильных и железных дорог, газа и нефтепроводов, и т. п.

В настоящее время наиболее актуальными направлениями развития волоконно-оптических гироскопов являются:

- а) повышение стабильности ВОГов за счет повышения качества элементов (модуляторов, светоделителей, поляризаторов и волоконного контура), их температурной стабильности и нечувствительности к механическим и акустическим вибрациям, а также к температурным градиентам;

- б) повышение предельной чувствительности за счет повышения интенсивности и ширины полосы источников излучения;
- в) удешевление и миниатюризация ВОГов за счет серийного производства интегрально-оптических и электронных модулей.

ВОГ является логическим продолжением кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ), выпускаемого в настоящее время в том числе и в России. В КЛГ чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, в то время как в ВОГ пассивный многоритмовый диэлектрический световодный контур возбуждается внешним источником света. Среди преимуществ ВОГ над КЛГ следует отметить отсутствие необходимости высоковольтного питания и принятия мер по устранению так называемого захвата лучей, возможность более легкого достижения малых уровней квантования по углу и др.

Согласно прогнозам зарубежных экспертов, в ближайшее время именно волоконно-оптические измерители угловой скорости с замкнутым контуром обратной связи займут практически весь рынок высокоточных гироскопов. Возможность промышленного выпуска прецизионных ВОГов в значительной степени определяется уровнем технологической базы производства его основных компонентов и в первую очередь специальных волоконных световодов и элементов интегральной оптики.

В ВОГ с замкнутым контуром обратной связи компенсация фазового сдвига Саньяка и динамическое смещение разности фаз встречных световых волн на $\pi/2$ радиан осуществляется с помощью интегрально-оптических фазовых модуляторов (ФМ), установленных на концах волоконного контура (ВК). В этом случае мерой угловой скорости является один из параметров сигнала управления ФМ. Известно, что при таком подходе выходная характеристика ВОГ линеаризуется, а масштабный коэффициент (МК) становится независимым от параметров большинства структурных составляющих прибора [1].

Остаточные погрешности измерения угловой скорости могут быть уменьшены с помощью алгоритмической компенсации уходов нулевого сигнала или изменений МК (это возможно даже для ВОГ прямого измерения («открытого типа») [2]). Однако ясно, что в этом случае следует говорить о компенсации только таких составляющих погрешности, для которых известна их зависимость от заданных параметров (температуры, времени и т. п.), т. е. детерминированных.

В данной работе представлены результаты разработок НПК «Оптолинк» одноосных и трехосных волоконно-оптических гироскопов с замкнутым контуром обратной связи.

Б.1. Конфигурация

Структурные схемы одноосных и трехосных ВОГов представлены на рис. Б.1 и Б.2 соответственно. Реализована так называемая минимальная конфигурации с одинаковыми оптическими путями для двух лучей, распространяющихся в волоконном контуре в противоположных направлениях.

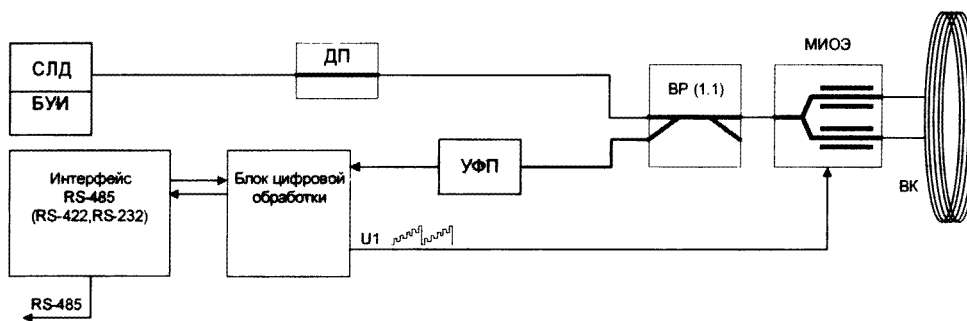


Рис. Б.1. Структурная схема одноосных ВОГ. СЛД — суперлюминесцентный диод, БУИ — блок управления излучателем, ВР — волоконный разветвитель, ВК — волоконный контур, МИОЭ — многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП — устройство фотоприемное, ДП — деполаризатор, RS-485 — последовательный интерфейс

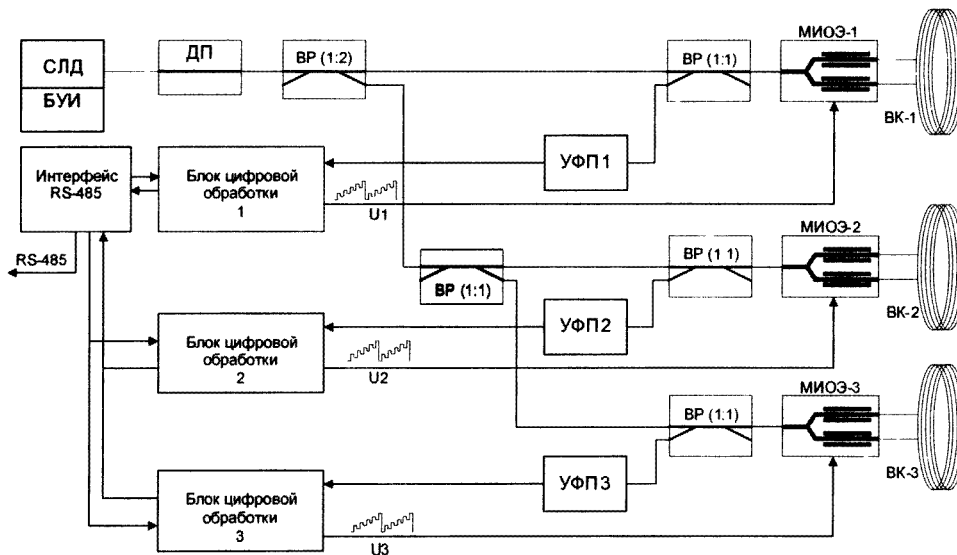


Рис. Б.2. Структурная схема трехосных ВОГ

Приборы состоят из одного (как для одноосных, так и для трехосных ВОГов) источника света — суперлюминесцентного диода с центральной

длиной волны 1550 нм, одного (для одноосных ВОГов) или нескольких (для трехосных ВОГов) волоконных разветвителей, одного или трех кольцевых интерферометров Саньяка для измерения угловой скорости и электронных схем обработки сигналов [3–5]. Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК). МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему на кристалле ниобата лития, изготовленную с помощью технологии высокотемпературного протонного обмена [6–9] и выполняющую три функции: 1) поляризации проходящего света с целью уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невязимости; 2) расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе; 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора. Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено необходимостью уменьшения как дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, так и дрейфа, вызываемого внешними магнитными полями вследствие эффекта Фарадея.

Точность ВОГ сильно зависит от параметров оптического блока. Шум прибора тем меньше, чем больше выходная мощность СЛД и чем меньше потери оптических элементов, включая волокно, сохраняющее состояние поляризации, типа PANDA. Минимальная измеряемая скорость вращения зависит от коэффициента перекрестной поляризационной связи (h -параметра) и длины поляризационных биений L_p волокна следующим образом [10]:

$$\Omega_{\min} \sim \frac{\sqrt{hL_p}}{DL}. \quad (\text{Б.1})$$

Поэтому при разработке ВОГ основные усилия были направлены на уменьшение оптических потерь в каждом из элементов и на уменьшение величин h и L_p в волокне типа PANDA. В НПК «Оптолинк» была разработана технология и налажено серийное производство оптического волокна, поддерживающего состояние поляризации излучения (PM волокно) [11]. В табл. Б.1 представлены параметры таких волоконных световодов.

Наряду с «коммерческим» оптоволоконном, световодная жила которого содержит оксид германия, разработана технология изготовления радиационно-стойкого (до доз облучения 1 Мрад) оптоволоконна $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-F}$ с тонкой отражающей оболочкой.

В научно-производственной компании «Оптолинк» разработаны три базовые модели одноосных ВОГ, имеющие ВК с длинами 500 м (ОИУС-501), 1000 м (ОИУС-1000), 2000 м (ОИУС-2000) и две модели трехосных ВОГ

с длинами волоконного контура 200 м (ТИУС-200) и 500 м (ТИУС-500) [12–16]. В трехосных ВОГ используется один излучатель на три канала. Использование трех фотоприемников позволяет вести обработку сигналов одновременно с трех каналов независимыми блоками цифровой обработки.

Таблица Б.1. Параметры РМ волокна, изготавливаемого на предприятии НПК «Оптолинк»

Рабочая длина волны	1,55 мкм
Диаметр поля моды	6,5 мкм
Диаметр волокна	80 мкм
Диаметр покрытия	120÷160 мкм
Числовая апертура	0,13
h -параметр	$< 10^{-5}$ м
Потери	$< 1,5$ дБ/км
Длина волны отсечки	1250÷1450 нм
Длина биений	< 3 мм
Тип	PANDA

Намотка катушек ведется по квадрупольной технологии, начиная от середины длины отрезка волокна в направлении наружу к его концам путем поочередного сматывания с двух вспомогательных шпулек и формированием геометрически симметричной структуры. Натяжение волокна поддерживается постоянным в течение всего процесса намотки. При этом контролируется не только натяжение волокна, но и его изгибы или искривления, а также поверхностные контакты. Катушка с волокном располагается на теплоизолированной плате с диаметром от 80 до 230 мм в зависимости от типа ВОГ. Станки для намотки волоконных контуров были специально разработаны на базе стандартных проволочных намоточных станков.

Изотропные волоконные разветвители изготавливаются методом сплавления – вытяжки и имеют следующие типовые значения параметров:

- коэффициент деления, % 50 ± 1 ,
- избыточные потери, дБ 0,1.

За основу конструкторского решения при разработке деполаризатора взята конструкция, известная как волоконный деполаризатор Лайота. Технология изготовления этого элемента обеспечивает достижение следующих параметров:

- потери оптической мощности, дБ: $< 0,5$;
- степень остаточной поляризации излучения при ширине спектральной линии 40 нм, %: $< 0,05$.

МИОЭ изготавливаются на кристаллах LiNbO_3 методом высокотемпературного протонного обмена [3]. Этот метод дает возможность достижения следующих значений основных параметров МИОЭ:

- вносимые избыточные потери: < 4 дБ;
- коэффициент поляризационной экстинкции < -30 дБ;
- полуволновое напряжение: < 3 В ;
- амплитудная модуляция: $< 0,1\%$.

Интегрирование МИОЭ в оптический блок (ОБ) производится путем непосредственных стыковок его волноводов с концами ВК и с одним из концов входного изотропного разветвителя, имеющего длину, достаточную для пространственной фильтрации излучения.

Отметим, что в НПК «Оптолинк» налажено собственное производство всех как интегрально-оптических, так и волоконно-оптических компонент ВОГ, что делает компанию независимой от поставщиков таких компонент.

ВОГ выше описанной конфигурации обладают известной геометрической гибкостью: изменением только лишь параметров волоконного контура можно получать приборы различного класса точности и габаритных размеров. Например, если в распоряжении имеется маломощный СЛД или МИОЭ с большими потерями, или и то и другое вместе, то для компенсации недостатка мощности света на выходе оптического блока можно использовать катушку меньшей длины, уменьшая тем самым и габариты и чувствительность ВОГ — получаем малогабаритный грубый прибор с широким динамическим диапазоном и т. п. При наличии достаточно большой мощности света, доходящего до фотоприемника (СЛД большой мощности, низкие потери излучения в МИОЭ и волоконном контуре) возможна реализация прецизионных приборов. Важно, что при таких манипуляциях состав и параметры остальных оптических и электронных компонентов существенно не затрагиваются.

Базовая структура на рис. Б.1 и Б.2 еще не определяет алгоритм работы ВОГ, но предопределяет широкие возможности для его выбора ввиду практически безинерционной работы фазового модулятора (ФМ) в МИОЭ. В принципе могут быть реализованы следующие типы схем обработки информации:

1. Схема с незамкнутым контуром обратной связи и синусоидальной (или импульсной) модуляцией; выход — аналоговый, нелинейный.
2. Схема с замкнутым контуром обратной связи и синусоидальными вспомогательной и компенсирующей модуляциями; выход — аналоговый, линейный.

3. Схема с замкнутым контуром обратной связи и синусоидальной (или импульсной) вспомогательной и пилообразной аналоговой со стабильной фазовой амплитудой компенсирующей модуляциями; выход — дискретный, линейный.
4. Схема с замкнутым контуром обратной связи и синусоидальной (или импульсной) вспомогательной и пилообразной аналоговой со стабильной частотой компенсирующей модуляциями; выход — аналоговый, линейный.
5. Схема с замкнутым контуром обратной связи с импульсной вспомогательной и импульсной пилообразной со стабильной фазовой амплитудой компенсирующей модуляциями; выход — дискретный, линейный.

Варианты 3 и 4 представляются как наиболее отвечающие нынешнему уровню технологии оптических и электронных компонентов в России и наиболее пригодны к практической реализации: с их помощью реализуемы все классы ВОГ. Поскольку оба варианта удовлетворяют основному критерию, следует более детально рассмотреть, в чем состоит их отличие и выявить возможные преимущества друг перед другом.

В так называемых серродинных схемах компенсация разности фаз Саньяка $\Delta\varphi_S = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega$ осуществляется фазовым сдвигом, вносимым пилообразной (на линейном участке) фазовой модуляцией световой волны $\Delta\varphi_m = \varphi \Delta\tau_g = \frac{\varphi_{rs} f \Delta\tau_g}{1 - \Delta t f}$ (рис. Б.3).

Следящая система обеспечивает равенство этих величин с противоположными знаками. Т.о., с точностью до знака,

$$\Omega_{изм} = \frac{\lambda c \Delta\tau_g}{4\pi RL(1 - \Delta t f)} (\varphi_{rs} \times f), \quad (\text{Б.2})$$

здесь λ — длина волны света; c — скорость света в вакууме; $\Delta\tau_g$ — разность времен групповой задержки световых волн; R — радиус ВК; L — длина ВК; φ_{rs} — размах фазовой «пилы»; f — частота «пилы»; Δt — время спада «пилы»; $\Omega_{изм}$ — измеренная угловая скорость.

Если считать, что $\Delta t = 0$ (идеальная пила) и $\Delta\tau_g = \frac{Ln}{c}$, то (Б.1) записывается в виде

$$\Omega_{изм} = \frac{\lambda n}{2\pi D} (\varphi_{rs} \times f), \quad (\text{Б.3})$$

где D — диаметр ВК; n — показатель преломления сердцевины волокна.

Можно сказать, что при заданных λ , n и D произведение $\varphi_{rs} \times f$ является мерой угловой скорости. Задача состоит в измерении этой величины.

Вариант 3 предполагает наличие стабильного значения фазовой амплитуды. Это можно осуществить с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки, причем из соображений исключения воз-

действия спада «пилы» на стабильность работы прибора целесообразно выбирать ее равной 2π рад. Таким образом, полагая $\varphi_{rs} = 2\pi$, из (Б.2) получаем

$$f = \frac{D}{\lambda n} \Omega, \quad (\text{Б.4})$$

где Ω — входная угловая скорость.

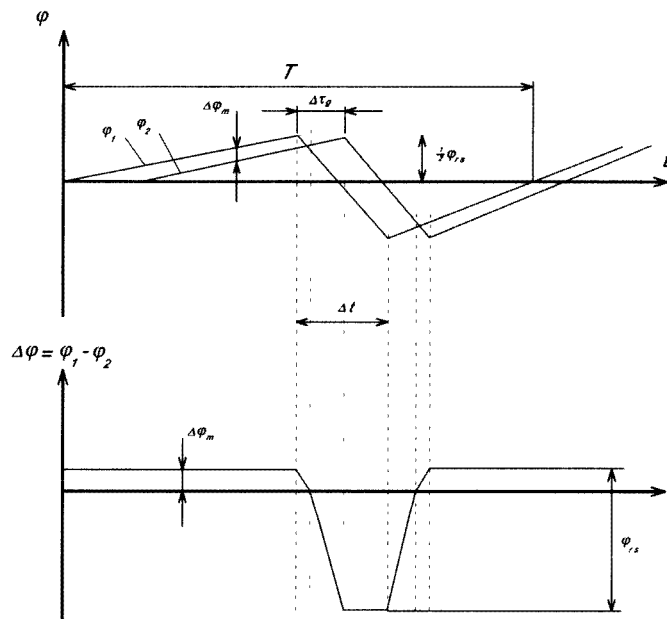


Рис. Б.3. Серродинная схема компенсации разности фаз Саньяка. φ_1, φ_2 — пилообразные изменения фаз первого и второго лучей

Частоту f легко измерить, поэтому она может служить очень удобной мерой угловой скорости. Более того, легко заметить, что каждый сброс «пилы» происходит после разворота прибора на угол $\lambda n/D$, что позволяет простым подсчетом импульсов, соответствующих сбросам «пилы», измерять угол разворота с дискретностью $\lambda n/D$.

Вариант 4, наоборот, предполагает наличие стабильного значения частоты f . Это очень легко осуществить с помощью кварцевой стабилизации. Пусть $f = \text{const}$, в этом случае согласно (Б.2) можно записать:

$$\varphi_{rs} = \frac{2\pi D}{\lambda n f} \Omega, \quad (\text{Б.5})$$

но измерить φ_{rs} непосредственно невозможно. Если в качестве меры угловой скорости выбрать напряжение U , из которого формируется амплитуда фазовой пилы, то $\varphi_{rs} = K_{\phi m} K_{yn} U$, при этом $K_{\phi m} = \pi/V_\pi$ — эффек-

тивность ФМ, V_π — полуволновое напряжение, а K_{yn} — коэффициент усилителя-преобразователя, формирующего пилообразное напряжение, прикладываемое к ФМ. Таким образом:

$$U = \frac{2V_\pi D}{\lambda n f K_{yn}} \Omega. \quad (\text{Б.6})$$

Напряжение также легко измерять и преобразовывать в другие формы. Оно само может служить мерой угловой скорости и подаваться на выход ВОГ. Но возможно также в составе прибора с помощью точного интегрирующего АЦП превратить его в последовательность импульсов в виде унитарного кода и получить полную аналогию варианта 3 без существенного ухудшения.

Самым главным отличием вариантов 3 и 4, таким образом, является различие выражений для МК:

$$MK_3 = \frac{D}{\lambda n}, \quad (\text{Б.7})$$

$$MK_4 = \frac{2V_\pi D}{\lambda n f K_{yn}}. \quad (\text{Б.8})$$

Погрешность МК в первом случае определяется, главным образом, стабильностью длины волны излучения λ , а во втором, в силу того, что $V_\pi \sim \lambda$, — стабильностью параметров МИОЭ и стабильностью передаточной характеристики усилителя-преобразователя K_{yn} .

В серийно выпускаемых волоконно-оптических гироскопах компании «Оптолинк» реализован вариант 3. В ВОГ применена схема с замкнутым контуром обратной связи с импульсной вспомогательной и ступенчато-пилообразной компенсирующей фазовыми модуляциями света. Схема предполагает наличие стабильного значения фазовой амплитуды компенсирующей модуляции. Это достигается с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки.

Блок цифровой обработки (БЦО) формирует напряжения, поступающие на МИОЭ для формирования постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами, равного $\pi/2$ рад, и компенсации разности фаз Саньяка. Тем самым обеспечивается работа прибора в режиме непрерывно замкнутого контура.

Структурная схема БЦО представлена на рис. Б.4.

Аналоговый сигнал о наличии угловой скорости (сигнал рассогласования) поступает на АЦП с УФП, где предварительно усиливается. Высокоскоростной АЦП под управлением цифрового автомата, реализованного на ПЛИС, преобразует аналоговый сигнал в цифровой и передает в ПЛИС. В ПЛИС цифровой сигнал с АЦП демодулируется и полученный

цифровой код со знаком, соответствующим знаку сигнала рассогласования, поступает на цифровой интегратор. Код с интегратора используется для получения наклона фазовой «пилы», соответствующего скорости вращения. Преобразованный в ЦАП сигнал поступает на МИОЭ. При амплитуде сброса фазовой «пилы», равной 2π рад, как известно, разность фаз Саньяка компенсируется сигналом с частотой f , определяемой соотношением (Б.4).

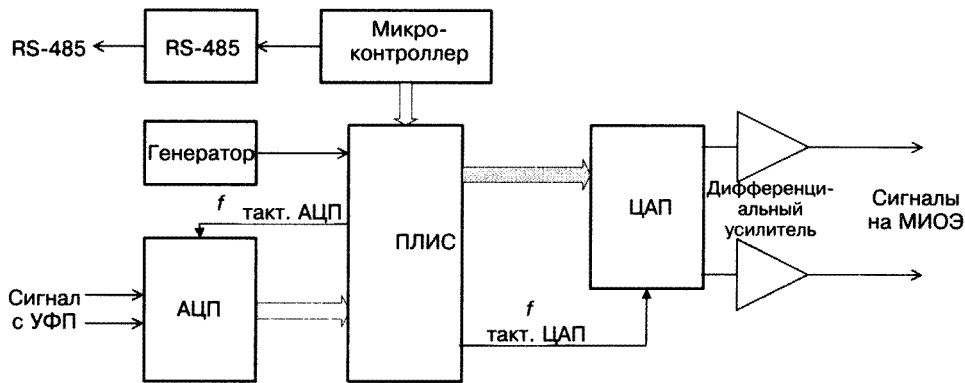


Рис. Б.4. Структурная схема БЗО: АЦП — аналогово-цифровой преобразователь, ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь, ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема

В приборе используются два способа определения скорости вращения. В первом способе происходит непосредственное измерение частоты следования спадов «пилы». При этом появление каждого спада соответствует приращению угла поворота канала ВОГ вокруг оси, перпендикулярной ВК, на $\lambda n/D$ рад.

Для увеличения разрешающей способности прибора применяется способ измерения скорости вращения по наклону фазовой «пилы».

БЗО представляет собой схему, построенную на ПЛИС фирмы ALTERA, к которой подключен высокоскоростной АЦП и два быстрых ЦАП фирмы Analog Devices. Тактовые синхроимпульсы для ЦАП и АЦП вырабатываются ПЛИС. Работа ПЛИС тактируется высокостабильным генератором.

Микроконтроллер фирмы Atmel является загрузчиком для ПЛИС, а также обеспечивает обмен по интерфейсу RS-485 с внешними устройствами. На нем реализован монитор для настройки прибора. Кроме загрузки ПЛИС, контроллер по последовательному каналу считывает с ПЛИС данные измерений.

Функциональная схема цифрового автомата, реализованного на ПЛИС, представлена на рис. Б.5.

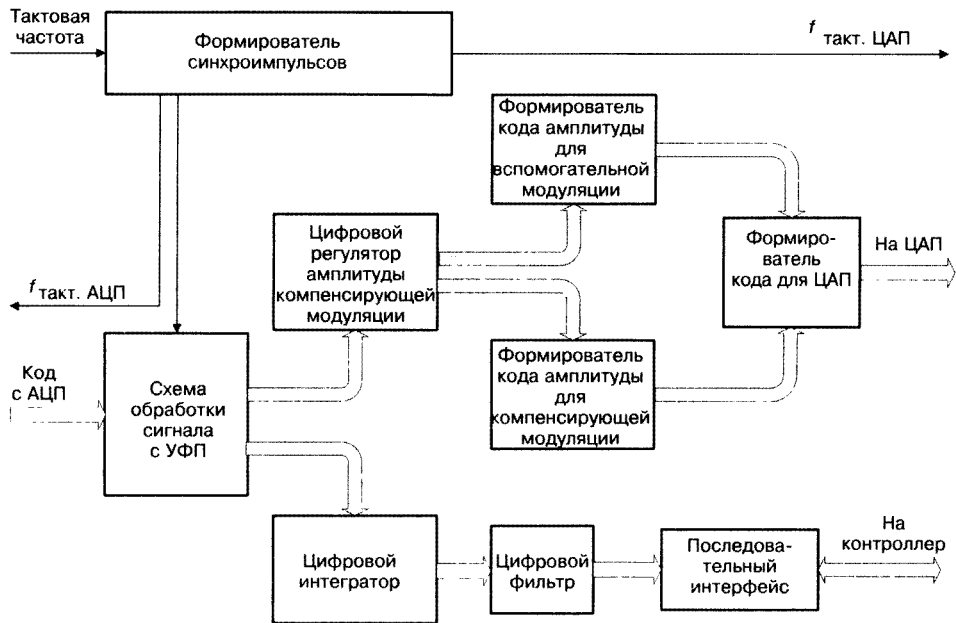


Рис. Б.5. Функциональная схема цифрового автомата, реализованного на ПЛИС

Формирователь синхроимпульсов преобразует тактовую частоту в набор импульсов для синхронного управления работой всех устройств и узлов. Тактовая частота $f_{такт}$ выбирается кратной частоте вспомогательной модуляции (ВМ) $f_{в.м.}$. Тактовые импульсы для ЦАП формируются по фронтам ВМ. Тактовые импульсы для АЦП формируются так, чтобы исключить измерения на фронтах сигнала с УФП.

Схема обработки сигнала с УФП состоит из сумматора, буфера для хранения измеренного значения, схемы вычитания. На сумматоре накапливается сумма значений сигнала рассогласования, измеренных на текущей фазе ВМ. На буфере хранится сумма значений, измеренных на предыдущей фазе ВМ. По окончании измерения числа с сумматора и с буфера поступают на схему вычитания. В зависимости от текущей фазы ВМ, одно число подается как вычитаемое, другое — как вычитатель. Таким образом выделяется амплитуда переменного сигнала с учетом знака.

Код со знаком, соответствующий знаку сигналу рассогласования, поступает на цифровой интегратор, который состоит из умножителя и сумматора со схемой ограничения. С помощью умножителя задается постоянная времени цифрового интегратора. Сумматор используется в качестве интегратора. Код с интегратора поступает на формирователь кода для компенсирующей модуляции и через цифровой фильтр на последовательный интерфейс связи с контроллером.

Формирователь кода для компенсирующей модуляции состоит из сумматора, с помощью которого формируется код «пилы» и второго сумматора, который используется в контуре цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции. Сигналом рассогласования для цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции служит сигнал со схемы обработки сигнала с УФП, снятый в моменты спадов «пилы». Этот же сигнал используется и для подстройки амплитуды вспомогательной модуляции.

Для достижения максимальной чувствительности необходимо устранить все источники невязности, кроме тех, которые возникают в результате эффекта Саньяка при распространении волн по часовой стрелке и против часовой стрелки. Возникновение дополнительных фазовых сдвигов из-за недостаточного качества оптических компонентов или внешних возмущений на фоне фазового сдвига Саньяка приводит к дополнительному дрейфу нулевого сигнала [1].

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие точность ВОГ и влияние которых удалось ослабить при разработке ВОГ с замкнутым контуром обратной связи.

Оптические потери

Чувствительность ВОГ ограничена дробовым шумом, который вычисляется как величина, обратная квадратному корню из мощности, которая уменьшается с увеличением длины волокна, в то время как эффект Саньяка увеличивается. Эти два конкурирующих эффекта определяют оптимальную длину волокна для данной чувствительности.

Тепловые пометы

Зависящий от времени температурный градиент вдоль длины волокна может привести к ложным фазовым сдвигам вследствие температурной зависимости показателя преломления волокна. Для минимизации этого эффекта необходимо использовать волокна с меньшим значением dn/dT . Квадрупольная намотка, в которой равноотстоящие от центра точки волокна расположены в физически равных условиях, также значительно уменьшает этот эффект.

Обратное рассеяние света

Обратное рассеяние на входных-выходных соединителях и других неоднородностях ВОГ может являться причиной возникновения паразитных интерференций. Иммерсионные элементы для уменьшения разностей показателей преломления, а также использование наклонных поверхностей в МИОЭ снижают обратное рассеяние.

Электрооптический эффект Керра

Электрические поля распространяющихся в противоположных направлениях лучей могут привести к таким изменениям показателя преломления, которые будут неважными, если свет расщепляется на неравные части. Неважность, вызванная нелинейным эффектом Керра, может быть существенно снижена путем использования низкокогерентного источника излучения.

Магнитооптический эффект

Магнитооптический эффект Фарадея приводит к паразитному дрейфу гироскопа. Значительное уменьшение его влияния достигается путем использования волокна, сохраняющих поляризацию излучения, а также за счет использования защитных оболочек из пермаллоя. Реализованные технические решения позволили снизить чувствительность ВОГ к магнитному полю до уровня 0,05 град/ч/Эрстед.

Для ВОГ с идеальными компонентами (идеальным разветвителем, без обратного рассеяния и т. д.) предел измерений зависит от дробового шума в пучке света при измерении фотодетектором [17]. Недостоверность $\delta\Omega_\pi$, создаваемая колебанием в пучке света, которое вызвано дробовым шумом, можно выразить как [18].

$$\delta\Omega_\pi = \frac{c}{L \cdot D} \frac{\lambda/2}{(n_p n_D \tau)^{\frac{1}{2}}}, \quad (\text{Б.9})$$

где n_p — количество фотонов/сек, попадающих на фотодетектор, n_D — квантовая эффективность детектора, а τ — среднее время.

Параметры серийно выпускаемых в НПК «Оптолинк» волоконно-оптических гироскопов представлены в табл. Б.2.

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы, выпускаемые НПК «Оптолинк», используются в системах управления космическими аппаратами. Это, прежде всего, в системе управления спуском космических кораблей «Союз» и системе управления телескопом египетского спутника Egyptosat-1. В ближайшее время планируется использование ВОГ в ряде других космических аппаратов. Среди других применений ВОГ НПК «Оптолинк» следует отметить авиацию, внутритрубную диагностику трубопроводов, железнодорожный транспорт, космическую связь, военную технику.

Осуществляется экспорт волоконно-оптических гироскопов в Великобританию, Германию, Италию, США, Канаду, Австрию, Китай, Индию, Малайзию, Украину, Бразилию, Аргентину, Тайвань, Израиль, Корею.

Таблица Б.2. Параметры волоконно-оптических гироскопов производства НПК «Оптолинк»

Параметр	ОИУС2000	ОИУС1000	ОИУС501	ТИУС700 (прецизионный вариант ТИУС500)	ТИУС500	ТИУС200
Диапазон измеряемой угловой скорости, °/сек	±40	±90	±250	±100	±300	±1000
Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при фиксированной температуре, °/час	< 0,002	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,5	< 10
Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при изменении температуры от минус 40 °С до 50 °С, °/час	< 0,02	< 0,1	< 0,5	< 0,5	< 1,5	< 30
Погрешность масштабного коэффициента, %	< 0,005	< 0,01	< 0,08	< 0,08	< 0,1	< 0,51
Полоса пропускания, Гц	> 50	> 100	> 100	> 100	> 100	> 300
Спектральная плотность мощности шума, °/√час	< 0,0002	< 0,001	< 0,005	< 0,007	< 0,01	< 0,05
Напряжение питания	5V ± 0,25*	5V ± 0,25*	5V ± 0,25*	5V ± 0,25*	5V ± 0,25*	5V ± 0,25*
Мощность, потребляемая прибором, Вт:	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Масса (net), кг	1,7	0,9	0,35	1,2	1,2	0,3
Габаритные размеры, мм	Ø250×45	Ø150×38	Ø100×30	110×110×90	110×110×90	Ø62×91
Выходной сигнал	RS485**	RS485**	RS485**	RS485**	RS485**	RS485**

* По требованию заказчика возможно от 18 до 36 В

** По требованию заказчика возможно RS232/RS422, унитарный код

Литература

1. Lefevre H., «The Fiber-Optic Gyroscope», Artech House, 1993
2. Smith R. B., ed., «Selected Papers on Fiber-Optic Gyroscopes», SPIE Milestone Series, Vol. MS8, 1989.
3. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Фенюк М. А., Марчук В. Г., Кострицкий С. М., Падерин Е. М. Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым. // Гироскопия и навигация. 2004. N 1 С. 69–82.
4. Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Марчук В. Г., Фенюк М. А., Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Кострицкий С. М., Падерин Е. М., Зуев А. И. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом // Гироскопия и навигация. 2004. N 3. С. 62–72.
5. Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев, В. Г. Марчук, И. В. Морев, С. М. Кострицкий, Е. М. Падерин, Л. П. Несенюк, А. С. Бурлаев, Л. Г. Лисин Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Гироскопия и навигация, 2008, N 1, С. 71–81.
6. Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Feoktistova O. Y. LiNbO₃ Optical Waveguide Fabrication by High-Temperature Proton Exchange // J. Lightwave Technology. 2000. Vol. 18. P. 562–568.
7. Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Kostritskii S. M., Alkaev A. N., Paderin E. M., Maslennikov E. I., Apraksin D. V. Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange // in Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, G. C. Righini, Editor. Proc. SPIE. 2003. V. 4944. P. 262–267.
8. Патент РФ на изобретение № 2248020. Заявка № 2003128668/28 (030720)/ Способ изготовления многофункционального интегрально-оптического элемента на кристалле ниобата лития. Приоритет 25.09.2003. / Патентообладатель: ООО «НПК Оптолинк» / Авторы Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, С. М. Кострицкий, А. Н. Алкаев.
9. Патент РФ на изобретение № 22988190. Заявка № 2005114116. Интегрально-оптический модуль для волоконно-оптического гироскопа Приоритет: 11.05.2005 / Патентообладатель: ООО «НПК Оптолинк» / Авторы: Пономарев В. Г., Прилуцкий В. Е., Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Падерин Е. М.
10. Burns W. K. Phase Error Bounds of Fiber Gyro with Polarisation-Holding Fiber // J. Lightwave Tech. 1986. V. 4. P. 21–30.
11. Патент РФ на изобретение № 2252197. Заявка № 2003134317. Способ изготовления одномодового волоконного световода, сохраняющего поляризацию излучения. Приоритет 27.11.2003 / Патентообладатель: ООО «НПК Оптолинк» / Авторы: А. И. Зуев, А. В. Белашенко, В. К. Варнаков, А. Н. Силян, А. Л. Махалин.
12. Патент РФ на изобретение № 2283475. Заявка № 2005114117. Волоконно-оптический гироскоп. Приоритет 11.05.2005 / Патентообладатель: ООО

- «НПК Оптилинк» / Авторы: Пономарев В. Г., Прилуцкий В. Е., Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Рамзаев А. П.
13. Патент РФ на промышленный образец № 57894. Заявка № 2003500928. Измеритель угловой скорости волоконно-оптический. Приоритет 24.04.2003 / Патентообладатель: ООО «НПК Оптилинк» / Авторы: Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев, Ю. К. Пылаев.
 14. Патент РФ на промышленный образец № 58500. Заявка № 2004500548. Трехосный волоконно-оптический измеритель угловых скоростей. Приоритет 03.03.2004 / Патентообладатель: ООО «НПК Оптилинк» / Авторы Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев.
 15. Патент РФ на изобретение № 2283475. Заявка № 2005114117. Волоконно-оптический гироскоп. Приоритет 11.05.2005. Патентообладатель: ООО «НПК Оптилинк» / Авторы: Пономарев В. Г., Прилуцкий В. Е., Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Рамзаев А. П.
 16. Решение о выдаче патента РФ на промышленный образец. Заявка № 2006503810. Малогабаритный трехосный волоконно-оптический измеритель угловых скоростей. Приоритет 23.11.2006 / Патентообладатель: ООО «НПК Оптилинк» / Авторы: Ю. Н. Коркишко, В. А. Федоров, В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев.
 17. Lin S., Giallorenzi T. G. Sensitivity analysis of the Sagnac-effect optical-fiber ring interferometer // *Appl. Optics*. 1979. V. 18. N 6. P. 915–931.
 18. Davis J. L., Ezekiel S. Techniques for shot-noise-limited inertial rotation measurement using a multiturn fiber sagnac interferometer // *Proc. SPIE*, 1978. V. 157. P. 131–143.