

В. Е. ПРИЛУЦКИЙ, В. Г. ПОНОМАРЕВ, В. Г. МАРЧУК, М. А. ФЕНЮК, Ю. Н. КОРКИШКО,  
В. А. ФЕДОРОВ, С. М. КОСТРИЦКИЙ, Е. М. ПАДЕРИН, А. И. ЗУЕВ

## **ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ С ЛИНЕЙНЫМ ВЫХОДОМ**

*Описаны одноосный и трехосный волоконно-оптические гироскопы, изготавливаемые на предприятии «Оптолинк». Представлены технологические процессы и потенциальная возможность реализации требований как к недорогим и компактным приборам для тактических задач управления, так и к системам инерциальной навигации. Рассмотрены оптические и электронные блоки гироскопов с замкнутым контуром обратной связи и интегрально-оптическими компонентами.*

### **Введение**

Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) хорошо известны как датчики угловой скорости, принцип действия которых основан на эффекте Саньяка [1]. Разработки последних лет поставили их в ряд приборов, удовлетворяющих самому широкому диапазону требований. Как и кольцевые лазерные гироскопы, ВОГ – надежные и долгоживущие приборы в жестких условиях эксплуатации из-за отсутствия вращающихся частей. Кроме того, у ВОГ отсутствует необходимость в высоковольтном питании и исключения взаимной синхронизации встречных волн, а также существует возможность более легкого достижения малых уровней квантования по углу.

Разработки ВОГ для нужд как высокоточной инерциальной навигации, так и объектов среднего класса точности, например для истребителей-перехватчиков, уже показали, что такие датчики угловой скорости вращения обладают уникальными возможностями [2]. На предприятии «Оптолинк» проведены разработки и конструирование, начато промышленное изготовление семейства ВОГ с замкнутым контуром обратной связи. Разработаны одноосные и трехосный ВОГ трех различных классов точности: класс 0,01-0,1 град/ч для высокоточной нави-

---

**Прилуцкий** Виктор Евстафьевич (1947). Директор отделения волоконно-оптической гироскопии ООО «Оптолинк» (Москва).

**Пономарев** Владимир Григорьевич (1945). Кандидат технических наук, ведущий конструктор отделения волоконно-оптической гироскопии ООО «Оптолинк».

**Марчук** Владимир Григорьевич (1946). Ведущий инженер-электроник отделения волоконно-оптической гироскопии ООО «Оптолинк».

**Фенюк** Михаил Анатольевич (1962). Ведущий инженер-электроник отделения волоконно-оптической гироскопии ООО «Оптолинк».

**Коркишко** Юрий Николаевич (1960). Доктор физико-математических наук, генеральный директор ООО «Оптолинк».

**Федоров** Вячеслав Александрович (1967). Доктор физико-математических наук, технический директор ООО «Оптолинк».

**Кострицкий** Сергей Михайлович (1958). Кандидат физико-математических наук, начальник отдела новых разработок ООО «Оптолинк».

**Падерин** Евгений Михайлович (1964). Главный технолог ООО «Оптолинк».

**Зуев** Александр Иванович (1958). Директор Арзамасского отделения ООО «Оптолинк».

Статья по докладу на XI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

гации, класс 0,1-1 град/ч для тактических задач и средний класс 1-10 град/ч. Работа приборов в области нулевых значений разности фаз и цифровой выход обеспечивают более высокую точность масштабного коэффициента и более широкий линейный диапазон чем у прототипов с открытым контуром, делая их привлекательными для многих применений.

## Одноосные гироскопы

### Конфигурация

Разработанные одноосные ВОГ имеют минимальную конфигурацию (рис. 1), которая обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре. ВОГ состоит из источника света, фотодетектора, 1:1 волоконного делителя света, кольцевого интерферометра, чувствительного к угловой скорости, и блока электроники, осуществляющего энергоснабжение элементов ВОГ, обработку сигналов с фотодетектора и управление фазовыми модуляторами.

Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из волоконного контура (ВК), сохраняющего состояние поляризации света. МИОЭ выполняет три функции:

- 1) сохранение поляризации проходящего света в целях уменьшения нестабильности смещения нуля из-за поляризационной невзаимности;
- 2) расщепление излучения суперлюминесцентного диода (СЛД) на две встречно бегущие в ВК световые волны с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе;
- 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электро-оптического фазового модулятора.

Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено необходимостью уменьшения дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, и влияния внешних магнитных полей вследствие эффекта Фарадея.

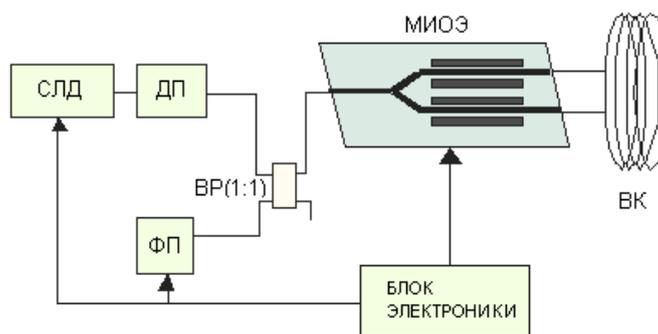


Рис. 1. Минимальная конфигурация одноосного гироскопа:

СЛД – суперлюминесцентный диод, ДП – деполяризатор, ВР - волоконный разветвитель, ФП – фотоприемник, МИОЭ – многофункциональный интегрально-оптический элемент, ВК – волоконный контур

В одноосных ВОГ, разработанных на предприятии «Оптолинк», широкополосные фазовые модуляторы, расположенные на обоих плечах МИОЭ, используются для внесения пилообразной фазовой модуляции, обеспечивая работу приборов в режиме замкнутого контура. В этом случае сигнал с фотоприемника (ФП) преобразуется в дискретный сигнал и затем демодулируется. На выходе

демодулятора формируется сигнал рассогласования, который затем интегрируется и используется для получения наклона «пилы», соответствующего скорости вращения. В одной из разработанных схем контур обратной связи замыкается с помощью пилообразной модуляции, имеющей постоянную фазовую амплитуду, равную  $2\pi$  рад. В этом случае разность фаз Саньяка компенсируется сигналом с частотой  $f$ , определяемой соотношением [1]

$$f = \frac{D}{n\lambda} \Omega, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – скорость вращения;  $D$  – диаметр ВК;  $n$  – эффективный показатель преломления моды в волокне;  $\lambda$  – длина волны света.

Частота следования спадов «пилы» является, таким образом, цифровой мерой скорости вращения, причем появление каждого спада соответствует приращению угла поворота ВОГ на  $\frac{n\lambda}{D}$  рад.

### **Оптический блок одноосных ВОГ**

Точность ВОГ зависит от параметров оптического блока (ОБ). Шум прибора тем меньше, чем больше выходная мощность СЛД и чем меньше потери оптических элементов, включая волокно типа PANDA, сохраняющее состояние поляризации.

Минимальная измеряемая скорость вращения зависит от коэффициента перекрестной поляризационной связи ( $h$ -параметра) и длины поляризационных биений  $L_p$  волокна следующим образом [4]:

$$\Omega_{\min} \sim \frac{\sqrt{hL_p}}{DL}. \quad (2)$$

Поэтому при разработке ВОГ основные усилия были направлены на уменьшение оптических потерь в каждом из элементов и на уменьшение величин  $h$  и  $L_p$  в волоконных световодах типа PANDA. В табл. 1 представлены параметры изготавливаемых на предприятии «Оптолинк» волоконных световодов, сохраняющих состояние поляризации света.

Таблица 1

**Параметры волоконных световодов, изготавливаемого на предприятии «Оптолинк»**

|                            |               |            |
|----------------------------|---------------|------------|
| Рабочая длина волны, мкм   | 0,83          | 1,55       |
| Диаметр модового поля, мкм | 4,5           | 6,5        |
| Диаметр волокна, мкм       | 80            |            |
| Диаметр покрытия, мкм      | 120÷160       |            |
| Числовая апертура          | 0,15          | 0,13       |
| $h$ -параметр              | $<10^{-5}$ /м |            |
| Потери, дБ/км              | $< 3$         | $< 2$      |
| Длина волны отсечки, нм    | 680 –780      | 1250 –1450 |
| Длина биений, мм           | $<3$          |            |
| Тип                        | PANDA         |            |

На предприятии разработаны четыре модификации одноосных ВОГ, имеющие ВК с длинами 200 м (SRS-200), 500 м (SRS-500), 1000 м (SRS-1000), 2000 м (SRS-2000). Намотка катушек ведется по квадрупольной технологии, начиная от середины длины отрезка волокна в направлении наружу к его концам путем поочередного сматывания с двух вспомогательных шпулек и формированием геометрически симметричной структуры. Волокно является и эле-

стичным и очень хрупким. Эластичность требует поддерживать постоянным натяжение волокна в течение всего процесса намотки. Хрупкость требует контролировать не только натяжение волокна, но и его изгибы или искривления, а также поверхностные контакты. Катушка с волокном располагается на теплоизолированной плате с диаметром от 80 до 230 мм в зависимости от типа ВОГ (табл. 2 и 3).

Таблица 2

**Параметры одноосных ВОГ**

| Параметр   | SRS-2000 | SRS-1000 | SRS-500 | SRS-200 |
|--|----------|----------|---------|---------|
| Диапазон измеряемой угловой скорости, град/с       | ±10      | ± 30     | ±100    | ±200    |
| Скорость дрейфа при постоянной температуре, град/ч | <0,01    | <0,1     |         | <10,0   |
| Погрешность масштабного коэффициента, %            | ≤ 0,01   | ≤ 0,02   |         | ≤ 0,05  |
| Полоса пропускания, Гц                             | >10      | 10-30    | >100    | >100    |
| Шум, град/√ч                                       | ≤0,001   | ≤0,003   | ≤0,005  | ≤0,01   |
| Длина ВК, м  | 2000     | 1000     | 500     | 200     |
| Масса, кг  | 1,2      | 0,8      |         |         |
| Размеры, мм  | Ø 250×40 | Ø150×40  |         |         |
| Выход  | RS232    |          |         | Аналог  |

Таблица 3

**Параметры трехосного ВОГ TRS-500**

| Параметр  | TRS-500                     |
|---|-----------------------------|
| Диапазон измеряемой угловой скорости, град/с      | ±500                        |
| Дрейф смещения при постоянной температуре, град/ч | <10,0                       |
| Погрешность масштабного коэффициента, %           | ≤ 0,5                       |
| Полоса пропускания, Гц                            | От 100 до 500               |
| Шум, град/√ч                                      | ≤0,05                       |
| Длина ВК, м                                       | 500                         |
| Масса, кг   | 1,1                         |
| Размеры, мм                                       | 110×110×90                  |
| Потребляемая мощность, Вт                         | <6                          |
| Выход   | Аналоговый и цифровой RS485 |

Станки для намотки ВК были специально разработаны на базе стандартных проволочных намоточных станков.

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

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

За основу конструкторского решения при разработке деполаризатора взята конструкция, известная как волоконный деполаризатор Лайота [5]. Технология изготовления этого элемента обеспечивает достижение следующих параметров:

потери оптической мощности ..... < 0,5 дБ;  
степень остаточной поляризации излучения при ширине спектральной линии 15 нм..... < 0,1%.

МИОЭ изготавливаются на кристаллах LiNbO<sub>3</sub> методом высокотемпературного протонного обмена [3]. Этот метод дает возможность достижения следующих значений основных параметров МИОЭ:

полуволновое напряжение:.....  $\alpha < 2В (\lambda=0,83 \text{ мкм}), < 3В (\lambda=1,55 \text{ мкм})$ ;  
коэффициент экстинкции поляризатора .....  $< -50 \text{ дБ}$ ;  
амплитудная модуляция .....  $< 0,2\%$ ;  
избыточные потери (для деполяризованного света) .....  $< 7 \text{ дБ}$ .

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.

В качестве источника света в разработанном ВОГ используется излучатель ИЛПН-330-4, изготавливаемый на предприятии "Инжект", г. Саратов. В состав излучателя входят:

полосковый СЛД на основе двойной гетероструктуры в системе GaAs/GaAlAs с изоляцией встречным *p-n* переходом и поглощающим слоем в активной области. Такая конструкция СЛД обеспечивает практически гладкий спектр с полушириной 15-18 Нм и получение мощности излучения до 1,5-2 мВт на выходе встроенного одномодового волоконного световода;

микроохладитель на базе элементов Пельтье для поддержания температуры кристалла СЛД в заданном диапазоне при совместной работе с устройством терморегулирования;

термодатчик для формирования сигнала рассогласования в устройстве терморегулирования;

фотодиод на основе кремниевой *p-i-n* структуры для формирования сигнала управления в стабилизаторе мощности света.

Все элементы, входящие в ИЛПН-330-4, размещены в стандартном герметичном корпусе с электрическими и оптическими гермовыводами.

В качестве приемника излучения используется фотодиод на основе кремниевой *p-i-n* структуры типа ФП1-850К, изготавливаемой на том же предприятии. Фотодиод имеет токовую чувствительность на длине волны  $\lambda = 0,835 \text{ мкм}$  не менее 0,3 А/Вт с временем нарастания и спада фронта импульсного сигнала не более 2 нс.

Фотодиод выполнен в герметичном корпусе со встроенным многомодовым волоконным световодом. Решение о работе ВОГ на данном этапе в области длин волн 830 нм основано на том, что наиболее дешевые источники излучения с наивысшей надежностью при массовом изготовлении имеются для этой области длин волн.

Есть два основных источника погрешности масштабного коэффициента:

- 1) конечное время спада;
- 2) нестабильность фазовой амплитуды «пилы» [4].

Чтобы избежать влияния первого фактора используется специальная схема преобразования, благодаря которой время обратного хода пилообразной модуляции исключается из передаточной характеристики ВОГ, а нестабильность фазовой амплитуды минимизируется построением астатической следящей системы, для которой сигналом рассогласования является отклик прибора на периодическое с постоянным периодом тарированное воздействие. Специальная схема независимо от состояния движения ВОГ обеспечивает нулевую ошибку стабилизации амплитуды фазовой «пилы» у значения  $2\pi$  рад при постоянной скорости вращения и ничтожно малое ее значение в динамике.

### Параметры одноосных ВОГ

На рис. 2 представлена реализация выходного сигнала прибора SRS-1000. Некомпенсированный выходной сигнал изображен как функция времени. Скорость дрейфа составляет величину менее 0,1 град/ч.

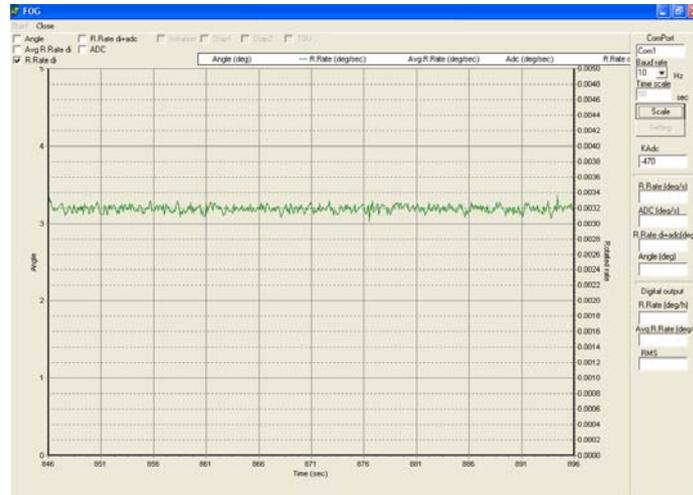


Рис. 2. Некомпенсированный выходной сигнал SRS-1000 при комнатной температуре

Стабильность смещения нулевого сигнала достигается благодаря применению волокна, поддерживающего поляризацию излучения, и МИОЭ с указанными выше параметрами, а также принятию мер по существенному снижению потерь в местах сварок волокон. В целях минимизации уходов нуля ВОГ, вызываемых смещениями в электрических цепях, обработка информации ведется на переменном сигнале (или цифровым способом) во всех каскадах, кроме одного - интегратора 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 град/ч.

Рис. 3 демонстрирует стабильность смещения прибора SRS-500 в шести запусках.

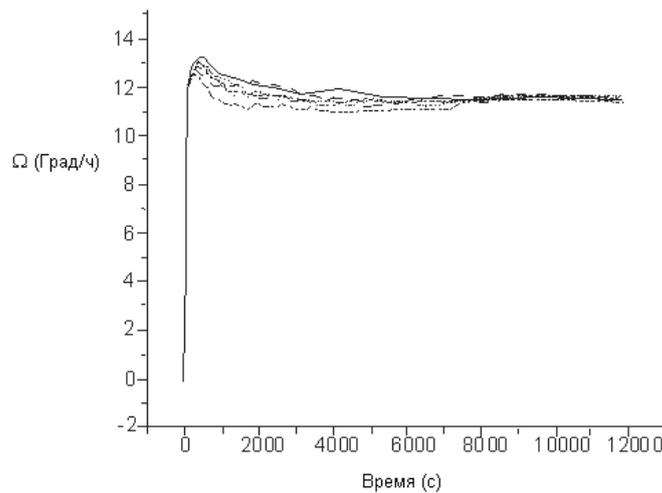


Рис. 3. Стабильность смещения SRS-500 в шести запусках

Одноосные ВОГ находят применение при построении гирокомпасов. В гирокомпасе ВОГ вращают так, чтобы его чувствительная ось могла сканировать горизонтальную проекцию скорости вращения Земли. Для этого ВК располагается перпендикулярно горизонтальной плоскости и равномерно вращается вокруг вертикальной оси. При этом измеряется проекция горизонтальной составляющей скорости Земли на ось чувствительности гироскопа. На выходе ВОГ получается синусоидальный сигнал, в котором нулевые значения соответствуют направлениям на восток или на запад, а максимум и минимум – на север и на юг (рис. 4). Амплитуда этого сигнала пропорциональна горизонтальной составляющей скорости вращения Земли, а его фаза определяет положение оси чувствительности гироскопа относительно плоскости меридиана.

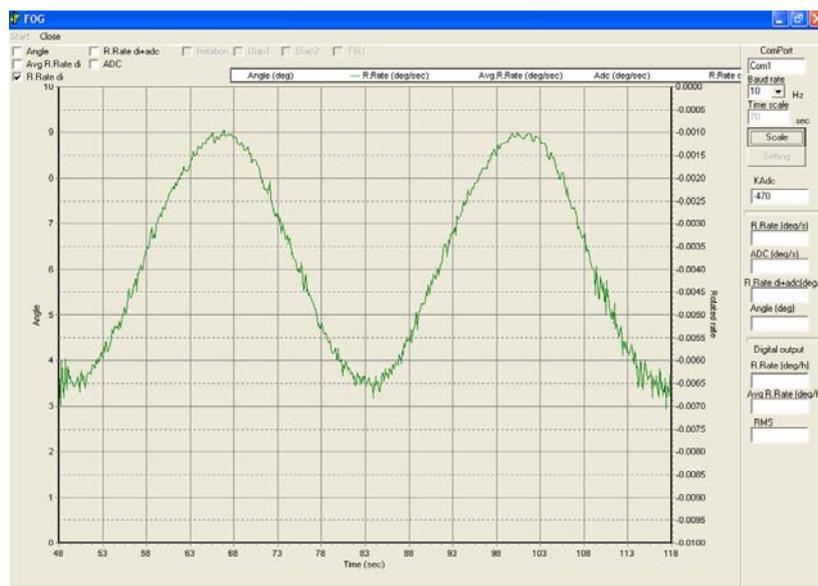


Рис. 4. Выходной сигнал SRS-1000 в зависимости от вращения при работе прибора в режиме гирокомпаса

### Трехосный гироскоп

В трехосном ВОГ TRS-500 используется только один источник излучения для всех трех волоконных катушек.

Прибор также имеет минимальную конфигурацию (рис. 5), что гарантирует взаимность оптических путей для двух встречных световых волн в каждом из ВК. В него входит один источник света, один фотодетектор, два разветвителя (1:1 и 1:2) для деления света на три части, три интерферометра, чувствительных к трем ортогональным угловым скоростям, и блок электроники.

Блок электроники вырабатывает три напряжения  $U_1$ ,  $U_2$ , и  $U_3$  для формирования пилообразной фазовой модуляции света с целью компенсации разности фаз Саньяка, а также для внесения постоянного фазового сдвига между световыми волнами на  $\pi/2$  рад.

В этом случае измеренная угловая скорость определяется соотношением

$$\Omega = \frac{\lambda n}{\pi D} \varphi_{rs} f, \quad (3)$$

где  $\varphi_{rs}$  и  $f$  – амплитуда и частота «пилы» соответственно.

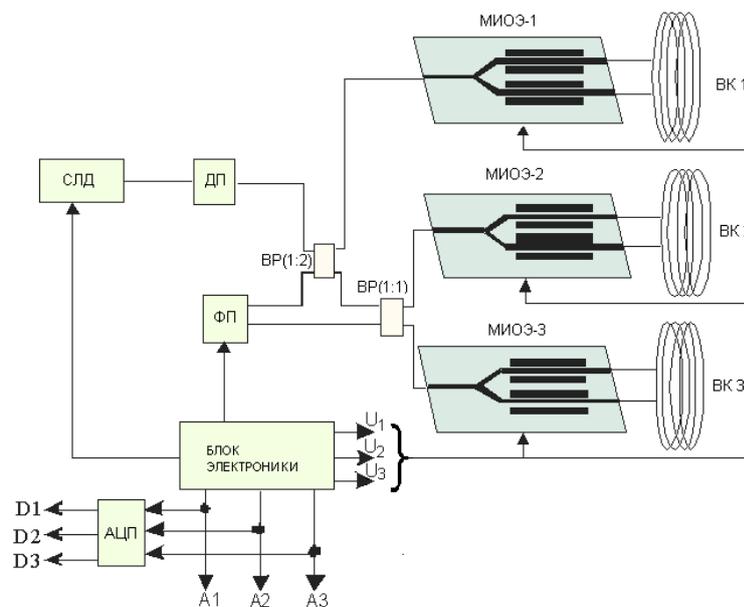


Рис. 5. Конфигурация трехосного гироскопа

В трехосном ВОГ частота «пилы» стабилизируется кварцевым резонатором, так что  $f = \text{const}$ . Следовательно, мерой угловой скорости становится амплитуда пилообразной модуляции  $\varphi_{rs} = \frac{\pi D}{\lambda n f} \Omega$ . Эта величина определяется напряжением, прикладываемым к фазовому модулятору. При этом

$$\varphi_{rs} = K_{\text{ФМ}} U, \quad (4)$$

где  $K_{\text{ФМ}} = \frac{\pi}{V_{\pi}}$  – эффективность фазового модулятора,  $V_{\pi}$  – полуволновое напряжение, а, значит,

$$U = \frac{V_{\pi} D}{\lambda n f} \Omega. \quad (5)$$

Так как величина  $V_{\pi}$  пропорциональна длине волны  $\lambda$ , то масштабный коэффициент ВОГ становится независимым от  $\lambda$ , что улучшает температурную стабильность параметров прибора.

В приборе реализован способ поочередного переключения модуляции каналов (осей) с частотой 1 кГц. Каждый из трех каналов выдает выходную информацию только в том случае, если на модулятор подан электрический сигнал вспомогательной модуляции, поэтому простым подключением электрических сигналов к соответствующему модулятору в работу включается сначала одна из осей на время  $\approx 333$  мкс, затем другая, потом третья. Далее все циклически повторяется с частотой 1 кГц. При этом все три канала работают идентично и независимо друг от друга, как одноосные схемы с замкнутым контуром обратной связи.

В блоке АЦП аналоговые выходные сигналы  $A_1, A_2$  и  $A_3$  преобразуются в цифровые  $D_1, D_2$  и  $D_3$  в виде последовательного интерфейса RS485.

На рис. 6 представлены выходные сигналы прибора TRS-500 как функция времени. Дрейф смещения менее 5 град/ч.

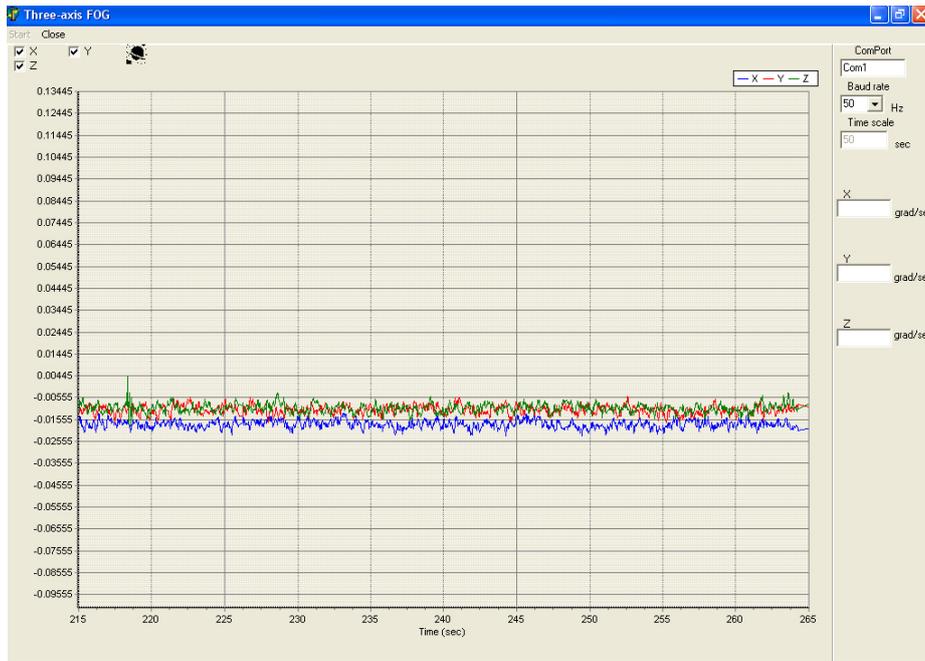


Рис. 6. Некомпенсированный выходной сигнал TRS-500 при комнатной температуре

Трехосный гироскоп TRS-500 чувствителен к скорости вращения Земли и также может быть применен для построения гирокомпыаса. На рис. 7 показаны выходные сигналы двух осей  $X$  и  $Y$  в то время, когда вращение производилось вокруг вертикальной оси  $Z$ . Видны два синусоидальных сигнала с фазовым сдвигом  $\pi/2$ , у которых переходы через нуль соответствуют направлениям на запад и на восток.

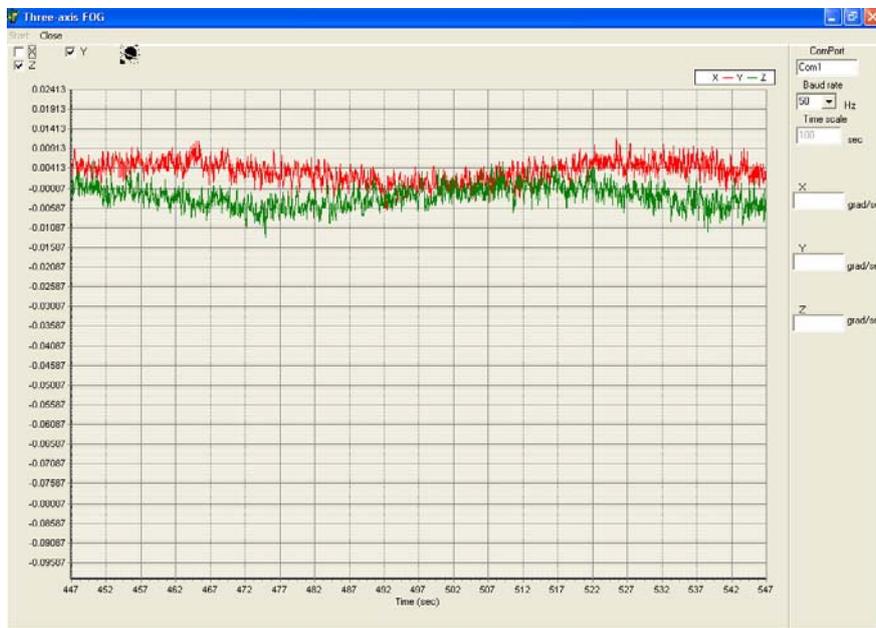


Рис. 7. Выходной сигнал TRS-500 в зависимости от вращения при работе прибора в режиме гирокомпыаса

На рис. 8 представлены результаты тестирования прибора TRS-500 на трехосном поворотном стенде Acutronic в диапазоне угловых скоростей  $\pm 100$  град/с.

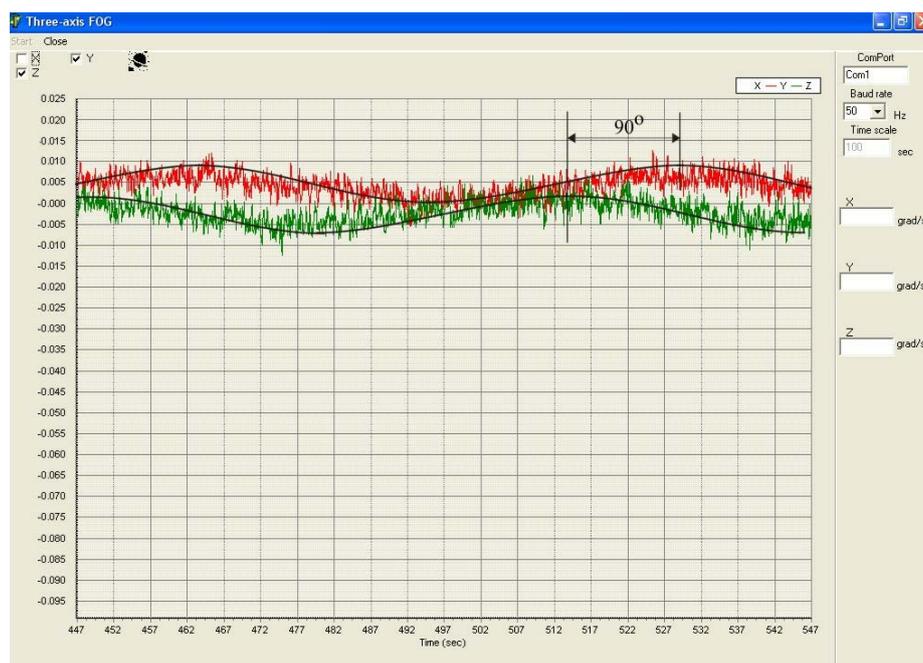


Рис. 8. Выходной сигнал TRS-500 при изменении скорости вращения вокруг одной из осей

### Влияние магнитного поля

Оценка влияния магнитного поля на величину ухода нулевого сигнала ВОГ SRS-1000 вследствие эффекта Фарадея была проведена на предприятии «Электроприбор» (Санкт-Петербург). Каждое измерение состояло из шести интервалов с воздействием постоянным полем напряженностью 5 Эрстед. Один интервал отличался от другого изменением знака магнитного поля. Максимальное изменение нулевого сигнала, равное 0,1 град/ч/Эрстед, получено при ориентации поля вдоль оси чувствительности гироскопа. В других направлениях влияние магнитного поля меньше.

### Заключение

Представлены результаты разработки и изготовления ВОГ на предприятии «Оптолинк». Разработаны три класса приборов с различными характеристиками. Среди них относительно малогабаритный трехосный ВОГ класса 1-10 град/ч. Работа в области нулевых фазовых сдвигов и наличие как аналогового, так и цифрового выходов обеспечивают большую точность масштабного коэффициента и динамический диапазон по сравнению с аналогичными приборами открытого типа. Это делает их привлекательными для использования на тактических подвижных объектах. Два других класса ВОГ замкнутого типа имеют порядок точности 1 град/ч и выше. Первый из них от 1,0 до 0,1 град/ч. Также разработаны прецизионные приборы, характеризующиеся уходами нулевого сигнала на уровне лучше чем 0,1 град/ч, или даже лучше чем 0,01 град/ч. Эти два типа приборов могут найти применение на военных и коммерческих судах,

в авиации и на спутниковых инерциальных навигационных системах, а также в системах определения направления на север. Прототип спутниковой системы планируется запустить с различными носителями в 2004 г. или в начале 2005 г. Продолжение разработок и инженерные усилия сконцентрированы на выработке решений для одноосных и многоосных приборов с целью уменьшения их размеров и оптимизации стоимости производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Lefevre H.** The Fiber – Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
2. **Ward P.W., Jeerage M.** The Texas Instruments/Honeywell GPS Guidance Package // Proc.IEEE, Position, Location and Navigation Symposium (PLANS'92), 1992. March 22-26. P.298-305.
3. **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. Vol.18 - P.562-568.
4. **Optical Gyros and their Application**// RTO – AG – 339, 1999.
5. **Bohm K., Petermann K., Weidel E.**, Performance of Lyot depolarizers with birefringent single-mode fibers // J. Lightwave Technology, 1983. Vol.1 - P.71-74.

**Abstract.** The Optolink's single-axis and three-axis fiber optic gyroscopes are described. The results illustrate the versatility of the technology, showing its potential to meet both the low-cost, compact sized needs of tactical guidance, as well as the very high performance needs of inertial navigation and precision applications. The optical and electronic blocks of closed-loop gyroscopes with integrated optic components are considered.