

Д. А. ЕГОРОВ, Р. О. ОЛЕХНОВИЧ, А. А. УНТИЛОВ, А. С. АЛЕЙНИК, Г. Б. ДЕЙНЕКА,
В. Е. СТРИГАЛЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Рассматриваются вопросы, связанные с проблемой наличия зоны нечувствительности у интерферометрических волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) компенсационного типа. Анализируются причины возникновения зоны нечувствительности у ВОГ. Приводятся методики испытаний по выявлению и оценке величины зоны нечувствительности и способы борьбы с ней.

Излагаются данные о величине зоны нечувствительности ВОГ разработки различных фирм, как российских («Оптолинк», Пермская НППК, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), так и зарубежных (Honeywell, IXSEA).

Введение

Последние три десятилетия в мире все больше внимания уделяется интерферометрическим волоконно-оптическим гироскопам (ВОГ) как альтернативе гироскопам с вращающейся массой. Из-за отсутствия движущихся частей ВОГ обладают потенциально высокой надежностью и малыми габаритами. В настоящее время в области разработки и изготовления ВОГ достигнут значительный прогресс, что способствует их повсеместному применению для задач навигации и стабилизации. Такие характеристики ВОГ, как стабильность смещения нуля и линейность масштабного коэффициента, являются наиболее важными при построении на их базе инерциальных измерительных модулей. Широко известным фактом является наличие зоны нечувствительности у лазерных гироскопов [1, 2], однако она существует и у ВОГ компенсационного типа. Это сдерживает широкое применение инерциальных измерительных модулей, построенных на базе ВОГ компенсационного типа, в задачах, где требуется высокая чувствительность к малой угловой скорости. Примером таких применений могут служить гиротеодолиты, навигационные модули космических аппаратов и подводных лодок, поэтому требуется тщательное исследование нелинейности выходной характеристики ВОГ компенсационного типа, в том числе зоны нечувствительности в области малых угловых скоростей.

Алейник Артем Сергеевич. Аспирант Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУИТМО).

Дейнека Геннадий Борисович. Кандидат физико-математических наук, доцент СПбГУИТМО.

Егоров Дмитрий Александрович. Инженер 1 категории ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Олехнович Роман Олегович. Кандидат технических наук, ведущий инженер ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Стригалев Владимир Евгеньевич. Кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета.

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член молодежной секции Академии навигации и управления движением.

1. Зона нечувствительности ВОГ и причины ее возникновения

Зона нечувствительности существует у цифровых ВОГ компенсационного типа, обработка выходного сигнала которых построена по схеме с замкнутой петлей обратной связи [3]. Такая схема построения позволяет обеспечить высокую линейность выходной характеристики, увеличить стабильность показаний и расширить диапазон измеряемых ВОГ угловых скоростей. В данной схеме сигнал обратной связи подается на фазовый модулятор с целью компенсации сдвига фаз Саньяка, вызванного угловой скоростью вращения объекта.

При этом в ВОГ компенсационного типа существует эффект, приводящий к искажениям масштабного коэффициента и резкому падению чувствительности до нулевого значения при угловых скоростях, близких к нулю. Показания ВОГ при этом также принимают нулевое значение. Данный эффект в литературе известен также, как зона нечувствительности, мертвая зона или область неустойчивости [4–15].

Применительно к навигационным системам, созданным на базе ВОГ, если его зона нечувствительности попадает в область измеряемых угловых скоростей при гироскопировании, то появляется ошибка гироскопирования [5].

На рис. 1 представлена типичная зона нечувствительности, которая состоит из области с нулевой чувствительностью в виде горизонтального участка и двух пограничных областей, где выходная характеристика ВОГ асимптотически возвращается к линейной.

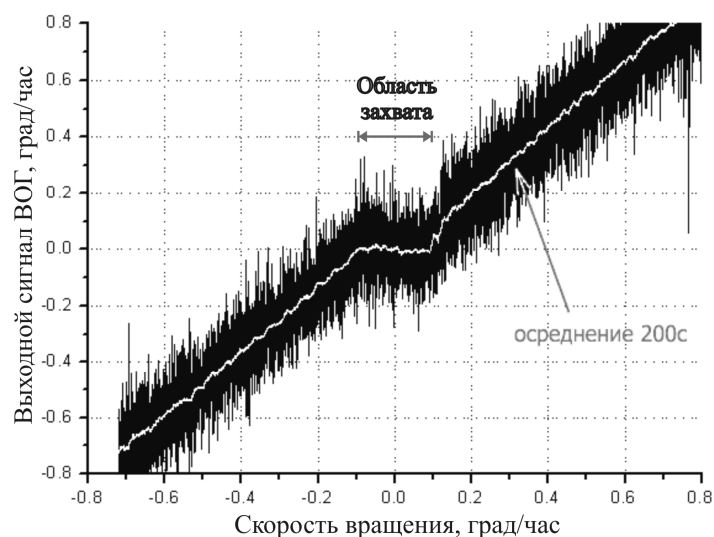


Рис. 1. Типовая выходная характеристика ВОГ компенсационного типа в области малых угловых скоростей вращения

В ВОГ компенсационного типа схема обработки сигнала измеряет величину фазового сдвига и стремится скомпенсировать его до нулевого значения с помощью фазовой модуляции. Если суммарный измеряемый фазовый сдвиг содержит компоненту, зависящую от сигнала обратной связи и большую по величине, чем компонента, пропорциональная угловой скорости, возникает «захват» сигнала обратной связи и соответственно в выходном сигнале ВОГ возникает зона нечувствительности [3].

Существует несколько причин, вызывающих появление зоны нечувствительности. В зависимости от источника их можно условно разделить на две группы:

- *электрические* – это перекрестные связи в электрической схеме между схемой формирования модулирующего напряжения обратной связи и фотоприемным устройством, а также входом аналого-цифрового преобразователя, плюс наличие нелинейности цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и электрооптического модулятора [8, 16];
- *оптические* – это влияние паразитного интерферометра, создаваемого обратными отражениями и обратным рассеянием, а также поляризационные погрешности в оптической схеме [15].

Степень влияния приведенных факторов на зону нечувствительности определяется конструкцией ВОГ, качеством сборки, параметрами его оптической и электрической схем.

Главной задачей при исследовании причин, вызывающих появление зоны нечувствительности ВОГ, является идентификация фактора, оказывающего наибольшее влияние. Исследования показали, что в ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор» [15, 17, 18] наибольшее влияние на возникновение зоны нечувствительности оказывает наводка модулирующего напряжения на фотоприемное устройство. Вторым по значимости фактором является влияние сигнала паразитного интерферометра. Остальные факторы в данном ВОГ обнаружены не были, поэтому в статье они не рассматриваются.

Зона нечувствительности может быть вызвана действием электрической наводки модулирующего напряжения на выходной сигнал фотоприемного устройства (рис. 2).

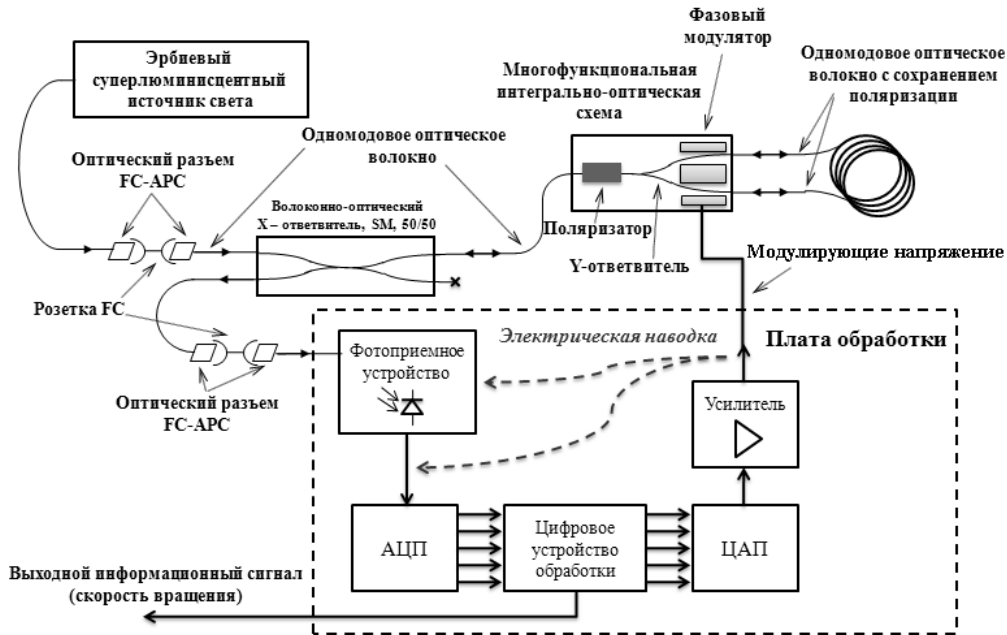


Рис. 2. Структурная схема ВОГ компенсационного типа

Электрический сигнал модулирующего напряжения наводится на схему фотоприемного устройства, а также непосредственно на измерительный вход

АЦП. В итоге происходит суммирование наведенного сигнала с сигналом интерферометра. Это приводит к появлению паразитной обратной связи и, как следствие, к «захвату» сигнала ВОГ при низких скоростях вращения, когда сигнал на выходе интерферометра становится сравнимым с сигналом наводки или меньше его.

Данное предположение было смоделировано, результаты моделирования показали практически пропорциональную зависимость между величиной наводки и напряжением модулятора. Для проверки предположения были проведены испытания, результаты которых представлены на рис. 3.

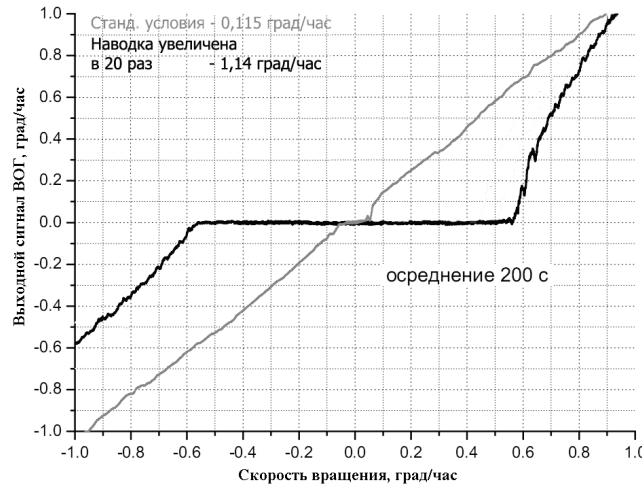


Рис. 3. Влияние величины наводки на зону нечувствительности

В ВОГ была измерена зона нечувствительности в штатном для гироскопа режиме. Она составила 0,115 град/ч. Величина электрической наводки схемы формирования модулирующего напряжения на схему фотоприемного устройства при этом составляла ~ 83 дБ. Затем величина наводки была специально увеличена приблизительно в 20 раз, и измерения проведены повторно. Зона нечувствительности при этом увеличилась в 10 раз – до 1,14 град/ч. Таким образом, экспериментально было получено подтверждение влияния наводки на зону нечувствительности.

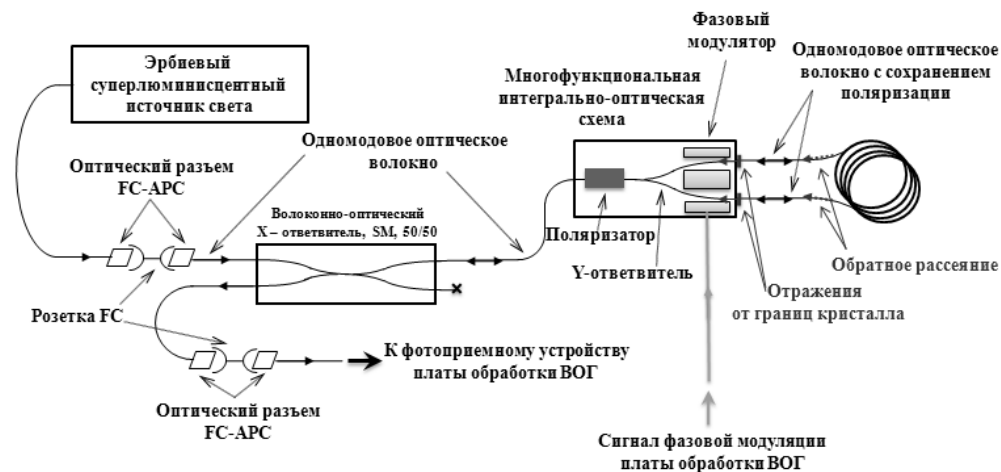


Рис. 4. Минимальная оптическая схема ВОГ с обратной связью

Следующим по величине вкладом в возникновение зоны нечувствительности ВОГ является влияние паразитного интерферометра. На рис. 4 приведена минимальная оптическая схема ВОГ с обратной связью. На данном рисунке показаны места отражения и направление распространения отраженного и рассеянного оптического излучения, которое приводит к возникновению паразитного интерферометра Майкельсона [3]. Сигнал этого интерферометра, зависящий от величины напряжения, подаваемого на модулятор, суммируется с сигналом интерферометра Саньяка. Это приводит к появлению дополнительной ошибки измерения фазы. При низких скоростях вращения отклик интерферометра Саньяка становится сравнимым или меньшим вклада паразитного интерферометра, сигнал обратной связи «захватывается» паразитным интерферометром.

Для проверки этого факта было проведено моделирование влияния паразитного интерферометра на выходной сигнал ВОГ. В модель ВОГ был внесен сигнал, создаваемый паразитным интерферометром, который зависит косинусоидально от модулирующего напряжения:

$$S_{Pr} = S + P_r \cdot \cos\left(\frac{U_m}{P_{trans}}\right),$$

где S – сигнал интерферометра Саньяка; S_{Pr} – суммарный интерференционный сигнал; P_r – коэффициент влияния паразитного интерферометра в децибелах; U_m – напряжение, подаваемое на модулятор; P_{trans} – коэффициент пересчета напряжения модулятора в фазу.

Величина вклада паразитного интерферометра в общий оптический сигнал задавалась специальным коэффициентом в децибелах относительно сигнала интерферометра Саньяка. В результате был смоделирован переход сигнала через «ноль» в диапазоне угловых скоростей от 0,5 до –0,5 град/ч, с величиной влияния паразитного интерферометра в минус 55 дБ, ширина зоны нечувствительности при этом составила 0,20 град/ч. Таким образом, было подтверждено, что паразитный интерферометр также может приводить к возникновению зоны нечувствительности.

2. Способы борьбы с зоной нечувствительности

Наиболее очевидным способом борьбы с зоной нечувствительности является устранение причин, вызывающих ее появление. Однако это связано с рядом трудностей, упирающихся в конечном итоге в используемые при производстве технологии. Проанализировав указанные причины, можно сформулировать следующие пути решения проблемы:

- улучшение электромагнитной изоляции между фотоприемным устройством и схемой формирования сигнала фазовой модуляции (экранирование, введение потенциальной развязки электрических цепей, использование дифференциальной схемы измерений);
- уменьшение влияния паразитного интерферометра (снижение обратных отражений, уменьшение длины когерентности источника света);
- улучшение качества стыковки оптических элементов ВОГ (увеличение точности выставки оптических осей);
- введение дополнительной модуляции для подавления зоны нечувствительности.

Существует множество патентов и публикаций, посвященных подавлению

зоны нечувствительности без устранения причин, ее вызывающих, – путем введения дополнительной фазовой модуляции [4–6, 8, 19–29]. Основная идея всех предлагаемых методов заключается в том, чтобы не давать абсолютному значению фазы оставаться на постоянном уровне, который возникает при низких скоростях вращения, когда компенсируемая обратной связью разность фаз Саньяка соответствует очень малым приращениям фазы (на рис. 5 показана как « $-\phi_s$ »).

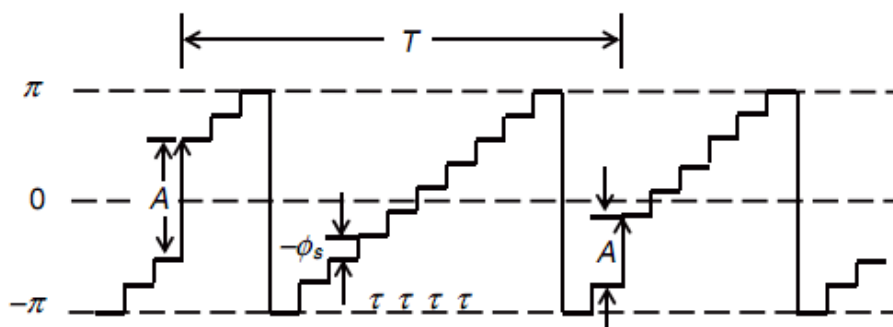


Рис. 5. Дополнительная случайная фазовая модуляция (один из вариантов)

В статьях и патентах [4, 19–23, 27–29] к сигналу обратной связи добавляется меняющийся случайным образом ступенчатый фазовый скачок «А». Скачок добавляется с периодом (один раз в две секунды), значительно меньшим, чем время, за которое значение фазы, генерируемое обратной связью, могло бы блокироваться на некоем постоянном уровне и привести к потере чувствительности к угловой скорости. Зашумленный произвольными фазовыми скачками ступенчатый модулирующий сигнал постоянно смещается, что предотвращает его «залипание» на постоянном уровне. Это приводит к равномерному распределению модулирующего напряжения по всему рабочему диапазону модулятора. Погрешность определения угловой скорости в пределах всего диапазона действия обратной связи при этом усредняется до пренебрежимо малых, близких к нулю значений. Сигнал фотодетектора, связанный с реакцией на ступенчатую добавку к напряжению, просто исключается в процессе демодуляции. Существуют и другие принципиально похожие способы введения дополнительной фазовой модуляции [5, 24–26], которые в настоящей статье подробно не рассматриваются. Можно отметить, в частности, метод добавления к сигналу обратной связи дополнительного треугольного импульсного сигнала [5].

3. Методика измерения зоны нечувствительности

Методика измерения зоны нечувствительности заключается в использовании в качестве эталона угловой скорости вращения Земли (ее проекции на ось чувствительности ВОГ). В ЦНИИ «Электроприбор» для этих целей был использован трехосный имитатор движения Acutronic AC3367-ТСС [30] (рис. 6), на поворотный стол которого устанавливался исследуемый ВОГ. Имитатор обеспечивает точность задания угловой скорости вращения на уровне не хуже 0,00001 град/с, стабильность скорости вращения не хуже 0,05% с учетом паразитных угловых модуляций следящих систем стенда.

Для того чтобы сигнал угловой скорости, измеряемый ВОГ, был близок к

нулевому, его ось чувствительности устанавливалась в плоскости горизонта в направлении «Восток–Запад» (но с отклонением примерно в 1-2° от указанного направления). Затем поворотный стол в горизонтальной плоскости вращал ВОГ со скоростью порядка 0,0001-0,0002 град/с таким образом, чтобы пройти через восточное или западное направление, так как в направлении оси «Восток–Запад» горизонтальная составляющая скорости вращения Земли равна нулю. Подобная методика описана также в работах [4, 5, 8].

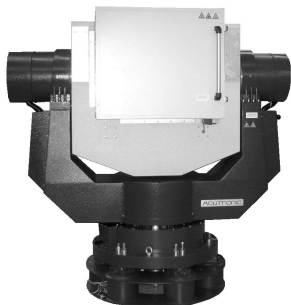


Рис. 6. Общий вид трехосного имитатора движения АС3367-ТСС

Другой метод, используемый в случае очень малой зоны нечувствительности, может быть реализован также на ручной делительной головке, имеющей достаточную разрешающую способность. Метод заключается не в непрерывном медленном вращении поворотного стола с ВОГ, а в повороте оси чувствительности гироскопа с шагом 0,001-0,002° и выдержке в каждом положении порядка 1 ч [4]. Затем угол поворота стола пересчитывается в величину проекции скорости вращения Земли на ось чувствительности ВОГ

$$\Omega' = \Omega_{3z} \cdot \sin(\Delta\varphi),$$

где Ω' – проекция скорости вращения Земли на ось чувствительности ВОГ при отклонении от направления «Восток – Запад» на угол $\Delta\varphi$; Ω_{3z} – горизонтальная составляющая проекции скорости вращения Земли (максимальное значение – 7,52 град/ч в направлении «Север – Юг» на широте 60°).

По полученным данным строится график зависимости выходного сигнала ВОГ от заданной скорости, и по графику определяется ширина зоны нечувствительности. Для повышения точности описанное измерение нужно повторить при нескольких включениях ВОГ и затем взять среднее значение.

4. Зона нечувствительности ВОГ российских компаний

С зоной нечувствительности ВОГ компенсационного типа сталкивалось большинство компаний-разработчиков. Ниже приведены данные о величине зоны нечувствительности различных ВОГ. Данные приводятся по открытым публикациям и по результатам экспериментальной проверки ВОГ, имеющихся в распоряжении авторов статьи.

При проведении испытаний приборов Пермской научно производственной приборостроительной компании ДГТКУ-1 и ДГТКУ-2 на углах курса от 0 до 360° была обнаружена зона пропадания сигнала волоконно-оптических гироскопов ДУС-500 и БВОГ 120/3 [5, 31]. Определение этой зоны проводилось на наклонно-поворотном столе Acutronic. Ось чувствительности ВОГ выставляли в направлении «Восток–Запад» и разворачивали по курсу с постоянной угловой скоростью 2,5 град/ч на углы $\pm 10^\circ$. Общий вид прибора БВОГ 120/3 представлен на рис.7, а выходной сигнал БВОГ 120/3 по одному из каналов в зависимости от угла разворота по курсу – на рис.8 [5].

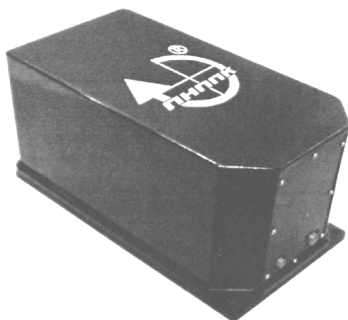


Рис. 7. Общий вид прибора БВОГ 120/3

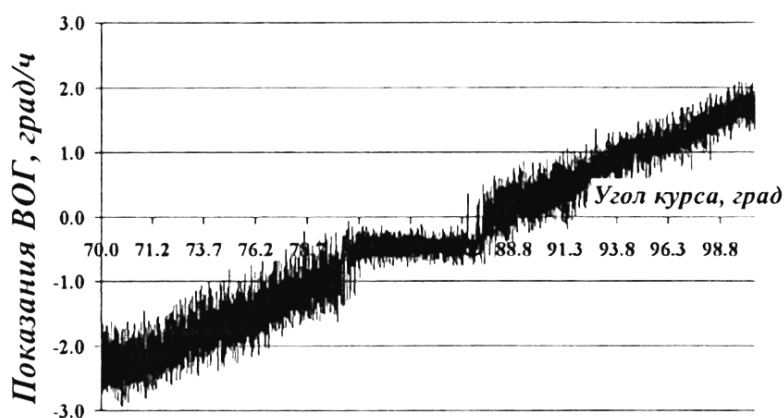


Рис. 8. Выходной сигнал ВОГ с зоной нечувствительности до внесения изменений

Из графика на рис. 8 следует, что в этом канале БВОГ 120/3 имеет зону пропадания сигнала в районе курсовых углов $81,23\text{--}86,24^\circ$ шириной около 5° . Необходимо отметить, что в данном случае зона нечувствительности смещена относительно положения оси чувствительности ВОГ примерно на 6° . Если пересчитать величину зоны в величину потерянного приращения угловой скорости, то эта величина составит $0,65$ град/ч.

По мнению авторов статьи [5], возможная причина наличия зоны пропадания сигнала может быть заключена в следующем. Интенсивность засветки фотоприемника ВОГ имеет косинусоидальный характер в зависимости от разности фаз прямого и обратного хода оптических лучей. Рабочие точки этой зависимости выбираются с помощью подачи двух пачек прямоугольных импульсов разной амплитуды. Компенсационный сигнал обратной связи реализуется подачей пилообразных импульсов, величина наклона пилы которых является мерой угловой скорости.

В зоне малых угловых скоростей, а следовательно, малых углов наклона пилообразных импульсов, аппаратные и программные средства канала обратной связи ВОГ не обеспечивают регулирование их угла наклона. Это приводит к тому, что в некотором диапазоне малых угловых скоростей БВОГ 120/3 выдает постоянный сигнал, что соответствует потере приращения угловой скорости в этом диапазоне. Если эта зона попадает в область рабочих углов при гироскопировании, то появляется ошибка гироскопирования.

Специалистам компании ПНППК удалось уменьшить ширину зоны пропадания сигнала введением регулировки электроники каналов обратной связи БВОГ 120/3, заключающейся в подборе амплитуды дополнительного треугольного импульсного сигнала. После регулировки ширина зоны пропадания сигнала уменьшилась в 5 раз [5]. Уменьшение ширины зоны пропадания сигнала продемонстрировано на рис. 9. Из графика видно, что ширина зоны нечувствительности составляет примерно 1° , а величина потерянного приращения угловой скорости – около $0,1$ град/ч.

Волоконно-оптические гироскопы компании «Оптолинк» [32] испытывались в ЦНИИ «Электроприбор» на наличие зоны нечувствительности в 2009 г. Публикаций, касающихся данной проблемы применительно к ВОГ компании «Оптолинк» по состоянию на декабрь 2010 г., не было.



Рис. 9. Выходной сигнал ВОГ после доработки

На рис. 10 представлен общий вид ВОГ ОИУС-1000 (ПНСК40-018), а на рис. 11 – результаты проверки этого ВОГ на наличие зоны нечувствительности. Показаны осредненный за 200 с скользящим средним сигнал ВОГ и аппроксимирующая линия.



Рис. 10. Общий вид ВОГ ОИУС-1000

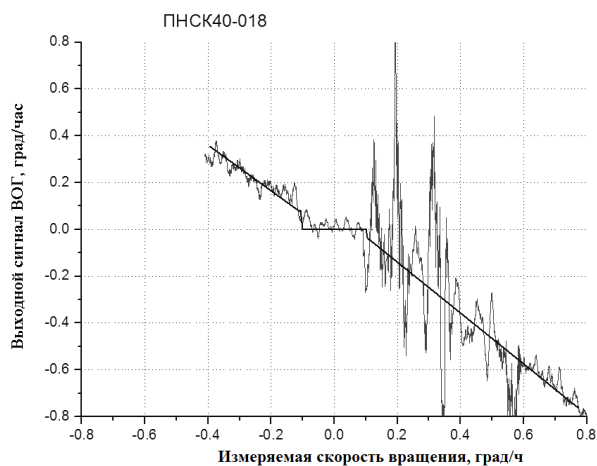


Рис. 11. Зона нечувствительности ВОГ ОИУС-1000

Из графика рис. 11 видно, что ширина зоны нечувствительности по угловой скорости в пересчете на горизонтальную составляющую угловой скорости Земли составляет 0,20 град/ч, т.е. $\pm 0,10$ град/ч от нулевого значения.

5. Зона нечувствительности ВОГ зарубежных компаний

В ЦНИИ «Электроприбор» в 2009 г. также был протестирован на наличие зоны нечувствительности инерциальный измерительный модуль IMU-120 фирмы IXSEA [33]. Методика измерений и оборудование использовались те же, что и в случае с ВОГ компании «Оптолинк».

Данные по всем трем ВОГ этого модуля оказались практически одинаковыми, поэтому здесь (рис. 12) приводится вид выходной характеристики только одного из ВОГ. Данные приведены для осреднений сигнала за 1 с и за 200 с (на графике – светлым цветом).

Из графика рис. 12 видно, что ВОГ IXSEA не имеют явно выраженной зоны нечувствительности по угловой скорости в пределах точности измерений.

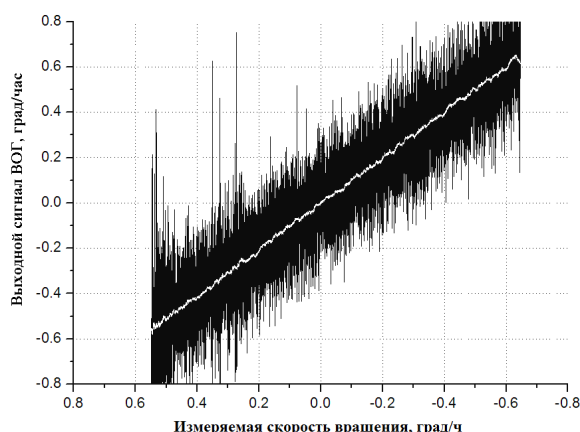


Рис. 12. Вид выходного сигнала ВОГ компании IXSEA. Зона нечувствительности не прослеживается

ВОГ фирмы Honeywell изначально также имели зону нечувствительности величиной порядка 0,04 град/ч [4] (рис. 13). После проведенных специалистами фирмы Honeywell мероприятий [4, 6] по подавлению зоны нечувствительности она уже не обнаруживалась вплоть до 0,001 град/ч. На рис. 14 показаны результаты с применением модуляционной схемы подавления.

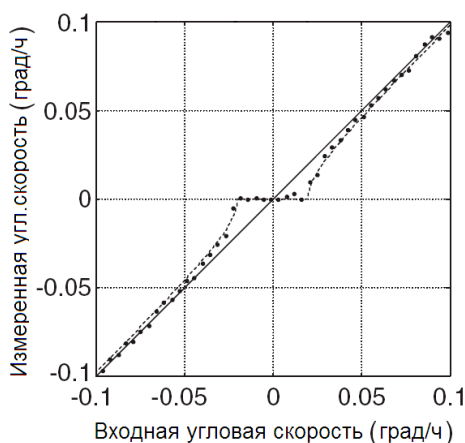


Рис. 13. Ширина зоны нечувствительности ВОГ Honeywell без компенсации. Точки – результаты измерения; пунктирная линия – результаты моделирования, сплошная линия – идеальная характеристика (опорная линия с наклоном 1)

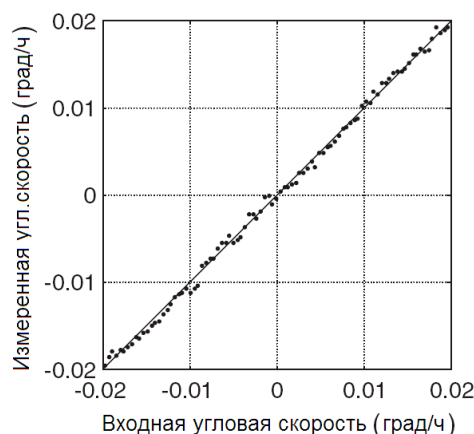


Рис. 14. Отсутствие зоны нечувствительности в ВОГ с новой модуляционной схемой. Экспериментальные результаты показаны точками. Идеальная характеристика (опорная линия с наклоном 1) показана сплошной линией

Видна практически линейная зависимость между измеренной угловой скоростью и фактической угловой скоростью, без зоны нечувствительности. Этот результат был достигнут с применением напряжения обратной связи со случайной амплитудой в диапазоне $\pm\pi$ и фиксированным периодом 2,64 с, который был выбран намного короче времени, которое понадобилось бы напряжению обратной связи, чтобы зафиксироваться на постоянном уровне.

Эта модуляционная схема [28, 29] устраняет зону нечувствительности с незначительным увеличением шума на 0,0004%, полностью осуществлена в цифровом процессоре, не требует дополнительных оптических или электронных аппаратных средств и полностью невидима для пользователей.

Аналогичное решение в целях борьбы с зоной нечувствительности было использовано компанией Northrop Grumman Guidance and Electronics Co., Inc.: к сигналу в контуре обратной связи ВОГ подмешивался псевдослучайный сигнал, что позволяло «размыть» зону нечувствительности. При этом шум выходного сигнала заметно не возрастал [4, 27].

6. Зона нечувствительности ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор»

Изначально в гироскопах разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с ГОУ СПбГУИТМО [15, 17, 18] ширина зоны нечувствительности по угловой скорости в пересчете на горизонтальную составляющую угловой скорости Земли достигала 0,20 град/ч ($\pm 0,10$ град/ч от нулевого значения).

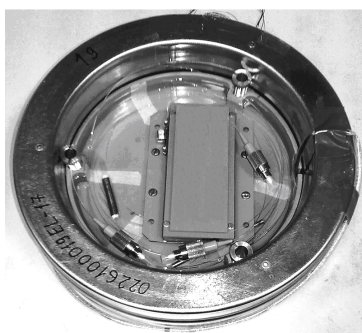


Рис. 15. Общий вид ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор»

На рис. 15 показан общий вид ВОГ. Приведем наиболее характерный вид зоны нечувствительности одних из первых ВОГ, изготовленных в ЦНИИ «Электроприбор»: на рис. 16 показаны графики выходного сигнала с осреднением 1 и 200 с. Здесь ширина зоны нечувствительности – около 0,20 град/ч.

Нелинейность выходной характеристики начинается примерно в диапазоне, вдвое большем собственно зоны нечувствительности. Зона нечувствительности симметрична относительно нуля.

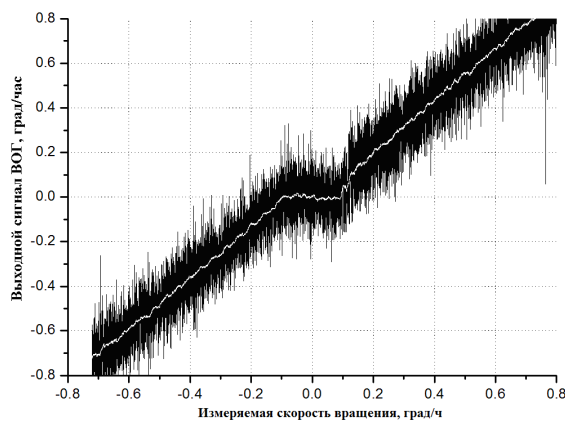


Рис. 16. Характерный вид зоны нечувствительности первых образцов ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор»

Методика измерений и оборудование в этом случае были те же, что и при исследовании ВОГ компаний «Оптолинк», IXSEA.

По мере повышения качества сборки интерферометров и электронной части

ВОГ зона нечувствительности была снижена до уровня, не превышающего $\pm 0,01$ град/ч от нулевого значения, как это показано на рис. 17. При таком уровне точности измерений можно считать, что зона нечувствительности практически отсутствует.

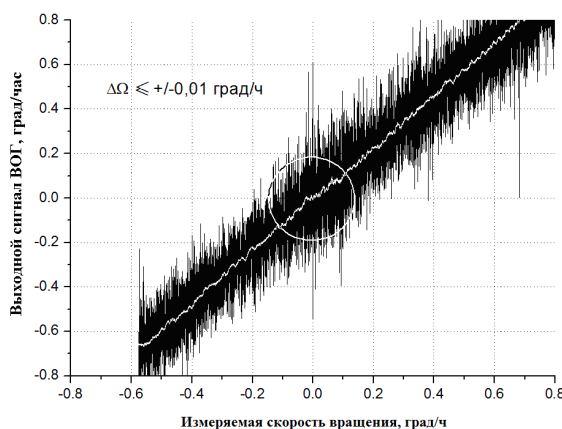


Рис. 17. Выходная характеристика ВОГ разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с ГОУ СПбГУИТМО

В настоящее время ведутся активные работы по дальнейшему снижению и полному исключению зоны нечувствительности.

Заключение

Рассмотрены вопросы, связанные с проблемой зоны нечувствительности у ВОГ компенсационного типа. На основании обзора литературных источников описаны и проанализированы причины возникновения и способы уменьшения или исключения зоны нечувствительности волоконно-оптических гироскопов.

Существует несколько причин, вызывающих появление зоны нечувствительности: влияние паразитного интерферометра, создаваемое обратными отражениями и обратным рассеянием, поляризационные погрешности в оптической схеме; перекрестные связи в электрической схеме, а также наличие нелинейности цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и электрооптического модулятора. Величина приведенных факторов и их влияние на зону нечувствительности определяются конструкцией ВОГ, качеством сборки, параметрами его оптической и электрической схем.

Известны два пути решения проблемы зоны нечувствительности: устранение причины, вызывающей ее появление, и устранение следствия, т.е. самой зоны нечувствительности введением специальной дополнительной фазовой модуляции. Устранение причины, вызывающей возникновение зоны нечувствительности, представляется наиболее правильным решением с точки зрения проектирования прибора.

Зона нечувствительности ВОГ разработки ЦНИИ «Электроприбор» находится в пределах $0,02-0,10$ град/ч без применения специальных методов подавления. В настоящее время ведутся работы, направленные на исключение зоны нечувствительности в ВОГ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00904-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Филатов, Ю.В.** Оптические гироскопы: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ЦНИИ «Электроприбор», 2005, 139 с.
2. **Лукьянов, Д.П.** Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: Состояние и тенденции развития // Гироскопия и навигация. - 1998. - № 4(23). - с.20-45.
3. **Lefevre H.** The Fiber-Optic Gyroscope. - Artech House, London, 1992, 314 p.
4. **Chung-Jen Chen.** Interferometric Fiber Optic Gyroscope Dead Band Suppression // Japanese Journal Of Applied Physics, Part 2 - Letters, Applied Physics Express - APEX, Vol. 1, No. 7 (2008), pp. 072501-072503.
5. **Разработка** двухрежимного гирогоризонткурсоуказателя на базе трехкомпонентного волоконно-оптического гироскопа / А.П.Колеватов [и др.]// Гироскопия и навигация. - 2007.- № 2 (57).- С. 43-53.
6. **Yu Tao, Qing Li, Wu Yan-Ji.** FOG Deadband Reason Analysis And Error Compensation // Journal Of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3).
7. **Pan Xiong; Zhang Chun-Xi; Jin Jing; Yang De-Wei; Song Ning-Fang.** Data Analysis and Modeling of Dead Zone in Close-loop Fiber Optic Gyros // J. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5), pp.61-65.
8. **Pavlat G.A.** Closed-loop fiber optic gyros // Proc. of SPIE, vol. 2837, 1996, pp.46-60.
9. **Jun Pan.** Dead Band Phenomena Of Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope And The Experiment To Eliminate Dead Band // Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, Vol. 22, No. 02.
10. **Wang Wei, Fu Tie-Gang.** Analysis On Dead-Band Mechanism Of Digital Closed-Loop FOG // Journal Of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1).
11. **Song Ning-Fang, Li Jing, Jin Jing, Zhang Gang.** The Study on Deadband of Fiber Optic Gyro // Journal Of Projectiles, Rockets, Missiles And Guidance, 2005, Vol.25, No. 01.
12. **Jin Jing, Zhang Chunxi, Song Ningfang, Li Lijing.** Dead Band Nonlinearity Of Digital Closed-Loop FOG // Journal Of Beijing University Of Aeronautics And Astronautics, 2007, Vol 33; No. 9; Issue 175, Pages 1046-1050.
13. **Pan Xiong; Zhang Chun-Xi; Jin Jing; Yang De-Wei; Song Ning-Fang.** Data Analysis and Modeling of Dead Zone in Close-loop Fiber Optic Gyros // J. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5), pp.61-65 (in chinese).
14. **Wang Ma-hua, Cui Yi-Ping, Zhang Tong.** Analysis on the Mechanism of Dead Band Phenomena in Digital Closed-Loop Fiber Optic Current Transformers // Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, Volume 22, No. 01.
15. **Исследование** зоны нечувствительности волоконно-оптических гироскопов. Реферат доклада / Д.А.Егоров [и др.]// Рефераты докладов XXVII конференции памяти Н.Н. Острякова. - С.-Пб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. - С. 15.
16. **Jin Jing, Zhang Chun-Xi, Song Ning-Fang.** Electrical Crosstalk of Modulation Signal in Digital Closed-loop FOG // Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, Vol. 28; Part 5, P. 1200-1205.
17. **Трехосный** волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем / И.К.Мешковский [и др.]// Материалы XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. - СПб, ЦНИИ «Электроприбор». - 2009. - С. 7-12.
18. **Трехосный** волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем /И.К.Мешковский [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2009. - № 3. - С. 3-9.
19. **Sunders G., Dankwort R., Strandjord L., Bergh R. (Honeywell, Inc.).** Fiber Optic Gyroscope With Deadband Error Reduction, US Patent 5999304, 1999.
20. **Jun Pan.** The Experiment Of Eliminating Dead Band In The Output Signal Of The Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope // Acta Photonica Sinica, 2000, Vol. 29, No. 02.
21. **Mao Cai-hong, Wang Dong-yun, Shu Xiao Wu, Yang Guo-guang.** Pseudo-random modulation in the all-digital closed-loop fiber optic gyroscope // Opto-Electronic Engineering, 2002, S1 Issue.
22. **Mao Cai-hong, Yang Guo-guang.** Application of pseudo-random modulation in full-digital closed-loop optic fiber gyroscope // Opto-Electronic Engineering , 2003, 29(6), 80-83.
23. **Jin Jing, Li Min, Song Ningfang, Zang Chunxi.** Random modulation for fiber optic gyroscope based on four-states Markov chain // Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 07, 2008.
24. **Song Ning-Fang, Wang Xia Xiao, Wu Zhan-Jun.** Method For Eliminating The Deadband Of FOG // Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, Vol. 14, No. 04.
25. **Yu Hai-Cheng, Wang Wei, Huang Lei.** Improved Performance Of Scale Factory Linearity In Closed-Loop IFOG // Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15, No. 04, Page 449-451.

26. **Zhang Xiao-Feng, Zhang Gui-cai.** Research on Dead Zone Error Reduction Technique in Closed-loop Fiber Optic Gyroscope // *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, 31, No. 02.
27. **Pavlath G.A., Tazartes D.A. (Northrop Grumman Guidance and Electronics Co., Inc.)** Fiber Optic Gyroscope Deadband Circumvention Apparatus and Method, US Patent 7633626, 2009.
28. **Lange C.H., Chen, Chung-jen.** Methods And Apparatus For Fiber Optic Gyroscope Dead Band Error Suppression Modulation, US Patent 6744519, 2004.
29. **Lange C.H., Chen, Chung-Jen.** Apparatus And Methods For Dead Band Error Suppression In Fiber Optic Gyroscopes , Canadian Patent 2484201, 2003.
30. **Three Axis Motion Simulator Model AC3367-TCC.** Data Sheet. Acutronic Schweiz AG, Switzerland, 2008.
31. **Волоконно-оптический** гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания /А.Колеватов [и др.] // *Гироскопия и навигация*. - 2010. - № 3. - С. 49-60.
32. **Интерферометрические** волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом / В.Е.Прилуцкий [и др.]// *Гироскопия и навигация*. - 2004. - № 3. - с.62-72.
33. **IMU 120 User Guide.** MU-IMU120-019-A, IXSEA, 2005.

Abstract. The phenomenon of dead band in laser gyroscopes is widely known. However, as it has been found out recently, the dead band also occurs in fiber-optic gyroscopes (FOG). The issues related to the problem of dead band in interferometric close-loop FOG are considered. The causes of FOG dead band appearance and methods of its suppression are described and analyzed on the basis on literature review. FOG dead band identification and estimation procedure are discussed. The dead band values for FOG developed in Russian Federation (by RPC OPTOLINK Ltd., JSC Perm Research and Production Instrument Company, Concern CSRI Elektropribor, JSC, jointly with National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics) and other countries (Honeywell, IXSEA) are given.

Материал поступил 24.12.10