

# ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ С ЛИНЕЙНЫМ ВЫХОДОМ

В. Е. Прилуцкий<sup>1</sup>, В. Г. Пономарев<sup>2</sup>, В. Г. Марчук<sup>3</sup>, М. А. Фенюк<sup>4</sup>, Ю. Н. Коркишко<sup>5</sup>, В. А. Федоров<sup>6</sup>,  
С. М. Кострицкий<sup>7</sup>, Е. М. Падерин<sup>8</sup>, А. И. Зуев<sup>9</sup>

ООО «Оптолинк», Россия, 124498, Москва, Зеленоград, МИЭТ, экспериментальный завод «Протон».  
Тел/факс (095) 536-99-33/(095) 536-99-34. E-mail: opto@optolink.ru

## Аннотация

**Ключевые слова:** оптическое волокно, гироскоп, интегральная оптика, ссродинный преобразователь

*Описаны одноосный и трехосный волоконно-оптические гироскопы, изготавливаемые на предприятии «Оптолинк». Представлена многогранность технологических процессов с их потенциальной возможностью реализации требований как к недорогим и компактным приборам для тактических задач управления, так и к очень точным системам инерциальной навигации, а также для многих других применений. 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 вращения, принцип действия которых основан на эффекте Саньяка [1]. Разработки последних лет поставили их в ряд приборов, удовлетворяющих самому широкому диапазону требований к параметрам. Как и кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ), ВОГ могут использоваться как надежные и долгоживущие приборы в жестких условиях эксплуатации вследствие отсутствия вращающихся частей. Среди преимуществ ВОГ над КЛГ следует отметить отсутствие необходимости высоковольтного питания и принятия мер по устранению так называемого захвата лучей, возможность более легкого достижения малых уровней квантования по углу и др.

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

## Одноосные гироскопы

### Конфигурация

Наши одноосные ВОГ имеют так называемую минимальную конфигурацию (рис. 1), которая обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре. ВОГ состоит из одного источника света, одного фотодетектора, одного 1:1 волоконного делителя света, одного 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 сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК). МИОЭ выполняет

<sup>1</sup> Директор саратовского филиала.

<sup>2</sup> Кандидат технических наук, ведущий конструктор.

<sup>3</sup> Ведущий инженер.

<sup>4</sup> Ведущий инженер.

<sup>5</sup> Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

<sup>6</sup> Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

<sup>7</sup> Кандидат физико-математических наук, руководитель отдел.

<sup>8</sup> Главный технолог.

<sup>9</sup> Директор Арзамасского филиала.

три функции: 1) поляризации проходящего света в целях уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невязимости; 2) расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе; 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора. Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено как необходимостью уменьшения дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, так и дрейфа, вызываемого внешними магнитными полями вследствие эффекта Фарадея.

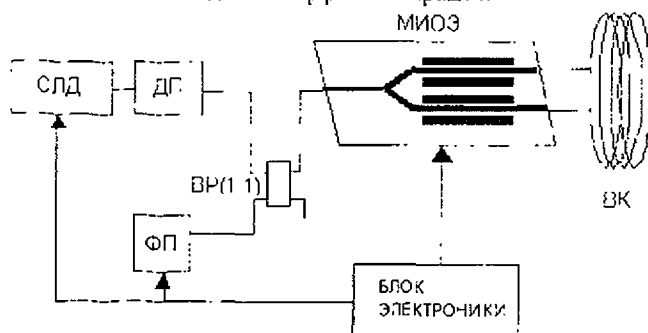


Рис. 1. Минимальная конфигурация одноосного гироскопа:

СЛД - суперлюминесцентный диод, ДП - деполаризатор, 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 фотодетектора 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 известным 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 сильно зависит от параметров оптического блока. Шум прибора тем меньше, чем больше выходная мощность СЛД и чем меньше потери оптических элементов, включая волокно, сохраняющего состояние поляризации, типа PANDA. Минимальная измеряемая скорость вращения зависит от коэффициента перекрестной поляризационной связи ( $h$ -параметра) и длины поляризационных биений  $L_p$  волокна следующим образом [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 волокне типа PANDA. В табл. 1 представлены параметры изготавливаемых на предприятии «Оптолинк» волоконных световодов, сохраняющих состояние поляризации света.

Таблица 1

Параметры волокна, 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	$<10^{-5}$ /м
Потери, дБ/км	$<3$	$<2$
Длина волны отсечки, нм	680 -780	1250 -1450
Длина биений, мм	$<3$	
Тип	PANDA	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. В действительности волокно является и эластичным 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	$\pm 10$	$\pm 30$	$\pm 100$	$\pm 200$
Дрейф смещения при постоянной температуре, град/ч	$<0,01$	$<0,1$	$<1,0$	$<10,0$
Погрешность масштабного коэффициента, %	$\leq 0,01$	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	$\leq 0,05$
Полоса пропускания, Гц	$>10$	10-30	$>100$	$>100$
Шум, град/ $\sqrt{ч}$	$\leq 0,001$	$\leq 0,003$	$<0,005$	$\leq 0,01$
Длина ВК, м	2000	1000	500	200
Масса, кг	1,2	0,8	0,8	0,8
Размеры, мм	$\varnothing 250 \times 40$	$\varnothing 150 \times 40$	$\varnothing 150 \times 40$	$\varnothing 150 \times 40$
Выход	RS232	RS232	RS232	Аналог

Таблица 3

Параметры трехосного ВОГ TRS-500

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

Наши 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, %  $50 \pm 1$ ;

избыточные потери, дБ 0,1.

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

потери оптической мощности, дБ  $< 0,5$ ;

степень остаточной поляризации: излучения при ширине спектральной линии 15 нм, %:  $< 0,1$ .

МИОЭ изготавливаются на кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  методом высокотемпературного прогонного обмена [3]. Этот метод дает возможность достижения следующих значений основных параметров МИОЭ:

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

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

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 с 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 (УТР);

термодатчик для формирования сигнала рассогласования в УТР;

фотодиод на основе кремниевой  $p-i-n$  структуры для формирования сигнала управления в стабилизаторе мощности света (СТМС).

Конструктивно 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  $\lambda = 0,835$  мкм не менее 0,3 А/Вт в момент нарастания и спада фронта импульсного сигнала не более 2 нс.

Конструктивно фотодиод выполнен в герметичном корпусе со встроенным многомодовым волоконным световодом. Принятие решения 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 и доступны именно для этой области длин волн.

Есть два основных источника погрешности масштабного коэффициента: 1) конечное время спада и 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. Дрейф смещения составляет величину менее 0,1 град/ч.

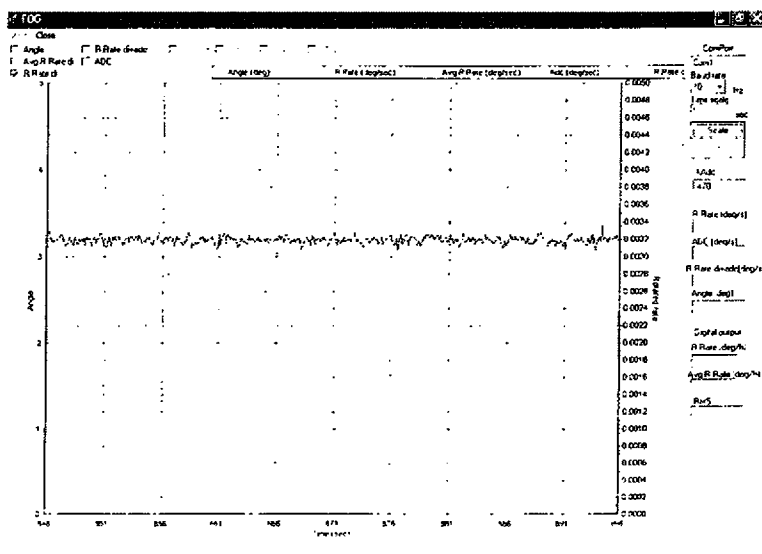


Рис. 2. Некомпенсированный выходной сигнал SRS-1000 при комнатной температуре

Стабильность смещения нулевого сигнала достигается благодаря применению волокна, поддерживающего поляризацию излучения, и МИОУ 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 уходам выходного сигнала не более 0.002 град/ч.

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

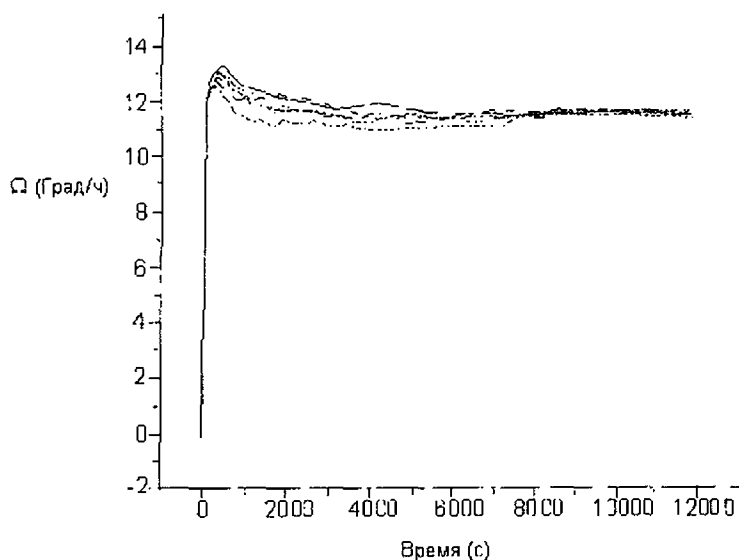


Рис. 3. Стабильность смещения SRS-500 в шести запусках

Одноосные ВОГ находят применение при построении гирокомпасов. Это связано с тем, что с их помощью возможна идентификация направления оси вращения Земли, а значит определение направления на север. 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, что позволяет измерять составляющую скорости Земли в каждом из направлений. 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, соответственно (рис. 4). Амплитуда этого сигнала равна локальной горизонтальной составляющей скорости вращения Земли, а его фаза определяет искомое направление.

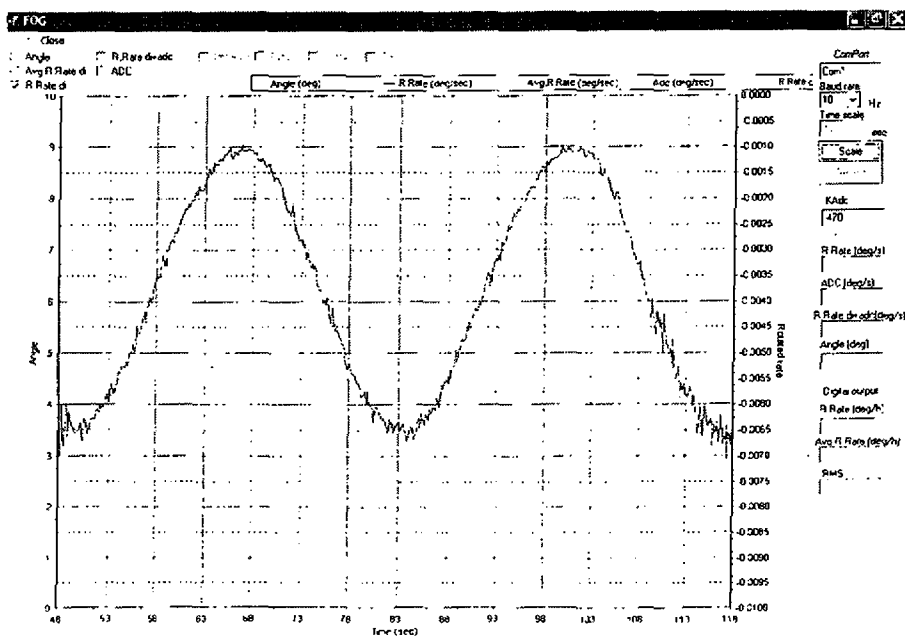


Рис. 4. Выходной сигнал SRS-1000 в зависимости от вращения при работе прибора в режиме гирокомпаса

## 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.

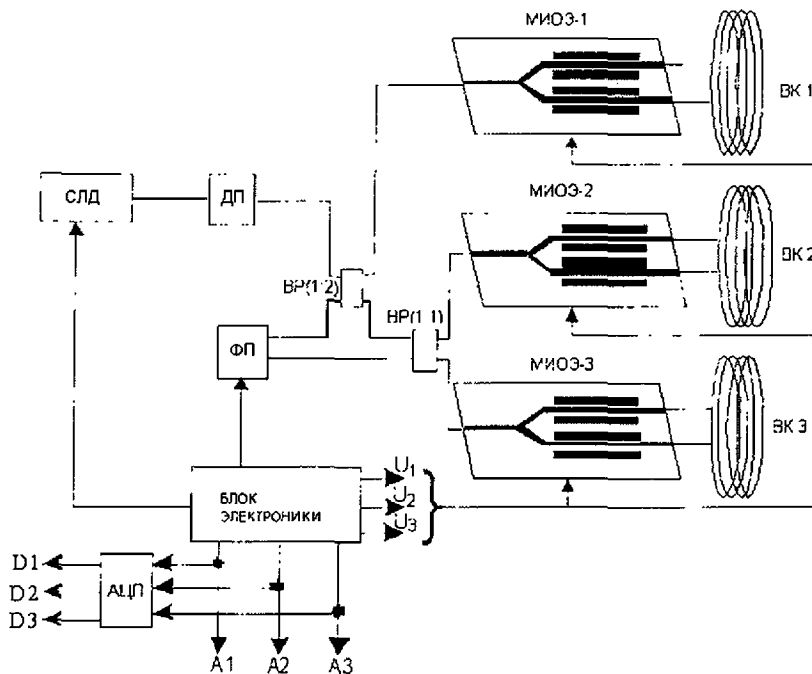


Рис. 5. Конфигурация трехосного гироскопа

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

$$\varphi_{rs} = K_{\Phi M} U \quad (4)$$

где  $K_{\Phi M} = \frac{\pi}{V_{\pi}}$  — 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. Мы воспользовались тем обстоятельством, что 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 одноосевые 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.

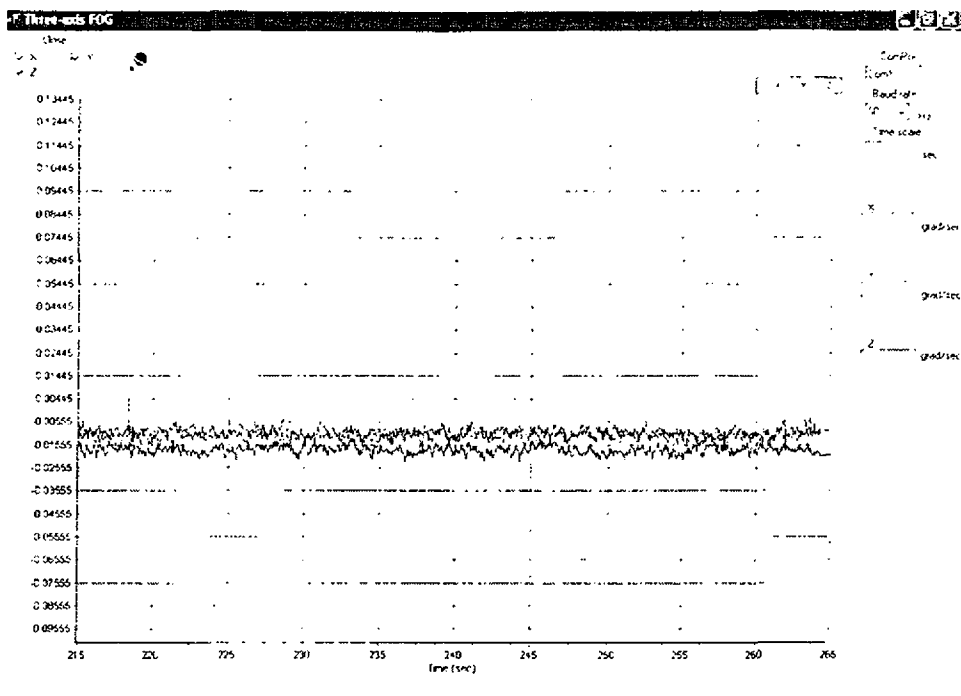


Рис. 6. Некомпенсированный выходной сигнал TRS-500 при комнатной температуре

Трехосный гироскоп TRS-500 чувствителен к скорости вращения Земли и также может быть применен для построения гироскомпыса. 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.

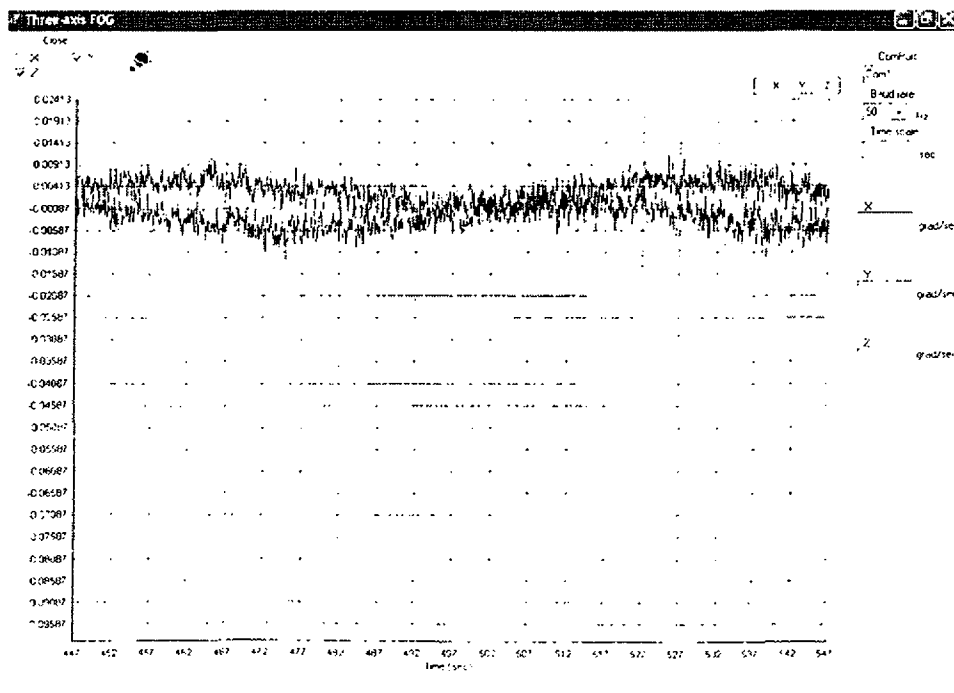


Рис. 7. Выходной сигнал TRS-500 в зависимости от вращения при работе прибора в режиме гироскомпыса

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

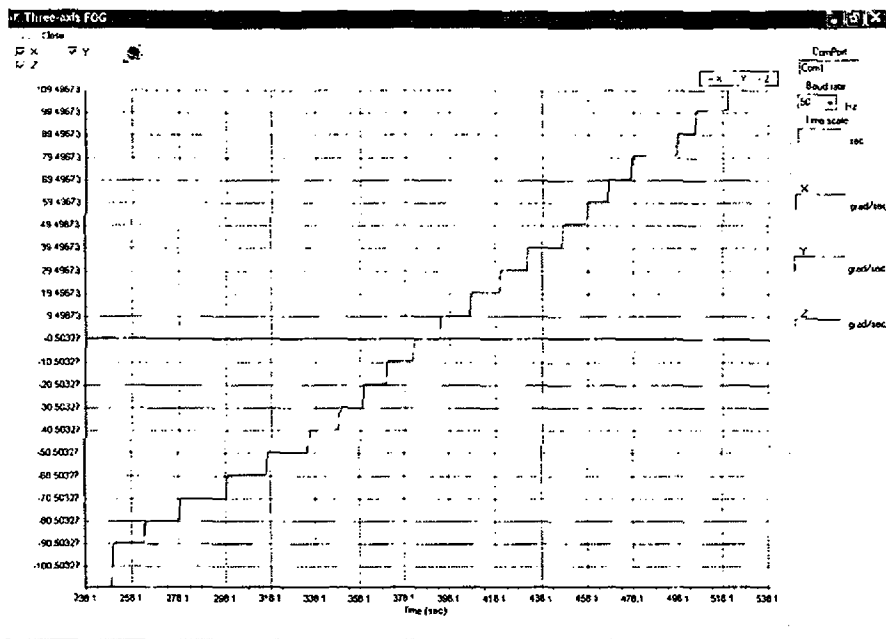


Рис. 8. Выходной сигнал TRS-500 при изменении скорости вращения вокруг одной из осей.

### 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 было меньше.

### Заключение

Представлены достижения в разработках и изготовлении 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 и начале 2005 гг. 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.