

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Рассмотрены основные проблемы, ограничивающие точностные характеристики волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), и представлены основные пути их решения. Описан наиболее вероятный механизм начального дрейфа нулевого сигнала при разогреве прибора и при воздействии на него внешних дестабилизирующих факторов. Представлены конструкции одномодовых световодов для оптических компонентов волоконного кольцевого интерферометра и новых одномодовых волокон чувствительной катушки для решения проблемы их радиационной стойкости, а также конструкция самой чувствительной катушки для подавления ее температурной чувствительности. Предложен новый способ электронной обработки информации, решающий проблему устранения зоны нечувствительности ВОГ.

Введение

В последнее время для точной навигации все чаще используются волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). Они имеют целый ряд преимуществ перед механическими и кольцевыми лазерными гироскопами по стоимости, габаритам, энергопотреблению и т.д. Специалистами филиала ФГУП «ЦЭНКИ» «НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова» разрабатывается параметрический ряд ВОГ самого широкого применения, имеющих точность в диапазоне от 0,5 до 0,01 град/ч и стабильность масштабного коэффициента от 0,1 до 0,01%. При проведении дальнейших работ в целях доведения точности до 0,001 град/ч и выше необходимо провести комплекс работ по усовершенствованию оптических компонентов ВОГ и алгоритма обработки информации.

В основу всех видов ВОГ положены практически одни и те же принципы обработки информации, поступающей с волоконного кольцевого интерферометра (ВКИ) ВОГ, отличающиеся, в зависимости от точности прибора, формой и глубиной вспомогательной фазовой модуляции. ВКИ всех видов ВОГ строятся по одной и той же оптической схеме и отличаются друг от друга, также в зависимости от точности ВОГ, особенностями конструкции и технологии изготовления чувствительной катушки, а также типом и длиной световода.

При разработке ВОГ специалисты сталкиваются с целым рядом технических проблем, которые ограничивают достижение их предельных характеристик, таких, как время готовности, зона нечувствительности (ЗН), смещение нуля ВОГ из-за несовершенства компонентов ВКИ и электронного тракта. Также характеристики гироскопов ухудшаются при работе в условиях изменения температуры окружающей среды, воздействия вибрационных нагрузок и радиационного облучения.

Курбатов Александр Михайлович. Заместитель главного конструктора по ВОГ ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (Москва).

Курбатов Роман Александрович. Кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры».

На рис. 1 показана структурная схема ВОГ. В состав МАО входит фотоприемник, усилитель тока фотоприемника, интегратор, устраняющий постоянную составляющую сигнала усилителя, электронный ключ для вырезания пиков в сигнале на выходе усилителя тока фотоприемника и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Блок МЦО формируется на базе ПЛИС «ALTERA». На выходе ЭВСИ используется циркулятор оптического излучения, с выхода которого излучение поступает на вход ВКИ. Излучение с ВКИ через тот же циркулятор попадает на фотоприемник МАО. Для обработки информации, поступающей с ВКИ, используется так называемая серродинная схема [1]. Электронный блок содержит две петли обратной связи (ОС). Первая петля ОС поддерживает нулевой уровень сигнала на выходе синхронного детектора с помощью формируемого в МЦО пилообразного ступенчатого напряжения, подаваемого на электроды фазовых модуляторов интегрально-оптической схемы (ИОС) ВКИ одновременно с электрическим сигналом фазовой модуляции. Таким образом, производится компенсация разности фаз Саньяка в ВКИ. Вторая петля ОС обеспечивает стабилизацию масштабного коэффициента ВОГ за счет поддержания на определенном уровне амплитуды компенсирующего разность фаз Саньяка ступенчатого пилообразного напряжения. Вторая петля ОС формируется в МЦО. На рис. 2 показана типичная временная зависимость смещения нуля ВОГ с масштабным коэффициентом ВКИ 18,95 мрад на 1 град/с в течение 12 ч.

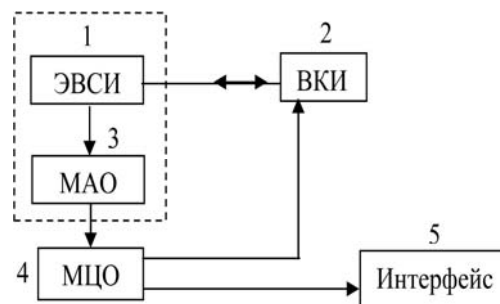


Рис. 1. Структурная схема ВОГ.

1 – эрбиевый волоконный суперлюминесцентный источник (ЭВСИ) с низкой временной когерентностью, 2 – волоконный кольцевой интерферометр (ВКИ), 3 – электронный модуль аналоговой обработки информации (МАО), 4 – электронный модуль цифровой обработки информации (МЦО), 5 – интерфейс

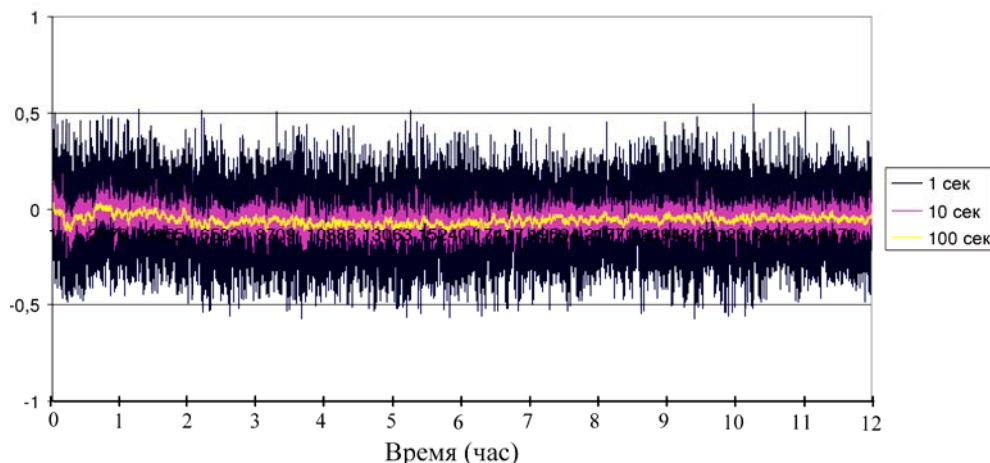


Рис. 2 Временной дрейф выходного сигнала ВОГ в течение 12 ч при его включении в холодном состоянии («холодном» включении). Время выхода на режим составляет ~1 ч. При обработке сигнала использовалось время усреднения 1, 10 и 100 с

Видно, что в первый час паразитное смещение нуля составляет ~0,1 град/ч и наблюдается в течение 1 ч после включения прибора (время готовности), а при дальнейшей работе прибора смещение нуля не превышало 0,02 град/ч. Более

детальное изучение дрейфа выходного сигнала с помощью построения графиков вариаций Аллана показывает, что минимальный дрейф выходного сигнала в течение последних 8 ч составил порядка 0,003 гад/ч.

1. Время готовности

Источники оптического излучения могут являться одной из причин роста времени готовности ВОГ. В качестве источников излучения для ВОГ средней и высокой точности используются ЭВСИ [2]. В наших приборах используются ЭВСИ производства ООО «НТО «ИРЭ-Полус», г. Фрязино, Россия. В них, как правило, в одном корпусе с ЭВСИ размещается электронная плата МАО, на выходе которой находится аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для связи с платой МЦО. На рис. 3 показана структурная схема компонентов ВОГ, которые размещаются в одном корпусе с ЭВСИ.



Рис. 3. Компоненты ВОГ, размещенные в одном корпусе: 1 – ЭВСИ, 2 – плата МАО, 3 – PIN-фотодиод, 4 – оптический циркулятор (или волоконный трехпортовый разветвитель)

На рис. 4 показан типичный спектр излучения ЭВСИ.

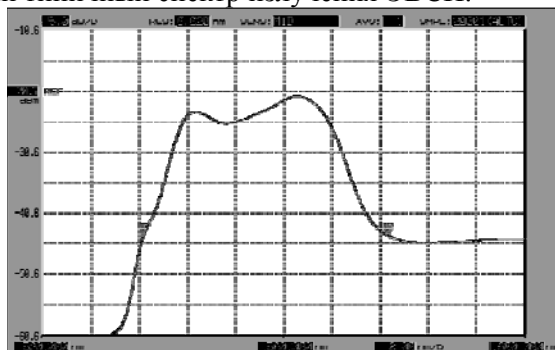


Рис. 4. Типичный спектр излучения ЭВСИ. Вертикальная шкала – уровень мощности (dBm), горизонтальная – длина волны (nm)

В диапазоне температур $-40...+60^{\circ}\text{C}$ потребляемая мощность ЭВСИ не более 4 Вт, а суммарная выходная оптическая мощность по четырем каналам составляет 52 мВт.

Основными достоинствами ЭВСИ являются высокая выходная мощность, деполаризованное излучение на выходе, высокая температурная стабильность центральной длины волны (ЦДВ) излучения и большая ширина спектра ($\Delta\lambda$). Используемый нами спектроанализатор имеет встроенные функции для вычисления ЦДВ и ширины спектра согласно следующим соотношениям:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i S(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^N S(\lambda_i)}, \quad \Delta\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 S(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^N S(\lambda_i)}}.$$

Здесь $S(\lambda)$ – измеряемая спектроанализатором спектральная плотность мощности излучения, N – число измеренных спектральных компонент. К недостаткам ЭВСИ можно отнести провал в его спектре (рис. 4). Данный провал приводит к уменьшению эффективной ширины спектра излучения, т.е. к росту длины деполяризации в световодах с линейным двулучепреломлением. Это, в частности, может привести к росту поляризационной ошибки в ВКИ, однако, как показывает расчет, этот рост незначителен [3].

Итак, стабильность выходной мощности и стабильность ЦДВ излучения ЭВСИ могут определять время выхода на режим при «холодном» включении прибора, а также его точность после саморазогрева диодов накачки ЭВСИ. На рис. 5 показан график изменения выходной мощности ЭВСИ при его «холодном» включении.

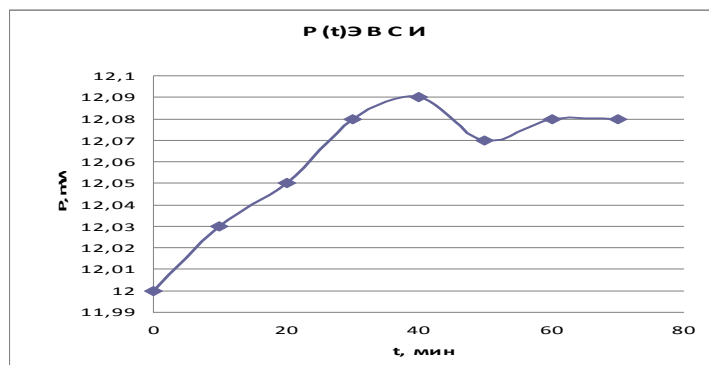


Рис. 5. Изменение выходной мощности ЭВСИ при его «холодном» включении (температура корпуса ЭВСИ изменяется на 12°C из-за саморазогрева диодов накачки)

На рис. 6 показаны графики изменения ЦДВ излучения ЭВСИ и ширины его спектра в случае «холодного» включения прибора при постоянном значении температуры окружающей среды.

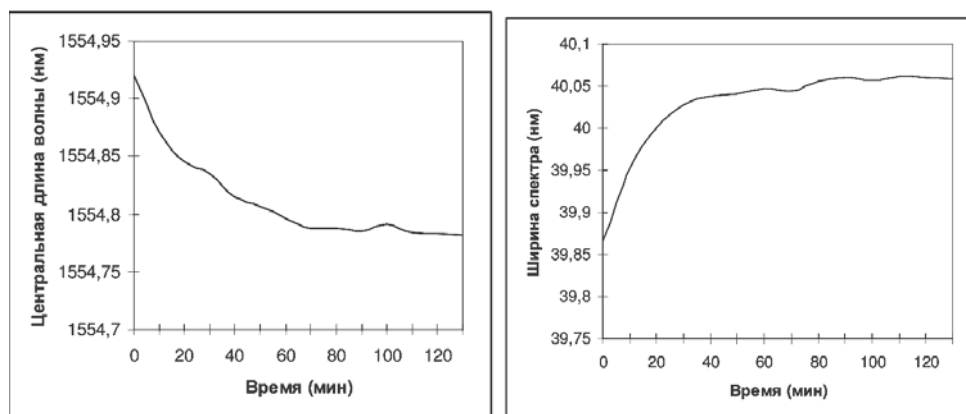


Рис. 6. Изменение ЦДВ излучения и ширины его спектра при «холодном» включении ЭВСИ

Изменение ЦДВ в течение первого часа происходило приблизительно по экспоненциальному закону и не превысило 90 pm, при этом стабильность масштабного коэффициента (МК) ВОГ на фиксированной температуре при «холодном» включении прибора была на уровне 0,009%. При саморазогреве темпе-

ратура корпуса изменялась также по экспоненциальному закону, так что температурный коэффициент ухода ЦДВ излучения ЭВСИ составляет $7,7 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$.

На рис. 7 показан график зависимости ЦДВ ЭВСИ от температуры окружающей среды при ее повышении на 20°C , начавшемся по окончании 130-минутного саморазогрева прибора (см. рис. 6).

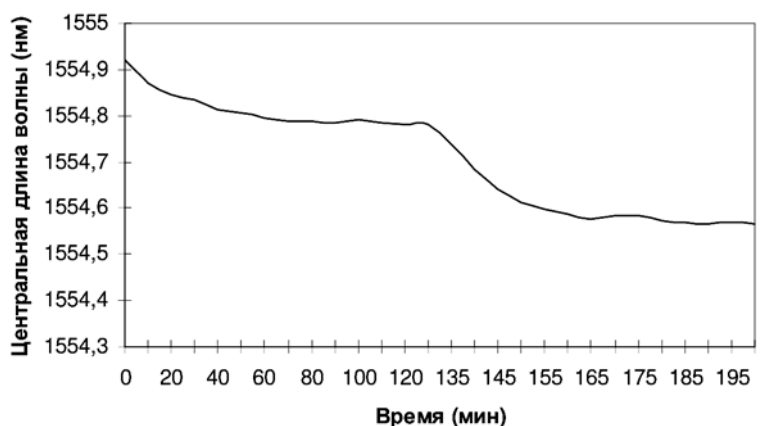


Рис. 7. Изменение ЦДВ излучения ЭВСИ. Участок до 130 мин соответствует графику на рис. 6, участок после 130 мин характеризует ЦДВ из-за повышения температуры окружающей среды на 20°C

Видно, что зависимость ЦДВ излучения от температуры окружающей среды носит практически линейный характер, что позволяет увеличить стабильность масштабного коэффициента ВОГ при использовании температурной коррекции ЦДВ излучения ЭВСИ более чем на порядок. Таким образом, с учетом коррекции температуры стабильность МК ВОГ может составить $0,77 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$. Впрочем, из приведенного выше анализа также следует, что стабильность ЦДВ ЭВСИ даже в отсутствие температурной коррекции не является возможной причиной ухудшения времени готовности ВОГ.

Наиболее вероятной причиной ухудшения времени готовности ВОГ могут быть изменения выходной мощности ЭВСИ при его «холодном» включении, так как время изменения выходной мощности ЭВСИ (см. рис. 5) и время выхода на режим ВОГ практически совпадают. На рис. 8 показан типичный дрейф выходного сигнала ВОГ с МК ВКИ, равным $18,95 \text{ мрад/на } 1 \text{ град/с}$, в течение $8,5 \text{ ч}$ в установившемся режиме.

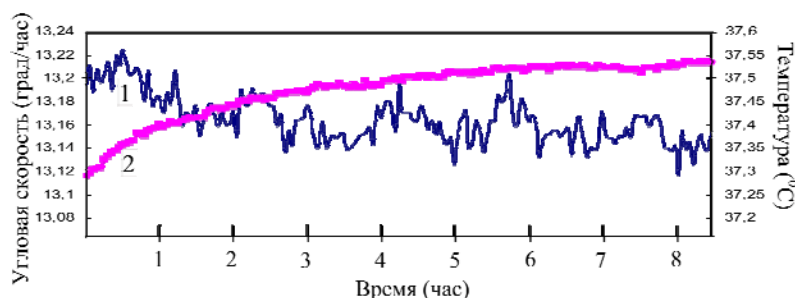


Рис. 8. Типичный дрейф выходного сигнала ВОГ (кривая 1, левая вертикальная ось) и график изменения температуры фотоприемника (кривая 2, правая вертикальная ось) в установившемся режиме в течение $8,5 \text{ ч}$

Изменение температуры корпуса фотоприемника, как и изменения выходной мощности ЭВСИ при саморазогреве, приводит к изменению амплитуды *сигнала вращения гироскопа*. Под *сигналом вращения* понимается выходной сигнал гироскопа с открытым контуром, представляющий собой периодический прямоугольный сигнал на частоте вспомогательной фазовой модуляции, амплитуда которого пропорциональна угловой скорости вращения. Формирование сигнала вращения проиллюстрировано ниже, при описании электронной схемы обработки информации (рис. 18, б).

Возможный механизм возникновения погрешности измерения угловой скорости в этом случае может заключаться в следующем. Из-за нелинейности характеристик электронных компонентов МАО, а также из-за неидеальных характеристик фазовых модуляторов ИОС (конечная полоса пропускания оптического сигнала, разность эффективности фазовых модуляторов, установленных на разных концах световода чувствительной катушки) на выходе синхронного детектора возникает остаточный паразитный сигнал Δ , обусловленный исключительно несовершенствами электронных компонентов. В этом случае при работе ВОГ в режиме закрытого контура ошибка пропорциональна величине [4]

$$\varphi_s - \varphi_k = (\Delta/P_0\eta_\Phi G_0 \sin\Phi_M),$$

где φ_s – разность фаз Саньяка, P_0 – мощность интерферирующих лучей на фотоприемнике, η_Φ – чувствительность фотоприемника, G_0 – коэффициент усиления электронного тракта, Φ_M – амплитуда вспомогательной фазовой модуляции, φ_k – разность фаз, вносимая пилообразным ступенчатым напряжением. Таким образом, погрешность измерения угловой скорости становится зависимой от амплитуды сигнала вращения гироскопа, равной $P_0\eta_\Phi G_0 \sin\Phi_M$.

Для коррекции выходной характеристики ВОГ может использоваться дополнительная электронная цепь, которая предусматривает наличие дополнительного синхронного детектора, выделяющего сигнал, пропорциональный постоянному уровню оптического сигнала на фотоприемнике. Изменения амплитуды сигнала вращения полностью коррелированы с изменениями постоянной составляющей этого сигнала, что может использоваться для его стабилизации. После соответствующего масштабирования сигнал с выхода дополнительного синхронного детектора может использоваться для стабилизации амплитуды сигнала вращения и рассогласования гироскопа. Такой принцип стабилизации обеспечивает необходимую стабильность выходного сигнала по смещению нуля и масштабному коэффициенту гироскопа даже в условиях изменения интенсивности оптического сигнала и изменения коэффициента усиления электронного тракта.

Изменение амплитуды сигналов вращения и рассогласования может вызываться вибрационными нагрузками (колебаниями катушки, как целого), воздействиями стороннего акустического шума, радиационной деградацией оптических компонентов, воздействием изменений температуры окружающей среды. Коррекция характеристики ВОГ с помощью дополнительного электронного канала существенно улучшит характеристики ВОГ, в том числе и в части времени выхода на режим после включения прибора.

2. Волоконный кольцевой интерферометр ВОГ

На рис. 9 показана структурная схема ВКИ ВОГ.

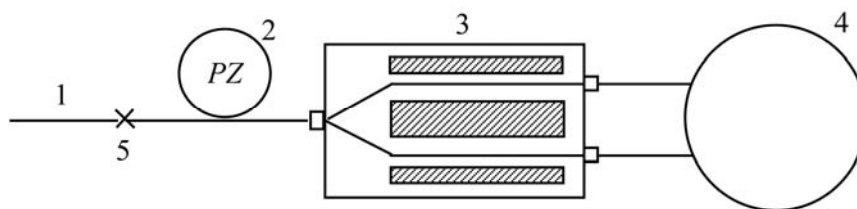


Рис. 9. Структурная схема ВКИ ВОГ: 1 – монтажное волокно (МВ), 2 – полярирующий световод (PZ-световод), 3 – интегрально-оптическая схема (ИОС), 4 – чувствительная катушка, 5 – место сварки световодов

Световод чувствительной катушки и входной полярирующий (или PZ) световод имеют большое линейное двулучепреломление, а монтажное волокно является оптически изотропным. В силу того что выходные световоды ЭВСИ, фотоприемников, циркуляторов и трехпортовых волоконных разветвителей имеют эффективный диаметр основной моды (Mode Field Diameter) $MFD \sim 10,0$ мкм, в оптической схеме ВКИ в настоящее время используются световоды с таким же MFD (кроме световода чувствительной катушки).

2.1. Световод для чувствительной катушки. Для изготовления чувствительной катушки ВОГ используется одномодовый световод типа «Панда» с большим линейным двулучепреломлением. Последнее наводится механическими напряжениями, создаваемыми нагружающими стержнями круглой формы [5].

Световод чувствительной катушки должен обладать малыми потерями оптической мощности, малыми изгибными потерями, слабой зависимостью потерь и коэффициента межмодовой поляризационной связи (h -параметра) от осевой скрутки волокна, а также большим линейным двулучепреломлением и малой осевой скруткой для снижения смещения нуля ВОГ при воздействии магнитного поля (эффект Фарадея). Всем этим требованиям отвечает световод «Панда» с W -профилем показателя преломления, описанный в [6]. Малые потери и стабильность h -параметра при изгибах волокна и его осевой скрутке достигаются в таком световоде за счет плотной упаковки основной моды в световедущей жиле. При этом MFD составляет $(0,8-0,9) \times 2R_{ж}$, где $R_{ж}$ – радиус световедущей жилы.

Реализованные на практике W -световоды «Панда» имеют германатную световедущую жилу, фтористую депрессивную оболочку, боросиликатные нагружающие стержни и внешнюю кварцевую оболочку [6]. Потери в световоде «Панда» находятся в диапазоне 0,35–0,8 дБ/км, типичное значение h -параметра $(1,0-0,5) \times 10^{-5}$ 1/м и двулучепреломление на уровне $B = (3,5-6,2) \times 10^{-4}$. Для дальнейшего улучшения характеристик световодов (снижение h -параметра, длины деполяризации и влияния магнитного поля на выходной сигнал ВОГ) необходимо увеличивать двулучепреломление.

Для устранения эффекта Шьюпа, о котором речь пойдет ниже, предполагалось использование микроструктурных световодов с воздушной световедущей жилой благодаря отсутствию у них зависимости показателя преломления материала световедущей жилы от изменений температуры [7]. Однако при исполь-

зовании этого типа световода возникли проблемы в достижении необходимой точности ВОГ из-за повышенного обратного релеевского рассеяния. Поэтому световоды «Панда» с W -профилем показателя преломления в настоящее время являются хорошими кандидатами на улучшение характеристик ВОГ.

2.2. Поляризующий световод для стыковки с ИОС. Использование на входе ИОС поляризующего, или PZ -световода, снижает поляризационную погрешность выработки угловой скорости, которая является фундаментальным ограничением характеристик любого ВКИ [3, 8]. В настоящее время на входе ИОС нами используются отрезки PZ -световодов длиной 0,5-1,0 м с коэффициентом поляризационной экстинкции (затухания одного из состояний поляризации) более 30 дБ и потерями в кольцах диаметром 60 мм не более 0,2 дБ [9, 10]. Кроме снижения поляризационных погрешностей использование PZ -световода на входе ИОС эффективно фильтрует высшие моды.

На рис. 10 показана фотография поперечного сечения PZ -световода «Панда».

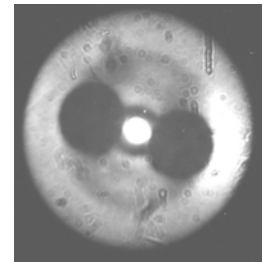


Рис. 10. Вид поперечного сечения PZ -световода на входе ИОС ВКИ

На рис. 11 показаны спектральные кривые потерь основных поляризационных мод в прямом световоде длиной 1 м и световоде изогнутом в кольца диаметром 60 мм.

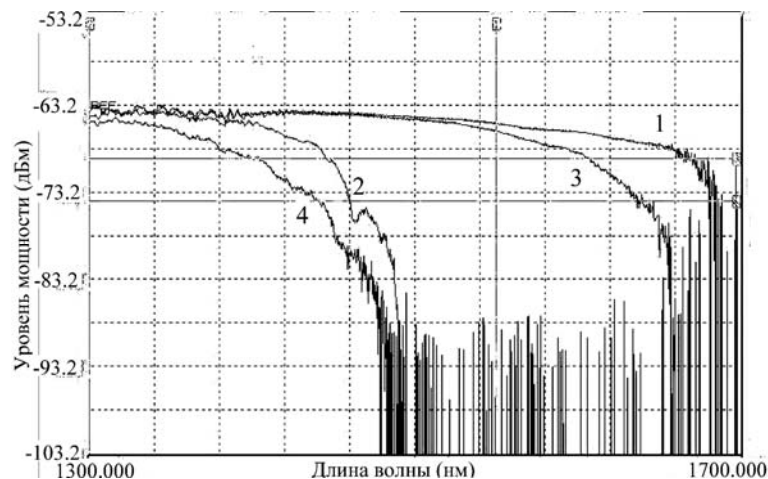


Рис. 11. Спектральные потери поляризационных мод в отрезке PZ -световода длиной 1 м, 1 (x -мода) и 2 (y -мода) – в прямом световоде, 3 (x -мода) и 4 (y -мода) – в изогнутом. Цена деления по горизонтальной шкале равна 40 нм

MFD этого световода составляет 10,0 мкм, отсечка основной x -поляризационной моды порядка 1,8 мкм, основной y -поляризационной моды около 1,4 мкм, а первой высшей x -моды – около 0,95 мкм. Таким образом, при длине волны $\sim 1,55$ мкм наблюдается однополяризационный, одномодовый режим с сильным подавлением нежелательной поляризационной y -моды (дихроизм) и первой высшей x -моды.

В дальнейшем для высокоточных гироскопов наряду с PZ -световодом на входе ИОС с MFD, равным 6-8 мкм, предполагается использование PZ -световода и в чувствительной катушке [11]. Принято считать, что использование PZ -световода в катушке ВОГ не имеет смысла [8]. Однако, как показывает наше

математическое моделирование, использование PZ -световода в чувствительной катушке в комбинации с PZ -световодом на входе ИОС в ВКИ позволяет существенно снизить поляризационную погрешность, если выполняется условие $\alpha L \gg 1$, где α – коэффициент затухания основной y -поляризационной моды в световоде катушки, а L – длина входного PZ -световода. Так, при коэффициенте поляризационной экстинкции входного PZ -световода от -30 до -60 дБ и коэффициенте экстинкции PZ -световода катушки порядка 1 дБ/м стабильность смещения нуля ВОГ, обусловленную поляризационными эффектами, можно снизить до 10^{-3} – 10^{-6} град/ч.

2.3. Монтажное волокно. В качестве монтажного волокна (МВ) используется изотропное волокно, также имеющее W -профиль показателя преломления. Оно должно обладать низкими потерями при малых радиусах изгиба, а также быть эффективным фильтром высших мод в дополнение к отрезку PZ -световода [9]. На рис. 12 приведены графики результатов расчета затухания первой высшей моды в прямом световоде типа $SMF-28$, в прямом МВ и в изогнутом МВ с диаметром изгиба 40 мм при $MFD=10,0$ мкм. Потери излучения в монтажном волокне составляют 0,25 дБ/км и не более 0,1 дБ/м при изгибе с диаметром 40 мм.

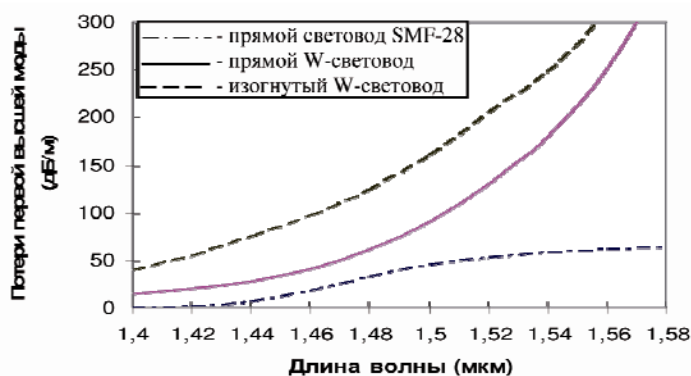


Рис. 12. Коэффициент затухания первой высшей моды в прямых отрезках световода $SMF-28$ и МВ, а также в изогнутом МВ (диаметр изгиба 40 мм). МВ имеет длину волны отсечки первой высшей моды 1,35 мкм и $MFD=10,0$ мкм

Из приведенных графиков следует, что МВ имеет приемлемые изгибные потери и хорошие фильтрующие свойства, что повышает точностные характеристики ВОГ. При использовании МВ с $MFD=6,0$ – $8,0$ мкм вместо 10,0 мкм изгибные потери резко снижаются при одновременном улучшении фильтрующих свойств.

2.4. Радиационная стойкость световода чувствительной катушки. Как отмечалось в работе [12], необходимой для космических применений радиационной стойкости можно добиться либо в W -световодах с фтористой отражающей оболочкой и чистой кварцевой световедущей жилой (нелегированной), либо в обычных двухслойных световодах с азотной жилой.

В космосе имеют место два противоположных вида радиации: фоновая, имеющая малую мощность, и импульсная. Известно [13], что в первом случае наилучшим вариантом является световод с нелегированной жилой, а во втором предпочтителен световод с примесями в жиле, например, азота. При этом азотный световод имеет приемлемые оптические потери и в условиях маломощной

фоновой радиации. По этой причине, на наш взгляд, использование в чувствительной катушке ВОГ данного вида световодов наиболее предпочтительно для космических условий эксплуатации.

Однако недостатком азотного волокна является наличие спектральной области конечной ширины с повышенными материальными потерями, имеющими максимум на длине волны 1.505 мкм. Из-за конечной спектральной ширины он частично распространяется и на рабочую длину волны 1.55 мкм. Одним из способов преодоления этого является снижение концентрации азота в световедущей жиле, что увеличит радиационную стойкость волокна в условиях фоновой космической радиации и сохранит при этом достаточную стойкость к импульсной радиации. Этого можно достичь в световоде с W -профилем показателя преломления, описанном в [6], при замене германатной жилы на азотную. На рис. 13 показано поперечное сечение изотропного образца такого W -световода со световедущей жилой, легированной азотом, и фтористой отражающей оболочкой, полученного из заготовки для световода «Панда». На рис. 14 показан график спектральных потерь этого W -световода.

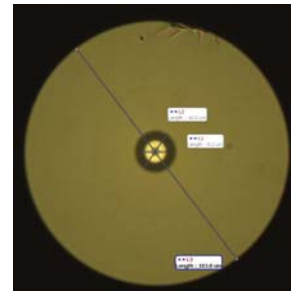


Рис. 13. Поперечное сечение световода с азотной световедущей жилой

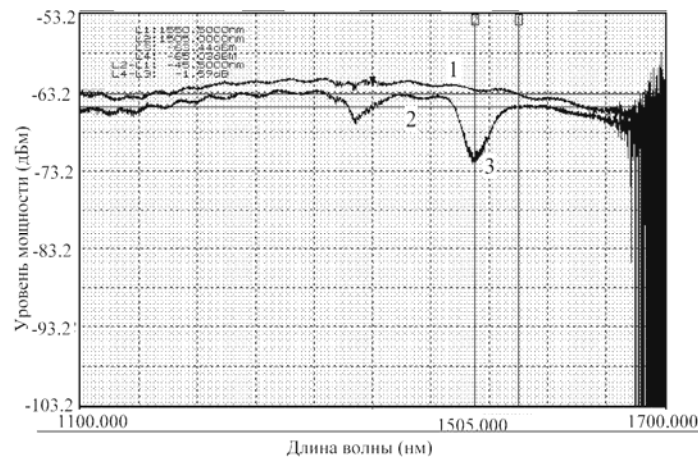


Рис. 14 Спектральные потери в азотном волокне длиной 1 м (кривая 1) и 1100 м (кривая 2), 3 – пик материального поглощения азота

Заготовка для световода «Панда» с азотной световедущей жилой изготовлена специалистами ООО «Фаберус», г. Москва [14]. Как видно из рис. 14, потери на длине волны 1,505 мкм составили 5 дБ/км. Что касается потерь на длине волны 1,55 мкм, то при возбуждении широкополосным излучением ЭВСИ они не превысили 1,0 дБ/км, несмотря на упомянутый максимум материальных потерь.

Диаметр световедущей жилы рассматриваемого азотного W -волокна равен $2r=8,2$ мкм, длина волны отсечки первой высшей моды $\lambda_c=1,36$ мкм, MFD=7,2 мкм. Последнее достаточно хорошо согласуется с параметрами излучения в канальных волноводах ИОС. Подобные заготовки пригодны для изготовления как сохраняющих поляризацию, так и поляризующих радиационно-стойких световодов для чувствительных катушек ВОГ.

Другими перспективными с точки зрения радиационной стойкости при обеспечении малых потерь на распространение (ввиду отсутствия примесей в жиле),

на наш взгляд, являются сохраняющие поляризацию (PM) и PZ-световоды «Панда» на основе заготовок со световедущей жилой из чистого кварцевого стекла. На рис. 15 приведен профиль показателя преломления в поперечном сечении заготовки.

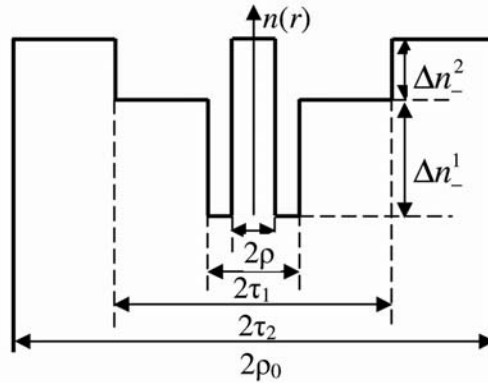


Рис. 15. Профиль показателя преломления в поперечном сечении заготовки для световода «Панда» с чистой кварцевой жилой

Заготовка имеет световедущую жилу из нелегированного кварцевого стекла (диаметр 2ρ), две фтористые депрессивные оболочки (диаметры $2\tau_1$ и $2\tau_2$) и внешнюю кварцевую оболочку (диаметр $2\rho_0$). Геометрические параметры этого профиля поясняются на рис. 15. Для малых изгибных потерь необходимо обеспечить $2\tau_1 = (1,5-2,0)\rho$, $2\tau_2 \geq 6,5\rho$. Такая трехоболочечная структура с узкой первой оболочкой [$2\tau_1 = (1,5-1,7)\rho$], как показывает моделирование, обеспечит фильтрацию высших мод, намного более эффективную, чем традиционный световод с чистой кварцевой жилой и одиночной широкой фтористой оболочкой, описанный, например, в [15]. Наконец, в структуре с двумя фтористыми оболочками можно получить заметный поляризующий эффект (дихроизм), тогда как в традиционном световоде с чистой кварцевой жилой это, на наш взгляд, практически невозможно.

3. Эффект Шьюпа

Одна из основных проблем, с которыми сталкиваются разработчики ВОГ, – это зависимость смещения выходного сигнала ВОГ от изменений температуры окружающей среды и воздействия вибрационных и акустических нагрузок. Источником паразитного смещения выходного сигнала ВОГ является возникновение невязимной разности фаз между лучами ВКИ. В общем случае величину невязимной разности фаз можно представить в виде [16]:

$$\Delta\Omega(t) = \frac{n_0}{LD} \int_0^L \Delta n(z, t) (L - 2z) dz,$$

где D – диаметр чувствительной катушки, L – длина волокна, n_0 – показатель преломления материала световода чувствительной катушки, $\Delta n(z, t)$ – изменение показателя преломления световода катушки в точке z в момент времени t . Для устранения невязимной разности фаз в ВКИ необходимо использовать специальную намотку, с тем чтобы равноудаленные от центра световода участки располагались вплотную друг к другу в одинаковых условиях. Таким образом, намотка световода на катушку должна производиться в определенной последова-

тельности с двух технологических катушек, на которые намотано по половине общей длины световода. Известны дипольная и квадрупольная намотки световода [16, 17]. Из [16] следует, что квадрупольная намотка имеет неоспоримые преимущества перед дипольной, но наиболее перспективной является намотка, предложенная в [18], будем называть ее в дальнейшем модифицированной квадрупольной намоткой. В таблице приведены результаты расчетов паразитного смещения выходного сигнала ВОГ при использовании квадрупольной и модифицированной квадрупольной намотки.

Т а б л и ц а

Вид намотки	Смещение нуля, град/ч, при радиальном нагреве со скоростью 1°С/мин	Смещение нуля, град/ч, при нагреве в осевом направлении со скоростью 1°С/мин
Квадрупольная	0,7	0,0
Модифицированная квадрупольная	0,0	0,04

Впрочем, в работе [19] отмечается, что квадрупольная намотка имеет смещение нуля при воздействии изменений температуры также и в осевом направлении.

4. Конструкция чувствительной катушки

Описанные выше специальные способы намотки минимизируют паразитные смещения выходного сигнала ВОГ, но не могут осуществить их полное устранение, поэтому предпринимаются дополнительные меры, такие как тщательная упаковка катушки, снижающая скорость изменения ее температуры и быстрое выравнивание температуры по всему ее объему.

На рис. 16 показан эскиз катушки, характеризующий общие принципы разработки ее конструкции с учетом описанных мер.

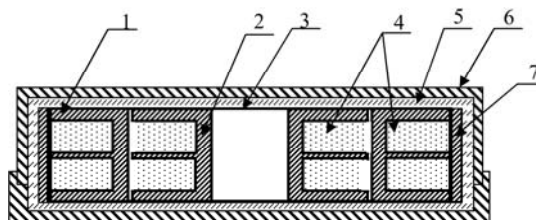


Рис. 16. Эскиз чувствительной катушки ВОГ с использованием двух несущих каркасов. 1 – несущий каркас первой катушки, 2 – несущий каркас второй катушки, 3 – слой меди, 4 – световод катушки, 5 – слой пенополиуретана, 6 – внешний защитный экран из пермаллоя, 7 – внешнее защитное кольцо

Первый (внешний) экран 6 используется для выравнивания температуры по всей поверхности катушки (сглаживание локальных источников нагрева, нарушающих симметрию потоков тепла). Экран 6 сделан из материала с достаточно большим коэффициентом теплопроводности, который задается следующим образом [20]:

$$k = \lambda / c\rho,$$

где λ , ρ и c – теплопроводность, плотность и теплоемкость материала экрана 6. Обычно используется экран из пермаллоя, который одновременно является и магнитной защитой катушки.

Слой 5 с низкой теплопроводностью, размещенный под внешним экраном, препятствует быстрому проникновению тепловых волн в катушку, замедляя скорость изменения температуры по ее объему, т.е. сам является экраном (второй экран). В качестве слоя 5 можно использовать слой пенополиуретана с его низкой теплопроводностью, высокой теплоемкостью и достаточно большой плотностью.

Следующим идет тонкий слой 3 из меди, который, как и первый экран из пермаллоя, выравнивает температуру по поверхности катушки, делая симметричными потоки тепла, проникающие в нее. Под слоем меди 3 расположена собственно чувствительная катушка.

Для минимизации погрешностей измерения угловой скорости при использовании квадрупольной намотки необходимо стремиться к увеличению размера катушки в осевом направлении для того, чтобы увеличить скорость выравнивания температуры в радиальном направлении, но это приводит к увеличению габаритных размеров ВКИ ВОГ. С этой точки зрения катушка с модифицированной квадрупольной намоткой не только вносит меньшие температурные погрешности в показания ВОГ, но и имеет преимущество в части более полного использования объема конструкции. Так как катушка с модифицированной квадрупольной намоткой не вносит погрешностей при воздействии дестабилизирующих факторов в радиальном направлении, а вносит лишь небольшие погрешности при воздействии в осевом направлении, то конструкция катушки может иметь больший размер в радиальном направлении и меньший – в осевом. Минимальный диаметр намотки световодов при сохранении всех своих характеристик составляет порядка 25 мм, и, таким образом, может быть достигнуто эффективное использование объема конструкции катушки.

За счет разбиения катушки [21] уменьшается количество наматываемых слоев в каждой катушке, чем достигается улучшение качества укладки световода. Пропиточный компаунд, наносимый на световод в процессе намотки, должен обладать высоким коэффициентом температуропроводности и низкой адгезией к защитно-упрочняющему покрытию световода катушки. Низкая адгезия к покрытию волокна и к материалу каркаса катушек нужна для эффективного подавления механических волн в объеме катушки, которые могут возбуждаться при воздействии внешних дестабилизирующих факторов. Кроме того, низкая адгезия компаунда снижает изменения показателя преломления световода из-за изменений его длины при воздействии изменений температуры. В качестве теплопроводного компаунда может использоваться силикон с высокой концентрацией в нем, например, алюминиевой пудры, которая значительно повышает коэффициент температуропроводности компаунда и его модуль Юнга. Относительно высокий модуль Юнга увеличивает устойчивость ВОГ при воздействии вибрационных нагрузок [22].

Объем чувствительной катушки представляет собой многокомпонентную среду, состоящую из кварцевой нити световода, полимерного защитно-упрочняющего покрытия и компаунда, который в свою очередь также может быть многокомпонентным. Коэффициент температуропроводности световода можно представить в виде

$$K_{\text{св}} \approx K_{\text{кв}}(1-f_{\text{кв}}) + K_{\text{зуп}}f_{\text{зуп}},$$

где $K_{\text{кв}}$, $K_{\text{зуп}}$ – коэффициенты температуропроводности кварцевой нити световода и полимерного защитно-упрочняющего покрытия, $f_{\text{кв}}$, $f_{\text{зуп}}$ – объемные доли содержания в световоде кварцевой нити и защитно-упрочняющего покрытия. Коэффициент температуропроводности компаунда на основе силикона с алюминиевой пудрой можно представить как:

$$K_{\text{к}} \approx K_{\text{с}}(1-f_{\text{с}}) + K_{\text{ап}}f_{\text{ап}},$$

где $K_{\text{с}}$, $K_{\text{ап}}$ – коэффициенты температуропроводности силикона и алюминиевой пудры, $f_{\text{с}}$, $f_{\text{ап}}$ – объемные доли силикона и алюминиевой пудры в компаунде.

Для повышения температуропроводности компаунда необходимо стремиться к минимальному содержанию силикона в его общем объеме.

Для простоты будем считать, что каждая секция световода имеет размер в осевом направлении L_1 , а в радиальном L_2 . Время релаксации тепловых волн, которое характеризует скорость выравнивания температуры по объему катушки, может быть оценено следующим образом:

$$T_p = [K\pi^2]^{-1} \times [L_1^2 L_2^2 / (L_1^2 + L_2^2)],$$

где K – коэффициент температуропроводности среды, состоящей из кварцевой нити световода, защитно-упрочняющего покрытия и компаунда. Отсюда ясно, что при неизменной площади $S = L_1 \times L_2$ поперечного сечения этой области для уменьшения T_p необходимо стремиться к наибольшей разнице между L_1 и L_2 (для модифицированной квадрупольной намотки $L_1 < L_2$). Таким образом, за счет разбиения катушки на N катушек мы получаем $2N$ секций намотки световода за счет центральной мембраны в каждой катушке, при этом получаем увеличение скорости выравнивания температуры по всему объему катушки в $4N^2$ раз, так как время релаксации зависит от площади поперечного сечения катушки. Далее, за счет выбора $L_2 > L_1$ можно еще более повысить скорость выравнивания температуры по объему катушки. И чем больше это неравенство, тем выше скорость выравнивания температуры.

Необходимо определить оптимальное содержание компаунда в общем объеме катушки. Коэффициент K температуропроводности среды зависит от соотношения объемов световода и компаунда. В этом случае справедливо соотношение

$$K \approx K_{\text{св}}(1-f_k) + K_{\text{к}}f_k,$$

где f_k – доля компаунда в общем объеме катушки. Очевидно, что минимальная доля содержания компаунда в общем объеме составляет $f_k^{\text{min}} = 0,215$.

Рассмотрим ситуацию, когда световод определенной длины наматывается, формируя тороидальную конструкцию с прямоугольным поперечным сечением, имеющим длину и ширину соответственно L_1 и L_2 . Казалось бы, доля компаунда должна быть, по возможности, большей, так как это увеличит коэффициент температуропроводности среды (уменьшит время релаксации T_p) за счет того, что компаунд имеет более высокий коэффициент температуропроводности. Однако, с другой стороны, это увеличивает размеры L_1 и L_2 , что приводит к возрастанию времени релаксации T_p . Оптимальным для доли компаунда в этом случае является условие

$$0,215 \leq f_k \leq (K_{\text{к}} - 2K_{\text{св}}) / 2(K_{\text{к}} - K_{\text{св}}).$$

На рис. 17 показан график зависимости оптимальной доли содержания компаунда в общем объеме чувствительной катушки в зависимости от коэффициента K . Например, при $K_{\text{св}}=0,11$, $K_{\text{к}}=1,9$ (силикон с алюминиевой пудрой) оптимальная доля компаунда в общем объеме катушки должна составлять $f_k = 0,47$.

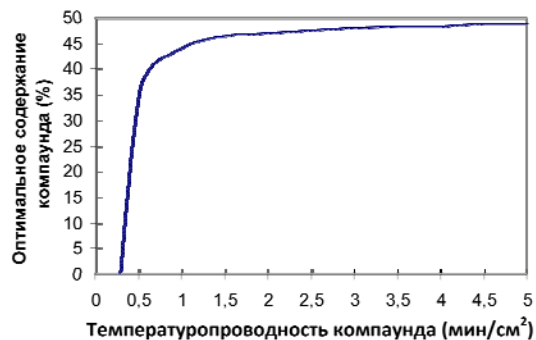


Рис. 17. Оптимальная доля компаунда в общем объеме чувствительной катушки

Увеличение этой доли компаунда в общем объеме чувствительной катушки не имеет смысла, так как скорость выравнивания температуры возрастет при этом незначительно, а габариты ВКИ станут больше, что ухудшит технические характеристики навигационных систем на базе ВОГ. Уменьшение же доли компаунда, напротив, разумно, потому что, хотя скорость выравнивания температуры снизится также незначительно, габаритные размеры ВКИ уменьшатся.

5. Зона нечувствительности

Известно, что в области малых угловых скоростей вращения объекта ВОГ имеет слабую чувствительность к измеряемой угловой скорости. Для повышения этой чувствительности используется вспомогательная фазовая модуляция [23].

Помимо этого, появление зоны нечувствительности (ЗН) даже при фазовой модуляции может быть спровоцировано несовершенством оптических и электронных компонентов. Это так называемая остаточная часть ЗН и далее под обозначением ЗН мы будем подразумевать именно ее.

Одной из причин возникновения ЗН могут быть электрические наводки [1], так как форма сигнала вращения практически совпадает с формой напряжения модуляции, подаваемого на фазовый модулятор. Дополнительная электронная модуляция, предложенная в [1], снижает ЗН примерно в 10 раз. Для ВОГ с масштабным коэффициентом ВКИ 18,95 мрад на 1 град/с среднестатистическая ЗН при использовании дополнительной модуляции изменяется в пределах 0,3-0,5 град/ч, и при дальнейшем увеличении амплитуды модуляции эта зона не устранялась.

Другим источником ЗН, на наш взгляд, может быть паразитный интерферометр Майкельсона в ИОС. Он образуется за счет обратноотраженных лучей в выходных канальных волноводах Y-разветвителя ИОС. Здесь могут иметь место обратные отражения двух видов: по всей длине волноводов ИОС и отражения от мест их стыка с волокном. Для устранения влияния второго вида отражений используется наклон (скос) торца ИОС, на котором канальные волноводы стыкуются с волокном, по отношению к боковым поверхностям ИОС. Это делает длины канальных волноводов разными, причем разность длин должна превосходить длину когерентности излучения в волноводах. В этом случае отражения от мест стыка не должны вносить никаких паразитных эффектов. Однако мы полагаем, что остаточный эффект может существовать по следующим причинам. Стыковка ИОС с волокном осуществляется за счет слоя клея конечной толщины (порядка 100 мкм) с соответствующим показателем преломления. В этом случае в местах стыка обоих волноводов ИОС с волокном имеют место отражения от двух поверхностей слоя клея – ближней и дальней по отношению к ИОС. При этом в месте стыка более длинного волновода ИОС с волокном отраженная от ближней к ИОС поверхности слоя клея волна может стать когерентной с волной, отраженной в месте стыка более короткого волновода от дальней по отношению к ИОС поверхности слоя клея. Также по всей вероятности следует принимать во внимание тот факт, что клей является относительно «мутной» средой, т.е. обладает множественными центрами рассеяния излучения, которые также вносят вклад в обратное рассеяние. В связи с этим ниже, проводя достаточно грубую оценку влияния последнего на величину ЗН, мы не будем учитывать степень когерентности ЭВСИ. Таким образом, влияние паразитного интерферометра Майкельсона в этом случае определяется коэффициентом обратных отражений $R_{обр}$. Рассмотрим данный механизм подробнее.

Величина ЗН, обусловленной интерферометром Майкельсона, для любой амплитуды фазовой модуляции Φ_m может быть определена из уравнения

$$P_0 \cdot \sin \Phi_m \sin \Delta \Psi_3 = P_0 \alpha R_{\text{обр}} (\cos \theta_m - \sin \Phi_m \sin \theta_m).$$

Здесь $\Delta \Psi_3$ – разность фаз, которая определяет ЗН ВОГ, $R_{\text{обр}}$ – коэффициент обратных отражений в ИОС, α – потери в световоде катушки и на его стыках с волноводами ИОС, θ_m – разность фаз лучей интерферометра Майкельсона. При изменении разности фаз θ_m лучей в паразитном интерферометре Майкельсона в пределах от 0 до 2π в процессе отражения и распространения по волноводам ИОС величина ЗН определяется следующим образом:

$$\Delta \Omega_3 = [\lambda c / 4\pi R L] \cdot [4\alpha R_{\text{обр}}] \text{ град/ч.}$$

Для $\alpha = 0,625$, $\Phi_m = \pi/2$ рад, МК ВКИ = 18,95 мрад на 1 град/с ЗН будет на уровне 0,47 град/ч при коэффициенте обратных отражений в ИОС $R_{\text{обр}} = -60$ дБ. Таким образом, можно предположить, что оставшаяся часть ЗН величиной 0,47 град/ч при использовании дополнительной электронной модуляции определяется паразитным интерферометром Майкельсона. Для достижения ЗН $\sim 0,001$ град/ч в этом случае необходим коэффициент обратных отражений в ИОС порядка 87 дБ, что на практике нереально.

Для подавления ЗН было предложено несколько альтернативных способов [24, 25]. В них, как правило, используются другие разновидности дополнительной электронной модуляции, которые приводят к усложнению электронной схемы обработки информации.

Для подавления влияния электрических наводок и паразитного интерферометра Майкельсона на величину ЗН нами используется напряжение вспомогательной фазовой модуляции специальной формы [26]. На рис. 18, а показана одна из возможных форм такого напряжения, которая позволяет избавиться от ЗН. Если использовать такую модуляцию, то даже в присутствии электрических наводок и паразитного интерферометра Майкельсона не возникает паразитного сигнала на частоте сигнала вращения.

На рис. 18, б показан процесс образования сигнала вращения ВОГ с открытым контуром. На рис. 18, в показано образование сигнала изменения полувольнового напряжения фазовых модуляторов ИОС (далее сигнал рассогласования), который используется для стабилизации масштабного коэффициента ВОГ (вторая петля ОС).

Для нормальной работы цифрового ВОГ с двумя контурами ОС с помощью одной и той же программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) одновременно формируются ступенчатые напряжения как фазовой модуляции, так и пилообразного напряжения, необходимого для компенсации разности фаз эффекта Саньяка. Для устранения ЗН ВОГ необходимо формирование напряжения вспомогательной модуляции со стабильными во времени параметрами. Этого можно добиться, если амплитуда сброса компенсирующей разность фаз эффекта Саньяка ступенчатой пилы отличается от 2π . Если амплитуда пилы в момент сброса отличается от 2π , то образуется импульс изменения постоянной засветки фотоприемника длительностью τ , равной времени пробега светового луча по световоду чувствительной катушки. Этот импульс дестабилизирует работу электронного блока обработки информации на достаточно длительное время.

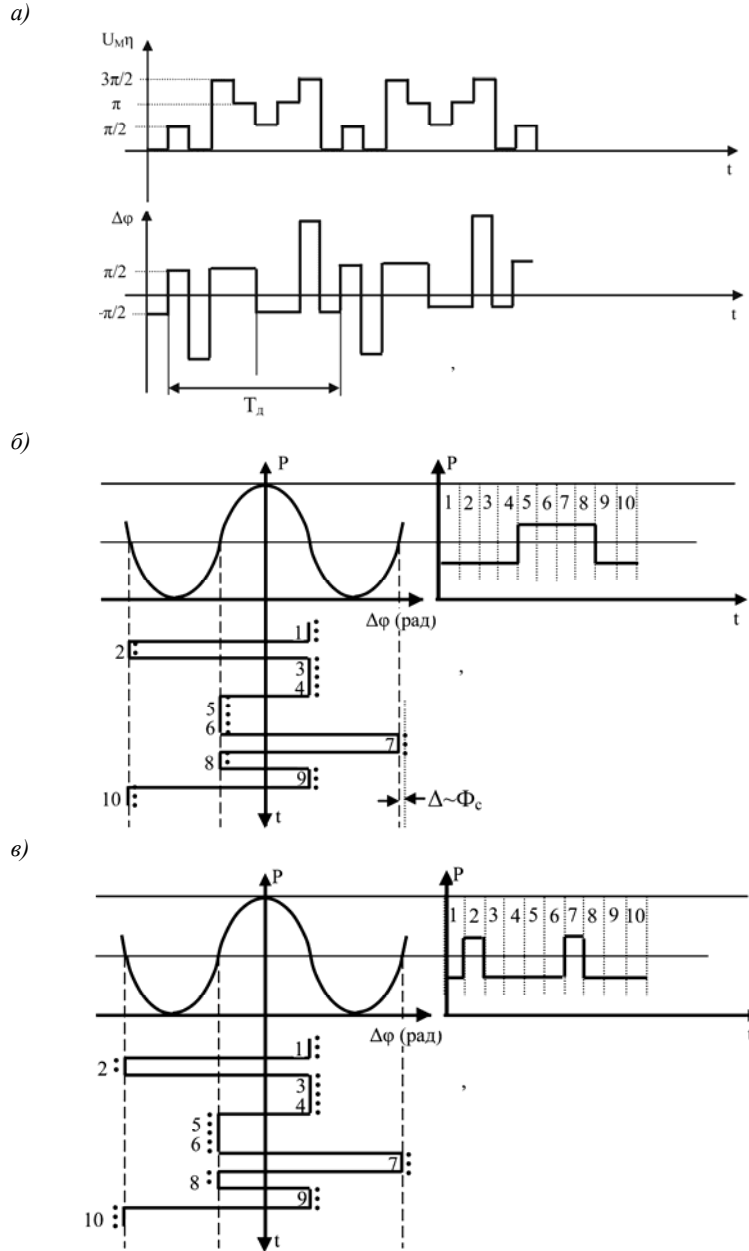


Рис. 18. Вид фазовой модуляции:

а) верхняя кривая – напряжение фазовой модуляции U_M , подаваемое на электроды фазовых модуляторов ИОС и умноженное на эффективность η фазового модулятора, нижняя кривая – закон изменения разности фаз лучей ВКИ ВОГ, период времени T_d – период детектирования сигнала вращения ВОГ; б) образование сигнала вращения; в) образование сигнала рассогласования ВОГ

Для описания мер по устранению этого паразитного эффекта рассмотрим общее выражение для мощности излучения P_ϕ на фотоприемнике

$$P_\phi = 1/2 \times P_0 \{1 + \cos\Phi_m \cos\varphi \pm \sin\Phi_m \sin\varphi\},$$

где P_0 – мощность излучения интерферирующих лучей с учетом потерь в ВКИ, Φ_m – амплитуда фазовой модуляции, φ – разность фазы эффекта Саньяка и фазового сдвига, вносимого компенсирующим пилообразным напряжением в обычном режиме компенсации, либо изменение разности фаз при сбросе задне-

го фронта. Амплитуда сброса компенсирующего ступенчатого напряжения, при которой паразитный импульс отсутствует, определяется выражением $\Phi_{сбр} = 2(\pi - \Phi_m)$.

Паразитный импульс отсутствует, если сброс пилообразного напряжения имеет место во время отрицательной полуволны компенсируемого сигнала вращения при положительной измеряемой угловой скорости, или наоборот. Другим условием отсутствия паразитного импульса при сбросе пилообразного напряжения будет следующее: $\Phi_{сбр} = 2\Phi_m$. При этом имеют место остальные возможные варианты: сброс максимальной величины пилообразного напряжения должен осуществляться во время отрицательной полуволны компенсируемого сигнала вращения при отрицательной измеряемой угловой скорости, или наоборот. При стабильной во времени фазовой модуляции с параметрами $\pm\pi/2$ и $\pm 3\pi/2$ рад (см. рис. 18, б, в) для предотвращения паразитных оптических импульсов на фотоприемнике пилообразное напряжение в момент его сброса должно вносить разность фаз, равную π . При этом сброс заднего фронта пилообразного напряжения может производиться в любой момент времени. Для формирования пилообразного напряжения с амплитудой π используется напряжение с поочередно нарастающими и убывающими фронтами [21], но с амплитудой $\pi/2$. При смене подключения электродов в моменты минимального и максимального напряжения пилообразного напряжения она эквивалентна обычному ступенчатому пилообразному напряжению только с нарастающими или убывающими фронтами, амплитуда которого теперь уже равна π .

На рис. 19 приведен график измерения угловой скорости объекта в районе нулевых угловых скоростей с помощью ВОГ, в котором использовалась стабильная во времени фазовая модуляция с амплитудой $3/4$ и $5/4\pi$ и амплитудой компенсирующего пилообразного напряжения $\pi/2$.

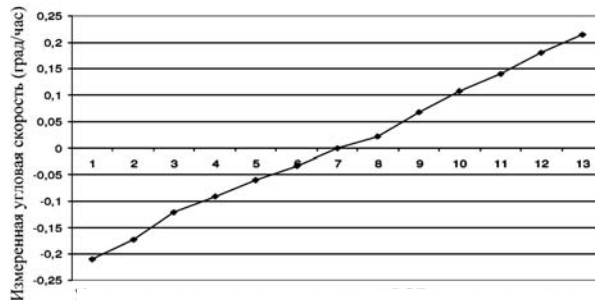


Рис. 19. Выходная характеристика ВОГ при малых измеряемых угловых скоростях.

Горизонтальная – угловое положение оси чувствительности ВОГ в плоскости горизонта, отмеченное номерами, соответствующими диапазону измеряемых угловых скоростей $\pm 0,25$ град/ч (от точки 1 до точки 13)

В рассматриваемом эксперименте измеряемая угловая скорость задавалась в диапазоне $\pm 0,25$ град/ч с помощью изменения углового положения оси чувствительности ВОГ в плоскости горизонта с необходимой точностью. В каждом из этих угловых положений в течение 10 мин производилась запись выходного сигнала ВОГ и определялось среднее значение угловой скорости, которое и наносилось на график. Отсутствие ЗН дополнительно контролировалось также и по уровню спектральной плотности шума при каждом измерении. В случае существования ЗН шум выходного сигнала ВОГ должен полностью отсутствовать, но при проведении эксперимента выходной сигнал имел постоянную спектральную плотность шума.

6. Глубина вспомогательной фазовой модуляции

В ВОГ используется вспомогательная фазовая модуляция с амплитудами $(\pi \pm \Delta)$, где $\Delta = \pi/2^n$, $n=1,2,3...$ Амплитуда вспомогательной модуляции играет очень важную роль в достижении предельных характеристик ВОГ. Анализ по-

казывает, что для снижения шумов [27], подавления паразитного сигнала рассогласования (стабильность масштабного коэффициента), обусловленного паразитной модуляцией интенсивности в ИОС [28], а также для уменьшения смещения нуля, вызванного изменениями постоянной составляющей оптической мощности на фотоприемнике, необходимо снижать эту постоянную составляющую настолько насколько возможно. Шумовые характеристики и погрешности ВОГ, обусловленные паразитной модуляцией интенсивности лучей ИОС и нестабильностью мощности на фотоприемнике, снижаются пропорционально величине $\text{ctg}(\Phi_m/2)$. В зависимости от точности ВОГ в разработках используется вспомогательная фазовая модуляция с амплитудами $\Phi_m = [(2^n \pm 1)/2^n] \times \pi$, где $n = (1-4)$. При использовании, например, $\Delta = \pi/8$ оптические шумы и стабильность масштабного коэффициента, определяемая паразитной модуляцией интенсивности лучей в канальных волноводах ИОС, могут быть улучшены не менее чем в 5 раз.

Авторы выражают благодарность за участие в проведении экспериментальных работ сотрудникам филиала ФГУП «ЦЭНКИ» «НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова» О.К. Борисову, А.В. Собчакову, Н.Н. Чанову.

Заключение

Рассмотрены пути повышения точности волоконно-оптических гироскопов. Повышение точности связано с улучшением характеристик оптических компонентов волоконного кольцевого интерферометра ВОГ. Предложены способы улучшения характеристик эрбиевых волоконных источников, а также новые конструкции радиационно-стойкого оптического волокна для чувствительной катушки, поляризующего оптического волокна для стыковки с интегрально-оптической схемой ВОГ, монтажного волокна с повышенным эффектом фильтрации высших мод. Рассмотрены пути устранения паразитного смещения нуля гироскопа из-за тепловых эффектов за счет оптимизации конструкции чувствительной катушки. Предложен способ устранения зоны нечувствительности ВОГ за счет нового метода фазовой модуляции лучей кольцевого интерферометра ВОГ. Показано, что повышение точности ВОГ связано также и с увеличением амплитуды вспомогательной фазовой модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pavlath, G. A.** Closed-loop fiber optic gyros // Proc. SPIE. 1996. v. 2837. p. 46.
2. **Wysocki, P. F., Digonnet, M.J.F., Kim, B.Y., Shaw H.J.** Characteristics of erbium-doped super-fluorescent fiber sources for interferometric sensor applications // Journal of Lightwave Technology. 1994. v. LT-12. № 1. p. 550.
3. **Burns W. K., Chin-Lin Chen, Moeller R.** Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources // Journal of Lightwave Technology. 1983. v. LT-1. № 1. p. 98.
4. **Ningfang Song, Chunxi Zhang, Xinzhen Du.** Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope // Proc. of SPIE. 2002. v. 4920. p. 115.
5. **Noda J., Okamoto K., Sasaki Y.** Polarization-maintaining fibers and their applications // Journal of Lightwave Technology. 1986. v. LT-4. № 8. p. 1071.
6. **Курбатов, А.М.** Новый оптический W-световод Panda для чувствительной катушки волоконно-оптического гироскопа / А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов // Письма в ЖТФ. 2010. v. 36. вып. 17. стр. 23.
7. **Dangui, V., Kim, H., Digonnet, M., Kino, G.** Phase sensitivity to temperature of the fundamental mode in air-guiding photonic-bandgap fibers // Optics Express. 2005. Vol. 13. P. 6669-6684.
8. **Андропова, И. А.** Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка / И. А. Андропова, Г. Б. Малыкин // УФН. 2002. т. 172. № 8. стр. 849.

9. Курбатов, А.М. Одномодовый волоконный световод для поляризационного модового фильтра // Патент РФ № 2040493, заявка № 4529325, зарегистрирован 25.07.1995, приоритет изобретения 9.04.1990.
10. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Волоконный поляризатор на основе W-световода Panda // Письма в ЖТФ. 2011. v. 37. вып. 13. стр. 70.
11. Курбатов, А.М. Снижение поляризационных ошибок в волоконном кольцевом интерферометре с помощью поляризующих световодов / А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов // Письма в ЖТФ. 2011. v. 37. вып. 9. стр. 14.
12. Томашук, А.Л. Разработка волоконных световодов для применения при повышенном уровне радиации / А.Л. Томашук, К.М. Голант, М.О. Забейайлов // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. 2001. № 4. стр. 52-65.
13. Girard, S., Keurink, J., Boukenter, A., Meunier, J.-P., Ouerdane, Y., Azaïs, B., Charre, P., Vié, M. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica-core optical fibers // Nucl. Instr. and Methods of Physics Research B, 215, pp. 187-195, 2004.
14. <http://www.fiberus.ru/aboutr.php>
15. Dianov, E.M., Golant K.M., Khrapko, R. R., Mashinsky, Neustruev, V.B., Guryanov, A.N., Gusovsky, D.D., Miroshnichenko, S.I., Sazhin, O.D. Radiation resistance of optical fibers with fluorine-doped silica cladding // Proc. SPIE. 1994. v. 2425, pp. 58-62.
16. Mohr F. Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers // Journal of Lightwave Technology. 1996. v. LT-14. № 1. p. 27.
17. Frigo, N. J. Compensation of linear sources of nonreciprocity in Sagnac interferometers // Proc. SPIE. v. 412. 1983. p. 268.
18. Malvern A. Optical fiber gyroscope sensing coil having a reduced sensitivity to temperature variations occurring therein // US Patent № 5,465,150. November. 1995.
19. Sawyer, J., Ruffin, P., Sung, C. Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils, part 2 // Opt. Eng. 1997. v. 36. p. 29.
20. Лыков, А.В. Теория теплопроводности, Москва, Высшая школа, 1967.
21. Курбатов А.М. Способ намотки чувствительной катушки волоконно-оптического гироскопа // Патент РФ № 2295112 от 10.03.2007 г.
22. Cordova, A., Surabian, G. Potted Fiber optic gyro sensor coil for stringent vibration and thermal environments // 1996. US Pat. № 5,546,482.
23. Lefevre, H. C. Fundamentals of interferometric fiber optic gyroscope // Proc. SPIE. 1996. v. 2837 p. 2.
24. Chung Jen-Chen. Interferometric fiber optic gyroscope dead band suppression // Applied Physics Express. 2008. №7, 072501-1.
25. Sanders, D, Dankwort, R., Strandjort, L., Bergh, R. Fiber optic gyroscope with dead band error reduction // 1999. US Patent № 5,999,304.
26. Курбатов, А. М. Способ компенсации разности фаз Саньяка в кольцевом интерферометре волоконно-оптического гироскопа // Патент РФ № 2146807, приоритет от 02.03.1998 г.
27. Pavlath, G.A. Method for reducing random walk in fiberoptic gyroscopes // 1996 US Patent № 5,530,545.
28. Курбатов, А. М. Способ обработки информации волоконно-оптического гироскопа // Патент РФ № 2160886. Приоритет от 02.11.1999 г.

Abstract. A basic problems limiting FOG accuracy are considered and a principal ways of their elimination are presented. A most probable mechanism of initial zero bias drift due to device warm up and under external destabilizing factors is described. Also presented a single mode fibers constructions for fiber ring interferometer components, a new single mode sensing coil fibers for their radiation resistance problem solution and a construction of sensing coil itself for its temperature sensitivity suppression is also presented. Finally, a new way is described of electronic signal processing solving the dead zone problem.

Key words: fiber-optic gyros, interferometer, accuracy, phase modulation, bandwidth

Материал поступил 25.07.11