

# ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП С ЛИНЕЙНЫМ ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ

В.Е. Прилуцкий<sup>\*</sup>, Ю.К. Пылаев<sup>\*\*</sup>, А.Г. Губанов<sup>\*\*\*</sup>  
НПП "Антарес", Россия, 410600, г.Саратов, ул. Ракинцева, 27.

E-mail: antar12@online.ru

Ю.Н. Коркишко<sup>\*\*\*\*</sup>, В.А. Федоров<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Е.М. Патерин<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
ООО "Оптодиик", Россия, 103498, г. Москва, К-498, МНЭТ, экспериментальный  
завод "Протон", E-mail: korkishk@chem.mice.ru

## Аннотация

**Ключевые слова:** оптическое волокно, гироскоп, интегральная оптика, серродинный преобразователь, автоматическое регулирование

*Рассматриваются вопросы проектирования и постановки на производство промышленных волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) высокой точности, пригодных для использования в инерциальных системах космической навигации. Представлен общий подход к компоновке оптического тракта ВОГ замкнутого типа с элементами интегральной оптики, отвечающий нынешнему уровню собственной технологической базы, описаны особенности структурных схем и электронных средств обработки сигнала.*

## Введение

Сама по себе возможность промышленного выпуска прецизионных ВОГ напрямую определяется уровнем технологической базы его основных компонентов и в первую очередь волоконных световодов и элементов интегральной оптики. Поэтому, работая над проектом по созданию ВОГ высокой точности, при максимальном использовании накопленного опыта в части понимания принципов и особенностей конструкторского исполнения и тех результатов, которые, на наш взгляд, являются надежно установленными и проверенными экспериментально, нам пришлось создавать собственную производственную инфраструктуру для изготовления таких элементов, как многофункциональный интегрально-оптический элемент (МИОЭ), волоконный световод PANDA, волоконные разветвитель, деполяризатор (ДП), контур.

Часть предлагаемых технических решений, относящихся как к сфере волоконных и интегрально-оптических технологий, так и касающихся электронных средств обработки сигнала, обладают новизной, защищены патентами, а их эффективность подтверждена экспериментально.

Нацеливаясь на создание прибора высокого класса точности, мы не исключаем разработку среднего или грубого вариантов: вследствие известной геометрической гибкости ВОГ эти варианты без особых усилий получаются из точного.

В ВОГ с замкнутым контуром обратной связи с помощью фазовых модуляторов (ФМ), установленных на концах волоконного контура (ВК), наряду с динамическим смещением разности фаз встречных световых волн на  $\pi/2$  рад осуществляется компенсация (обнуление) фазового сдвига Саньяка. В этом случае мерой угловой скорости может служить один из параметров сигнала управления ФМ. Известно, что при таком подходе выходная характеристика ВОГ линейризуется, а масштабный коэффициент (МК) становится независимым от параметров большинства структурных составляющих прибора [1]. И это очень важно, так как если обработку информации вести на переменном сигнале или цифровым способом, то наряду с улучшением стабильности МК существенно сокращается число факторов электронного происхождения, влияющих на величину дрейфа выходного сигнала.

Остаточные погрешности измерения угловой скорости могут быть уменьшены с помощью т. н. алгоритмической компенсации уходов нулевого сигнала или изменений МК (это возможно даже для ВОГ «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. Случайные же составляющие можно только уменьшать (но не компенсировать!) с помощью эффективных конструкторских и схемных решений и совершенствования технологии компонентов ВОГ.

---

<sup>\*</sup> Рук. направления по ВОГ

<sup>\*\*</sup> Ген. директор

<sup>\*\*\*</sup> К.т.н., зам. Ген. директора по науке

<sup>\*\*\*\*</sup> Д.ф.м.н., профессор, Ген. директор

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Д.ф.м.н., профессор, зам. Ген. директора

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Д.д.технолог

В данном проекте решается задача достижения следующих значений погрешностей (в том числе случайных) основных характеристик ВОГ:

- смещение нуля,  $3\sigma$ , °/час 0,1;
- шум выходного сигнала (спектральная плотность),  $\frac{1}{\text{час}}$  ~ 0,005;
- погрешность МК, %  $\leq 0,01$

в условиях воздействия внешних факторов, характерных для эксплуатации на космических аппаратах.

Основными направлениями технической реализации проекта являются:

- применение одномодового волокна типа PANDA с сильным двудучепреломлением и малыми потерями для симметричной намотки ВК длиной более 1000 м с диаметром 140 мкм;
- разработка и применение МИОЭ, получаемого методом протонного обмена, сочетающего в себе функции Y-разветвителя, поляризатора и ФМ;
- применение полупроводникового суперлюминесцентного диода (СЛД) в качестве источника излучения со встроенными микроохладителем, термодатчиком и фотоприемником (ФП) для стабилизации длины волны  $\lambda$  и мощности света с обеспечением ее значения на выходе встроенного одномодового световода (pigtail) не менее 2 мВт;
- разработка специальной серродвижной схемы обработки информации с замкнутыми контурами обратной связи, обеспечивающей минимальные погрешности преобразования и линейный цифровой выход как по угловой скорости, так и по накопленному значению угла разворота;
- разработка максимально бесшварной технологии сборки оптического блока (ОБ).

### 1. Базовая архитектура и базовые технологии

Обобщенная структурная схема прибора, принятая нами в качестве исходной для конкретной реализации, приведена на рис. 1. Такая архитектура («минимальная конфигурация»), как известно [3], обладая решающим для практических применений ВОГ свойством пространственной и поляризационной взаимности, обеспечивает его высокую чувствительность к вращению, а наличие в ней широкополосных ФМ в составе МИОЭ позволяет осуществлять управление фазовыми сдвигами световых волн по любому наперед заданному алгоритму практически без искажений. Последнее обстоятельство, можно сказать, развязывает руки разработчикам блоков электроники (БЭ) - появляется принципиальная возможность достижения предела точности ВОГ, определяемого оптическими компонентами, с приближением к фундаментальному по мере улучшения их качества.

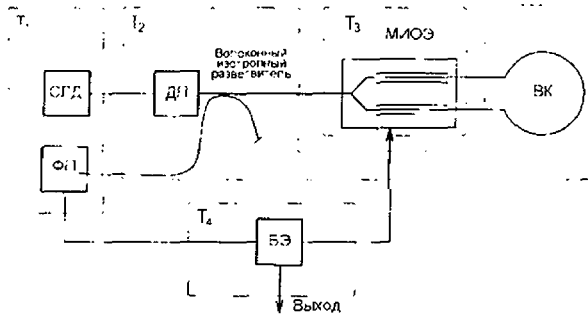


Рис. 1. Минимальная конфигурация ВОГ

На схеме (рис.1) пунктиром выделены четыре структурных составляющих ВОГ, объединяющих элементы с различными функциями, но изготавливаемых по одной технологии. Такими (базовыми) технологиями являются:

$T_1$  - полупроводниковая,  $T_2$  - волоконная,  $T_3$  - интегрально-оптическая,  $T_4$  - электронная (микроэлектронная).

Владение этими технологиями в рамках одного предприятия (объединения) позволяет эффективно и гибко вести разработку и изготовление ВОГ по замкнутому циклу, тем более что сырьевая и элементная база для них является доступной и относительно недорогой.

### 2. Структурная схема ВОГ

В так называемых серродвижных схемах замкнутого типа компенсация разности фаз Саньяка  $\Delta\varphi$  осуществляется фазовым сдвигом  $\Delta\varphi_m$ , вносимым пилообразной (на линейном участке) фазовой модуляцией световой волны (рис. 2):

$$\Delta\varphi_{rs} = \frac{\varphi_{rs} f \Delta\tau}{1 - \Delta\tau f}$$

где  $\Delta\tau = \frac{L n}{c}$  - разность времен групповой задержки световых волн,  $f = \frac{1}{T}$  - частота пилообразного сигнала,  $\varphi_{rs}$  - удвоенная амплитуда "пилы",  $L$  - длина ВК,  $n$  - показатель преломления сердцевины волокна,  $c$  - скорость света в вакууме,  $\Delta\tau$  - время спада "пилы".

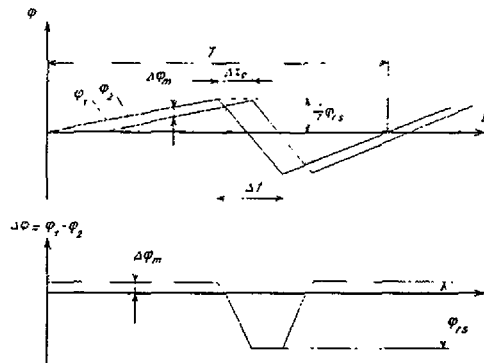


Рис. 2

Следящая система обеспечивает равенство этих величин с противоположными знаками, что приводит к следующему выражению для измеренной угловой скорости  $\Omega_{изм}$  (с точностью до знака):

$$\Omega_{изм} = -\frac{\lambda n}{2\pi D(1 - \Delta\tau f)} (\varphi_{rs} \times f), \quad (1)$$

здесь  $\lambda$  - центральная длина волны,  $D$  - диаметр ВК (среднее значение).

Нелинейная зависимость  $\Omega_{изм}$  от частоты из-за наличия в (1) случайной величины  $\Delta\tau$  дает основную погрешность измерения угловой скорости, выливающуюся в нестабильность и нелинейность МК. Использование быстродействующей электронной элементной базы позволяет уменьшать  $\Delta\tau$  до некоторого предельно малого, но все же конечного, значения, обеспечивая приемлемую для многих применений погрешность МК - при  $\Delta\tau \rightarrow 0$  функция (1) линеаризуется относительно  $f$ :

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

Однако кардинальное решение этой проблемы получается, если величину  $\Delta\tau$  не уменьшать, а специально поддерживать равной половине периода пилообразного сигнала  $\Delta\tau = T/2$  для любого значения частоты  $f$ . В этом случае серродинный сигнал превращается в сигнал треугольной формы, а задача непрерывной компенсации фазы Саньяка решается с помощью его периодического инвертирования на входе ФМ с той же частотой - формула (1) принимает вид

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

В выражении (3) в отличие от (2) частота  $f$  - это частота треугольного сигнала. Возникающее ухудшение (в два раза) дискретности преобразования компенсируется известной простотой получения симметричного переменного напряжения треугольной формы с заданной амплитудой и с частотой, определяемой сигналом рассогласования основной следящей системы. Ну а если при этом подсчитывать и положительные, и отрицательные пики этого напряжения, то соотношение (3) становится эквивалентным формуле (2).

Таким образом, при постоянных  $\lambda, n, D$  мерой угловой скорости является произведение  $\varphi_{rs} \times f$ . Ясно, однако, что непосредственно измерить фазовую амплитуду  $\varphi_{rs}$  пилообразной модуляции световой волны, в отличие от частоты  $f$ , невозможно. Оценить же ее величину можно по значению напряжения, подаваемого на ФМ, но в этом случае нужны точные сведения о его передаточной характеристике, которая сама по себе нестабильна. Этот подход, вообще говоря, заслуживает внимания, но нами еще недоста-

точно изучен. Поэтому пока мы останавливаемся на стандартном варианте стабилизации фазовой амплитуды пилообразной модуляции у значения  $\varphi_{\text{с}} = 2\pi$  рад с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки сигнала. В этом случае согласно (2) получаем

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

где  $\Omega$  - входная угловая скорость.

Поскольку флуктуации величин  $D$  и  $n$  имеют, в основном, термодинамический характер, то для их стабилизации волоконный контур изготавливается путем намотки волокна на теплоизолированный каркас с симметричной порядовой укладкой со стабильным натяжением.

Самым главным недостатком полупроводникового СЦД является сильная зависимость его спектра от температуры – порядка 0,04 % на градус. Это порождает температурную нестабильность МК (4), равную, например, 1,6 % в диапазоне температур 0÷40 °С вместо требуемой 0,01 %. С целью уменьшения этой нестабильности в составе ВОГ предусмотрено устройство терморегулирования (УТР), поддерживающее температуру кристалла излучателя около заданного значения с точностью не хуже 0,25 °С.

Известно, что наибольшая эффективность классического динамического смещения разности фаз встречных световых волн в ВК с одновременным подавлением паразитных амплитудной и поляризационной модуляций получается при прямоугольной форме т. н. вспомогательной модуляции с амплитудой

$$\pi \cdot 2 \text{ рад и с частотой } F = \frac{1}{2\Delta\tau_g} - \text{это соответствует работе на собственной частоте ВК.}$$

Надежное выполнение условия  $2F\Delta\tau_g = 1$  обеспечивается тем, что напряжение для вспомогательной модуляции формируется из опорного переменного сигнала, частота которого стабилизируется кварцевым резонатором. Значение частоты для заданной длины ВК, обеспечивающей требуемую точность измерения угловой скорости, выбирается согласно условию (для кремниевых волокон)  $F \cdot L \approx 10^8 (\text{Гц} \cdot \text{м})$ . Например, при  $F = 96 \text{кГц}$  должно быть  $L = 1070 \text{ м}$ .

Не так просто обстоит дело с поддержанием амплитуды вспомогательной фазовой модуляции на уровне  $\pi/2$  рад. Проблема не в том, чтобы сделать стабильным напряжение модуляции, а в том, что даже при стабильном напряжении фазовая амплитуда нестабильна либо как длина волны излучения, либо как передаточная функция ФМ и т.п. в зависимости от выбранной схемы обработки сигнала и от внешних факторов. Кардинальным решением этого вопроса является построение следящей системы, автоматически поддерживающей значение разности фаз встречных световых волн у заданного значения. Сигналом рассогласования для такой системы может служить отклик гироскопа на тарированное периодическое воздействие в виде импульса напряжения, прикладываемого к ФМ.

Предлагается следующий алгоритм построения системы автоматического регулирования амплитуды вспомогательной фазовой модуляции:

- с помощью стабильного опорного напряжения формируется амплитуда напряжения вспомогательной модуляции  $U_{\text{вм}}$ , соответствующая фазовой амплитуде  $\pi/2$  рад – выставка напряжения производится по максимуму выходного сигнала ВОГ при заданной угловой скорости с разомкнутой петлей обратной связи основного контура;

- с помощью прецизионного резистивного делителя формируется аналогичное напряжение модуляции с амплитудой, равной  $3U_{\text{вм}}$ ;

- периодически в заданные моменты времени на модулятор вместо напряжения  $U_{\text{вм}}$  подается напряжение  $3U_{\text{вм}}$  с частотой, значительно меньшей  $F$ , и на время, достаточное для измерения отклика на это возмущение с помощью устройства выборки и хранения. Ясно, что при постоянстве параметров системы её реакция на такое воздействие будет отсутствовать – сигнал рассогласования равен нулю. Но если, например, возрастет эффективность ФМ, то и фазовые амплитуды от обоих воздействий возрастут пропорционально, но фототок от основной модуляции  $U_{\text{вм}}$  уменьшится, а от возмущающей – увеличится! Эта разность фототоков будет представлять сигнал рассогласования, используя который следящая система уменьшает  $U_{\text{вм}}$  до тех пор, пока не обратит эту разность в нуль. При уменьшении эффективности ФМ процесс регулирования идет в обратном направлении.

На рис. 3 изображен график, поясняющий работу системы стабилизации фазовой амплитуды вспомогательной модуляции.

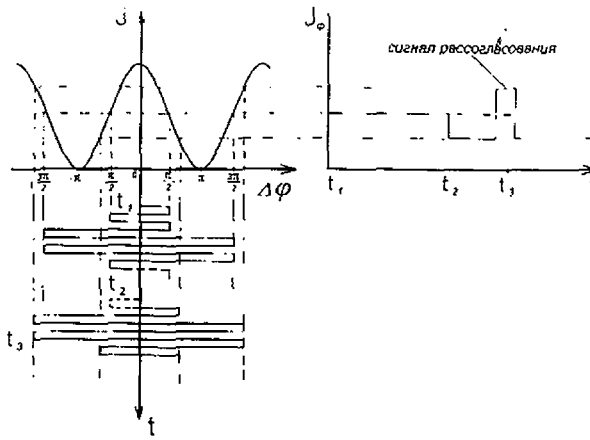


Рис.3. Вспомогательная модуляция.  
На графике не показаны переходные состояния («усы»).

Значение фазовой амплитуды компенсирующей модуляции, равное  $2\pi$  рад, легко формировать из опорного напряжения, используемого для формирования сигнала калибровки вспомогательной модуляции— достаточно преобразовать его в опорный сигнал для пилообразного напряжения с коэффициентом 4,3. Тем самым система стабилизации фазовой амплитуды вспомогательной модуляции автоматически будет являться и стабилизатором фазовой амплитуды «пилы». При этом очень важно, чтобы возмущения, вызываемые сбросом «пилы», не давали сбоев в работе контура стабилизации амплитуды и наоборот, возмущения, вызываемые импульсами калибровки, не давали сбоев в работе контура компенсации фазы Саньяка.

Решение этой задачи усложняется тем, что частота сбросов пилообразного напряжения определяется угловой скоростью и, следовательно, является случайной величиной. Необходимо различать два режима работы: режим малых и режим больших угловых скоростей. В первом случае частота импульсов калибровки не должна быть привязана к частоте «пилы», т.к. последняя может быть практически равной нулю, а это грозит потерей информации. Во втором случае время опроса фазовой амплитуды необходимо увязать с частотой «пилы» и выбрать его так, чтобы избежать взаимодействия двух контуров стабилизации. Один из вариантов построения такого алгоритма работы ВОГ реализован в предлагаемом проекте.

Если к сказанному добавить требования по надежной работе источника излучения в условиях воздействия внешних факторов, что обеспечивается запиткой СЛД через стабилизатор мощности света (СТМС), и требования по максимально-возможному ослаблению синфазной синхронной наводки на входные цепи фотоприемного устройства, что обеспечивается гальванической развязкой этих цепей от остальной электроники и дифференциальным усилением, то структурная схема предлагаемого ВОГ принимает вид (рис.4):

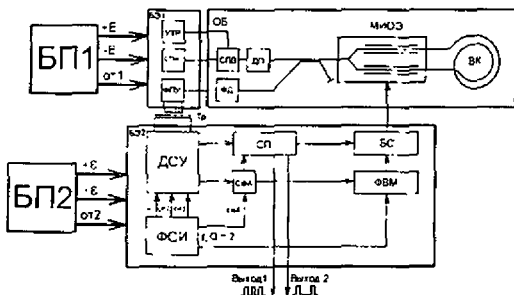


Рис. 4. Структурная схема ВОГ

БП1, БП2 - вторичные источники питания; БЭ1, БЭ2 - блоки электроники; ОБ - оптический блок; ДСУ - дифференциальный синхронный усилитель; ФСИ - формирователь синхроимпульсов; СП - серродинный преобразователь; СФА - схема формирования амплитуды; ФВМ - формирователь вспомогательной модуляции; БС - блок суммирования; СИ1 ÷ СИ4 - синхроимпульсы, задающие алгоритм обработки информации; Тр - трансформатор.

Функциональное содержание структурной схемы ясно из обозначения отдельных узлов и связей между ними. Нами проработаны два варианта реализации данной схемы:

- с аналоговой формой линейного участка пилообразной модуляции без привязки момента сброса «пилы» к частоте динамического смещения;
- со ступенчатой формой линейного участка пилообразной модуляции с привязкой момента сброса «пилы» к частоте динамического смещения и полностью цифровой обработкой сигналов.

Недостатки и достоинства каждого из вариантов общеизвестны.

### 3. Волоконный контур и волоконные элементы

Чувствительность ВОГ к вращению определяется, главным образом, конструкцией волоконного контура, т.е. его размерами, типом волокна и способом намотки. Сложилось так, что на данном этапе нашего проекта наиболее целесообразно в смысле доступности изготовления с достижением приемлемых результатов использовать одномодовое, поддерживающее поляризацию излучения, оптическое волокно типа PANDA с сильным двулучепреломлением. Нынешний уровень технологии изготовления волокна на предприятии "Оптолинк" позволяет получать волокна со следующими типовыми значениями основных параметров:

- потери мощности оптического излучения,  $\alpha$  3-4 дБ/км;
- длина поляризационных бией,  $L_p$   $\leq 2,5$  мм;
- коэффициент межмодовой поляризационной связи,  $h$   $\leq 5 \cdot 10^{-5}$  1/м;
- внешний диаметр,  $d$   $\leq 80$  мкм.

Выражение для верхней границы фазовой ошибки ВОГ, возникающей вследствие основного дестабилизирующего фактора - поляризационной невязанности [4], приводит к зависимости минимально обнаруживаемой угловой скорости от параметров ВК, имеющей вид:

$$\Omega_{\min} \sim \frac{hL_p}{DL}$$

Эта зависимость такова, что при переходе от ВК на эллиптическом волокне с параметрами  $L_p \approx 8$  мм,  $h \approx 10^{-3}$  1/м,  $D \approx 80$  мм,  $L \approx 200$  м (например, прибор ВГ910) к ВК на волокне типа PANDA с параметрами  $L_p \approx 2,5$  мм,  $h \approx 10^{-5}$  1/м,  $D \approx 140$  мм,  $L \approx 1000$  м при прочих равных условиях величина  $\Omega_{\min}$  уменьшается более чем в 150 раз.

Направленные разветвители, изготавливаемые методом скручивания - сплавления - вытяжки из изотропного одномодового волокна, имеют типовые значения параметров (при  $\lambda = \text{const}$ ):

- коэффициент деления по мощности, % 50±1;
  - избыточные потери мощности, дБ 0,1
- со значениями температурной, спектральной и поляризационной чувствительностей коэффициента деления, не выходящими его за пределы допуска.

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 15 нм, %  $< 0,1$ .

### 4. Многофункциональный интегрально-оптический элемент

Одним из ключевых элементов прецизионного ВОГ является МИОЭ, состоящий из интегральных двухплечевых электрооптических фазовых модуляторов на основе Y-разветвителя канальных волноводов на кристалле X-среза ниобата лития. Интегрально-оптический Y-разветвитель изготавливается по планарной технологии высокотемпературного протонного обмена (ВТПО). Процессы проводятся в специально разработанных контейнерах-автоклавах. В качестве масок, используемых для обеспечения локальности протоннообменной диффузии, разрабатываются и применяются специальные пленочные покрытия. Затем в каждом плече путем напыления электродов формируются интегральные электрооптические фазовые модуляторы. Метод ВТПО был предложен и разработан авторским коллективом предприятия «Оптолинк» [5].

Важным достоинством протоннообменных волноводов является то, что в них имеет место повышение показателя преломления только необыкновенного луча, тогда как показатель преломления обыкновенного луча понижается. В результате в таких волноводах распространяются моды только одной поляризации и в ВОГ отпадает необходимость использования вносящего дополнительные потери поляризатора, что требуется при использовании титандиффузионных волноводов.

Известно, что стандартная технология получения протоннообменных волноводов (АРЕ-технология) использует двухстадийный процесс, состоящий из протонного обмена, как правило, в расплаве безводной кислоты, и последующего отжига. В процессе формирования в поверхностной области таких волноводов формируются дефекты, которые являются источниками дополнительного рассеяния света. ВТПО, в отличие от АРЕ, не допускает никаких фазовых переходов, что позволяет добиться меньших оптических потерь и более высоких электрооптических свойств.

Моделирование Y-разветвителя с помощью программного обеспечения ВРМ-sad фирмы Optimate позволило выбрать оптимальную функцию разветвления.

После изготовления Y-разветвителя и создания электродов проводятся сначала операции резки пластин (под углом 10 градусов к оси Y) и полировки торцев, а затем – операции стыковки с входным изотропным и двумя выходными анизотропными волокнами типа PANDA с последующей установкой в корпус и соединением электродов ФМ с гермовыводами посредством сварки.

МИОЭ представляет собой моноблочное герметичное изделие, выполненное по технологии микросборки, которое может подключаться к оптическому блоку ВОГ посредством сварки волоконных световодов и пайки электрических гермовыводов фазовых модуляторов к блоку электроники.

Основные технические характеристики МИОЭ с рабочей длиной волны  $0,83 \pm 0,03$  мкм:

- потери оптической мощности (при вводе деполаризованного излучения), дБ < 8;
- коэффициент экстинкции поляризатора, дБ > 40;
- коэффициент деления  $0,5 \pm 0,05$ ;
- фазовая чувствительность каждого из модуляторов, рад/В > 1.

### 5. Источник и приемник излучения

В качестве источника света используется излучатель ИЛПН-330-4, изготавливаемый на предприятии “Инжекст”, г. Саратов. В состав излучателя входят:

1. Полосковый СЛД на основе двойной гетероструктуры в системе GaAs/GaAlAs с изоляцией встречным р-п переходом с поглощающим слоем в активной области. Такая конструкция СЛД обеспечивает практически гладкий спектр с полушириной  $15 \div 18$  нм и получение мощности излучения до  $1,5 \div 2$  мВт на выходе встроенного одномодового волоконного световода.

2. Микроохладитель на базе элементов Пельтье для поддержания температуры кристалла СЛД в данном диапазоне при совместной работе с устройством терморегулирования УТР.

3. Термодатчик для формирования сигнала рассогласования в УТР.

4. Фотодиод на основе кремниевой р-і-п структуры для формирования сигнала управления в СТМС.

Конструктивно все элементы, входящие в ИЛПН-330-4, размещены в стандартном герметичном корпусе с электрическими и оптическим гермовыводами.

В качестве приемника излучения используется фотодиод на основе кремниевой р-і-п структуры типа ФПН-850К, изготавливаемой на том же предприятии. Фотодиод имеет токовую чувствительность на длине волны  $\lambda = 0,835$  мкм не менее  $0,3$  А/Вт с временем нарастания и спада фронта импульсного сигнала не более 2 нс.

Конструктивно фотодиод выполнен в герметичном корпусе со встроенным многомодовым волоконным световодом.

### 6. Особенности электронного обеспечения ВОГ

Электронные средства, задействованные в ВОГ, выполняют следующие основные функции:

- подключение излучателя к источнику питания с одновременной стабилизацией мощности света и температуры кристалла СЛД;
- преобразование, усиление и синхронное детектирование сигнала с выхода ОБ;
- формирование напряжения для вспомогательной фазовой модуляции световых волн;
- формирование напряжения для компенсирующей фазовой модуляции световых волн;
- формирование выходного сигнала.

Главной особенностью, и в то же время достоинством, разработанных электронных схем, является то, что практически все они функционально построены как замкнутые системы автоматического регулирования с астатизмом первого порядка. Это позволяет существенно улучшить динамические свойства прибора и уменьшить установившиеся ошибки всех видов.

На рис.5 приведена структурная схема главной системы регулирования, которая отвечает за поддержание разности фаз Саньяка около нулевого значения.

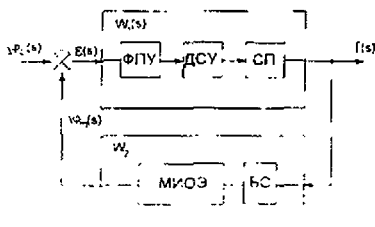


Рис. 5. Структурная схема главной системы автоматического регулирования.

$s$  - символ преобразования Лапласа,  
 $E(s)$  - ошибка регулирования

Входным (управляющим) воздействием для этой системы является разность фаз Саньяка  $\Delta\varphi_c(s)$ , а выходным сигналом - после-

довательность импульсов, частота следования которых  $f(s)$  пропорциональна угловой скорости (4), а количество импульсов определяет угол разворота прибора с дискретностью  $\frac{\lambda n}{D}$ . Динамика преобразования и ошибка регулирования определяются передаточными функциями замкнутой системы по управляющему воздействию и по ошибке соответственно.

Электронные цепи, реализующие структурные единицы ВОГ, определяют передаточные функции звеньев прямой цепи  $W_1(s)$  и обратной связи  $W_2$ :

$$W_1(s) = \frac{\pi K}{2\varphi_n V_\pi T_1 T_2 s} \quad (5)$$

$$W_2 = 2\varphi_n \Delta\tau_k \quad (6)$$

здесь  $K$  - коэффициент усиления разомкнутой системы (добротность);  $V_\pi$  - полувольтное напряжение ФМ;  $T_1, T_2$  - постоянные времени интегратора в блоке ДСУ и блока СП соответственно.

Добротность нашей системы  $K$  имеет размерность напряжения (преобразование сдвига фаз в напряжение) и определяется множеством факторов оптического и электронного происхождения: величина  $K$  пропорциональна интенсивности света, падающего на фотодиод (это мощность СЛД и потери оптического тракта), видности интерференционных полос (это степень когерентности света и коэффициент деления МИОЭ), эффективности фотодиода, коэффициентам усиления ФПУ и ДСУ, она имеет максимум при оптимальных частоте и глубине вспомогательной модуляции.

С учетом соотношений (5), (6) получаются передаточные функции по управлению

$$F(s) = \frac{1}{2\varphi_n \Delta\tau_k (1 + Ts)} \quad (7)$$

и по ошибке

$$E(s) = \frac{Ts}{1 + Ts} \quad (8)$$

где  $T = \frac{V_\pi T_1 T_2}{\pi K \Delta\tau_k}$  - постоянная времени, определяющая динамические свойства ВОГ, т.е. его полосу пропускания и динамическую ошибку регулирования.

Таким образом, согласно (7) и (8), замкнутый контур обратной связи главной системы по управляющему воздействию есть инерционное звено первого порядка, а по ошибке - инерционное дифференцирующее звено. С помощью широко известных математических методов анализа с учетом исходных требований к точностным и динамическим характеристикам ВОГ определяется возможный диапазон значений параметров элементов, определяющих величину  $T$ , и их оптимальные значения, гарантирующие устойчивость и точность системы регулирования. Но уже из вида приведенных зависимостей следует качественный вывод: для достижения хороших параметров ВОГ необходимо повышать добротность  $K$  (главным образом ее оптическую составляющую), эффективность фазового модулятора (уменьшение  $V_\pi$ ) и увеличивать длину ВК (увеличение  $\Delta\tau_k$ ), разумеется, в допустимых пределах. Качественным достоинством такого построения ВОГ является, несомненно, равенство нулю ошибки регулирования при постоянной входной угловой скорости и её постоянное ненакапливающееся малое значение при постоянном изменении последней.

Для реализации контура регулирования амплитуды компенсирующей модуляции используются те же структурные звенья, что и для главного, с тем отличием, что здесь управляющим воздействием является сигнал рассогласования в виде отклика на упоминавшееся тарированное воздействие. Алгоритм совместной работы контуров обратной связи построен так, чтобы максимально исключить их взаимодействие, искажающее работу, и обеспечить независимое приведение регулируемых величин к значениям  $\Delta\varphi_k = 0$  и  $\varphi_n = 2\pi$ . При этом условии в установившемся состоянии ( $S=0$ ) из (7) автоматически получается выражение (4) для МК.

Ещё один контур обратной связи в составе СТМС предназначен для поддержания мощности излучения СЛД в условиях воздействия внешних факторов и в переходных режимах на уровне, соответствующем номинальному току накачки при заданной (нормальной) температуре. Этим решаются две принципиально важные задачи:

- стабилизируется полоса пропускания ВОГ, а значит и уровень шума на его выходе;



- исключается несанкционированное, пусть даже незначительное, превышение допустимого уровня мощности излучения, способное вызвать деградацию СЛД.

Структурная схема СТМС приведена на рис. 6.

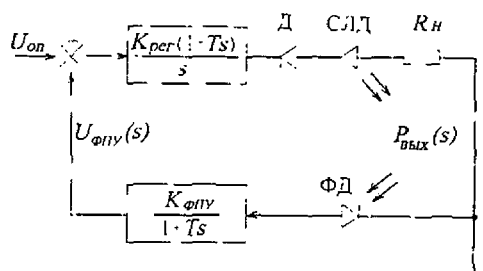


Рис. 6.

$U_{оп}$  - опорное напряжение.  $K_{рег}$  - коэффициент усиления регулятора, Д - защитный диод, Т - постоянная времени цепей регулятора и ФПУ.  $K_{ФПУ}$  - коэффициент усиления ФПУ.  $R_н$  - нагрузочное сопротивление.  $P_{вых}$  - мощность излучения СЛД. S - символ преобразования Лапласа.  $U_{ФПУ}$  - напряжение на выходе ФПУ, ФД - фотодиод

Переходная характеристика СТМС, т.е. зависимость  $P_{вых}(S)$  от параметров схемы и от времени, в символах преобразования Лапласа имеет вид

$$P_{вых}(S) = K_{СЛД} \left[ \frac{K_{рег}(1+TS)U_{оп} - S(V_{д} + V_{СЛД})}{R_н S + K_{СЛД} K_{рег} K_{ФПУ}} \right]$$

здесь  $K_{СЛД}$  - эффективность СЛД,  $V_{д}$  и  $V_{СЛД}$  - прямые падения напряжения на диодах Д и СЛД соответственно.

В установившемся режиме ( $S = 0$ ) мощность света, излучаемого СЛД, будет равна

$$P_{вых} = \frac{U_{оп}}{K_{ФПУ}}$$

т.е. определяется значением опорного напряжения и коэффициентом ФПУ. Точность  $P_{вых}$  зависит, таким образом, от точности отношения  $\frac{U_{оп}}{K_{ФПУ}}$ . Но величины  $U_{оп}$  и  $K_{ФПУ}$  в значительной степени неза-

висимы, поэтому для обеспечения стабильности  $P_{вых}$  необходимо требовать стабильности  $U_{оп}$  и  $K_{ФПУ}$  в отдельности. Стабильность  $U_{оп}$  достигается применением прецизионных стабилизатора и резисторов схемы формирования. Стабильность  $K_{ФПУ}$  складывается из стабильности ФД и усилителей. Точность последних достигается применением операционных усилителей с большим коэффициентом в схеме без обратной связи и прецизионных резисторов для формирования обратной связи. Таким образом, точность системы стабилизации мощности излучения СЛД в стационарном режиме определяется, главным образом, точностью передаточной характеристики ФД.

Структура контура обратной связи УТР аналогична структуре контура в СТМС.

Одним из факторов, ограничивающим номенклатуру возможных схемотехнических решений для преобразования высокочастотной оптико-фазовой информации об угловой скорости в низкочастотную электронную, является чрезвычайно малый уровень сигнала на выходе оптического тракта. Например, для скорости 0,1 °/час даже при мощности источника излучения 2 мВт, потерях оптического тракта на уровне 20 дБ, размерах ВК: D=140 мм. L=1070 м и эффективности фотодиода на уровне 0,3 А/Вт полезная составляющая фототока соответствует уровню 0,01 нА. В этих условиях, естественно, заметную роль начинают играть помехи и наводки. в том числе синфазные, как по входу БЭ, так и по цепям питания, а также собственные шум и смещения электронных каскадов.

Для поддержания отношения сигнал/шум на уровне, формируемом оптической частью ВОГ, при проектировании БЭ реализованы следующие основные решения:

- ФПУ выполнено на малощумящих широкополосных операционных усилителях по схеме с дифференциальными входом и выходом с высокой степенью геометрической симметрии электрических цепей, соединяющих фотодиод с усилителями;

- цепи питания ОБ, в том числе и ФПУ, гальванически развязаны с цепями питания остальной части ВОГ;

- в цепях максимального подавления той составляющей синфазной наводки, которая синхронна с процессом демодуляции, при регулировании ВОГ предусмотрена балансировка дифференциальных плеч в ДСУ.

Еще одной особенностью БЭ является то, что с целью минимизации уходов нуля ВОГ, вызываемых смещениями в электрических цепях, обработка информации ведется на переменном сигнале (для цифровым способом) во всех каскадах, кроме одного - интеграторе главной следящей системы. Этот каскад выполнен на прецизионной микросхеме, у которой смещения нуля во всем температурном диапазоне могут приводить к уходом выходного сигнала не более  $0.002^{\circ}$  час.

Электропитание ВОГ осуществляется от внешнего источника постоянного напряжения 18,3 В и три ветровых гальванически развязанных преобразователя ДСДС с выходными напряжениями:  $\pm 15$  В,  $\pm 12$  В и  $\pm 5$  В.

Энергоспотребление в установившемся режиме не превышает 6 Вт, в переходном режиме после включения в течение 0,1 сек не более 30 Вт.

В настоящее время ведется работа по переводу значительной части БЭ на исполнение по твердотельной технологии. По мере ее отработки и завершения габаритные и энергетические характеристики прибора значительно улучшатся. Есть надежда, что при этом улучшатся и точностные показатели.

## 7. Технология сборки ОБ

Стабильность нулевого сигнала ВОГ обеспечивается не только качеством волоконных компонентов и МИОЭ, но и технологией сборки ОБ. Известно, что сварные соединения волокон являются причиной возникновения избыточных потерь оптической мощности и центрами перекрестной связи между поляризованными модами. В связи с этим интегрирование МИОЭ в 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. Подсоединение деполаризатора и фотоприемника осуществляется посредством хорошо отработанной сварки с изотропными волокнами.

## Заключение

Расчет и экспериментальные данные, полученные совместно в НПП "Антарес", г.Саратов, и в ООО "Оптоленик", г. Зеленоград, свидетельствуют о том, что в предложенной конфигурации ВОГ при надлежащем уровне технологии изготовления оптических компонентов достигаются значения точностных характеристик, делающие этот прибор пригодным для использования в целях инерциальной навигации на космических аппаратах.

С переходом на рабочую длину волны излучения 1,55 мкм при осуществлении алгоритмической компенсации возможно улучшение приведенных в докладе характеристик не менее чем на порядок.

## Литература

1. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. Artech House, 1993.
2. Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V. Fiber Optic Gyro with Digitally Corrected Output, 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2001. P.49-56.
3. Optical Gyros and their Application, RTO - AG -339, 1999.
4. Burns W.K. Phase Error Bounds of Fiber Gyro with Polarisation - Holding Fiber. J.Lightwave Techn., V.4, №1, 1986.
5. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y. LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide Fabrication by High- Temperature Proton Exchange. J. Lightwave Technology, 2000, v.18, № 4. P.562-568.