

МИНИАТЮРНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ

КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

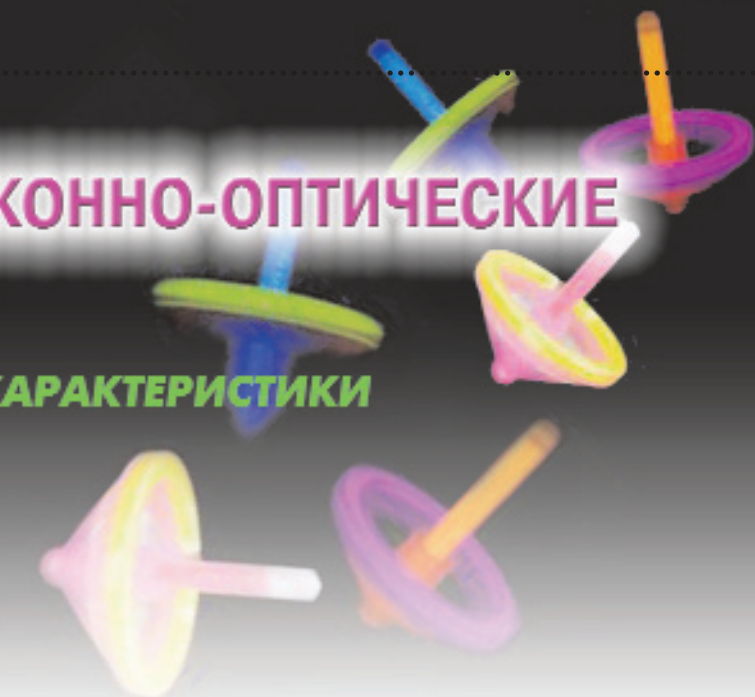
Волоконно-оптические датчики вращения, или волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), – одни из наиболее совершенных измерителей угловой скорости. Они надежны, поскольку не имеют вращающихся частей и вакуумируемых полостей. Рассматривается конструкция, технология изготовления и характеристики миниатюрных ВОГ, которые разрабатывает и производит предприятие "Физоптика".

ВОГ обладают рядом технических преимуществ по сравнению с более "старыми" механическими и лазерными гироскопами. Перечислим их.

- Высокие эксплуатационные характеристики: надежность, долговечность и устойчивость к ударам и вибрациям, малые габариты, масса и энергопотребление, совместимость с микросистемными устройствами обработки информации.
- Высокие метрологические характеристики: высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, малый дрейф нуля и малое время выхода на режим.
- Высокая технологичность в серийном производстве.
- Низкая стоимость.

Методика измерения угловой скорости с помощью ВОГ основана на эффекте Саньяка. Кроме того, в ВОГ наблюдается множество других, малоисследованных физических явлений: поляризационные эффекты, термооптический, магнитооптический и нелинейный эффект Керра и т. д. Вызванный ими дрейф нуля может намного превосходить полезный сигнал. Как уменьшить дрейф нуля в условиях технических и экономических ограничений? Этот вопрос заботит разработчиков на протяжении многих лет. Высокие метрологические характеристики ВОГ достигаются путем оптимальной фильтрации оптических и электрических сигналов.

"Физоптика" разрабатывает и производит миниатюрные ВОГ среднего класса: дрейф нуля 0,1–100 град/ч, точность коэффициента преобразования 0,1–1 % [1]. Конкурен-



В.Листвин, В.Логозинский

способными ВОГ среднего класса делает их стоимость, габариты и масса. Оптимизировать эти показатели можно с помощью наиболее простой схемы прямого детектирования угловой скорости (схема с разомкнутой петлей обратной связи open loop) (рис.1) и цельноволокновой технологии изготовления оптической части. Рассмотрим особенности конструкции, технологию изготовления и эксплуатационные характеристики миниатюрных ВОГ.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОГ

ВОГ состоит из двух основных узлов (рис. 1, 2): волоконно-оптического преобразователя вращения и блока электроники. Преобразователь вращения представляет собой волоконный кольцевой интерферометр с интегрированным в него излучательным модулем на основе суперлюминесцентного диода (СЛД), работающего на длине волны 0,83 мкм. СЛД обладает большой яркостью и низкой когерентностью. Это позволяет уменьшить сдвиг нуля, который возникает из-за нелинейного эффекта Керра, обратного релеевского рассеяния света в волокне и поляризационной компоненты.

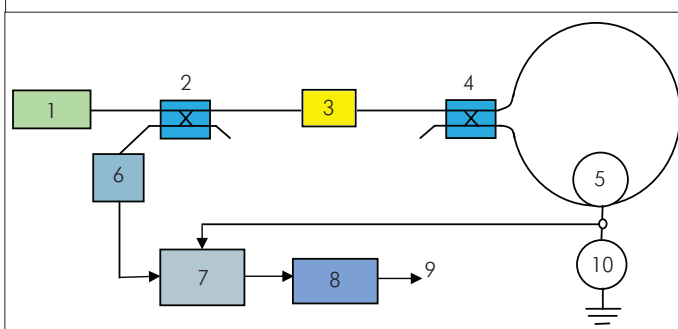


Рис.1. Схема ВОГ с гармонической фазовой модуляцией (open loop): 1 – источник, 2 – второй ответвитель, 3 – поляризатор, 4 – первый ответвитель, 5 – фазовый модулятор, 6 – фотоприемный модуль, 7 – синхронный детектор, 8 – процессор, 9 – выход, 10 – генератор



Блок электроники содержит синхронный детектор с периодической калибровкой нуля и контролем фазы опорных импульсов [2]. В блок интегрирован фотоприемный модуль (ФПМ) на основе кремниевого *p-i-n*-диода. Блок также управляет фазовым модулятором и источником излучения. Элементы в преобразователе вращения расположены в соответствии с минимальной конфигурацией ВОГ: поляризатор и отрезок волокна между поляризатором и первым ответвителем производят пространственную и поляризационную фильтрацию излучения. Требования к качеству поляризатора очень высоки. Поэтому для эффективной поляризационной фильтрации излучения в ВОГ нужны поляризаторы с экстинкцией до 60 дБ. Кроме того, поляризатор должен быть компактным и обязательно волоконным.

Для детектирования сигнала вращения используют фазовую модуляцию с последующим синхронным детектированием. При фазовой модуляции отклик интерферометра на первой гармонике частоты модуляции пропорционален $\sin \varphi_c$ (φ_c – сдвиг фаз при вращении интерферометра) и сигнал на выходе ВОГ при малых угловых скоростях линеен ($\sin \varphi_c \sim \varphi_c$). Фазовая модуляция производится за счет периодического растяжения участка волокна, намотанного на пьезокерамическое кольцо фазового модулятора.

К синхронному детектору предъявляют высокие требования, поскольку на частоте модуляции, кроме полезного сигнала, присутствует также и сигнал помехи, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ (квадратурный сигнал). Он возникает из-за амплитудной модуляции излучения (в основном из-за модуляции состояния поляризации). Квадратурный сигнал может превосходить полезный сигнал в сотни раз [3].

Схема с прямым детектированием чувствительна к изменению длины волны, мощности источника излучения, индексу модуляции, потерям света в волокне и электронным дрейфам. Блок электроники проектируется так, чтобы снизить влияние этих факторов. Он реализован в виде четырехслойной печатной платы 40×50 мм, которую собирают по технологии поверхностного монтажа.

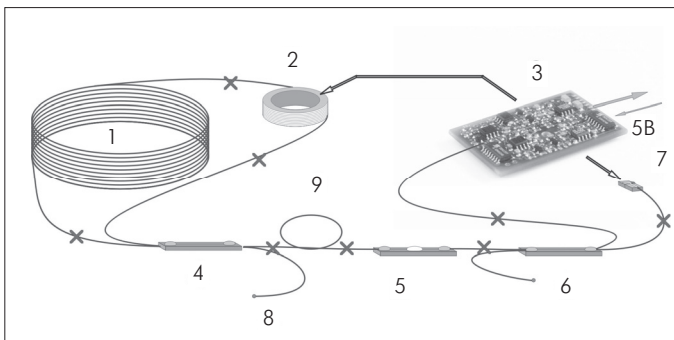


Рис.2. Преобразователь вращения (до укладки в корпус). Крестиками указаны места сварных соединений волокон (виртуальных): 1 – оптический контур, 2 – фазовый модулятор, 3 – блок электроники, 4 – первый ответвитель, 5 – поляризатор, 6 – второй ответвитель, 7 – СЛД, 8 – оптическая заглушка, 9 – пространственный (модовый) фильтр

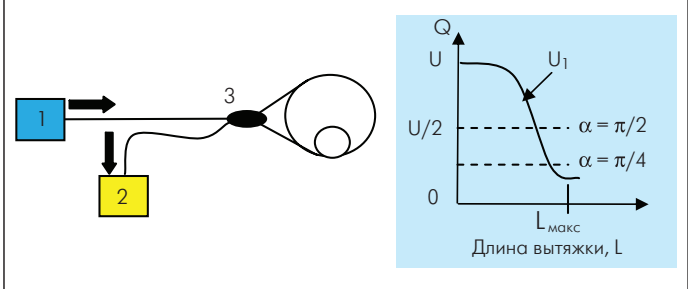


Рис.3. Изготовление первого ответвителя: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОГ

В схеме с прямым детектированием стоимость ВОГ минимальна. Оптическая часть схемы целиком состоит из волоконных элементов (без использования интегральной оптики). Обычно применяют готовые волоконные элементы, которые соединяются с помощью сварки. Сварка волокон усложняет и удорожает производство. Изготовить миниатюрный прибор трудно, так как соединений волокон получается много (рис. 2), и волокна нужно укладывать специальным образом в корпусе датчика.

В "Физоптике" разработана уникальная технология, позволяющая получать оптические компоненты (контур, модулятор, ответвители и поляризатор) из одного отрезка волокна без сварных соединений [1, 4, 5, 6]. Для того, чтобы создать оптическую часть ВОГ, необходимо минимальное количество исходных компонентов: пьезокерамическое кольцо и чип СЛД. Особенность технологии – специальное тонкое волокно (диаметр кварцевой оболочки ~ 40 мкм). Длина оптических компонентов (ответвителя и поляризатора) не превышает 15 мм, что позволяет собирать миниатюрные датчики. Например, датчик ВГ941-3AS помещается в корпусе с размерами $\varnothing 25 \times 55$ мм.

Последовательность операций производства ответвителей и поляризатора схематически изображена на рис. 3, 4, 5.

Первый ответвитель изготавливается после намотки волокна на катушку и на модулятор (рис. 3). С концов волокна удаляется полимерное покрытие. Очищенные участки волокон фиксируются. Затем начинается их вытяжка в дуге ВЧ-разряда. При этом волокна утончаются и сплавляются так, что мощность излучения начинает перекачиваться из одного волокна в другое. Процесс контролируется по сигналу фотоприемника, установленного на выходе волокна (U_1). Вытяжка прекращается, когда сигнал на фотоприемнике достигает минимума. При этом ответвитель делит мощность пополам (3-дБ ответвитель). Величина минимального сигнала зависит от угла разворота осей двулучепреломления волокон в первом ответвителе (α). При $\alpha = 0$ сигнал в минимуме равен нулю – вся мощность излучения отражается от контура. При $\alpha = \pi/2$ сигнал в минимуме равен $U/2$ – половине напряжения в начале вытяжки. Процесс завершается припайкой ответвителя к кварцевой подложке и заливкой гелем.

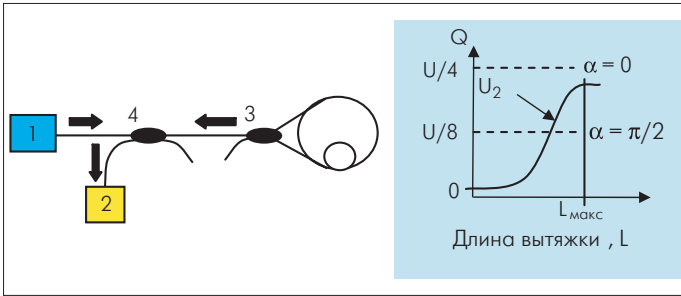


Рис.4. Изготовление второго ответвителя: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель, 4 – второй ответвитель

Второй ответвитель формируется по той же технологии. В минимальной конфигурации ВОГ он служит для передачи излучения, отраженного от оптического контура, на фотоприемник. Свободный конец волокна укладывают параллельно концу волокна, к которому подключен СЛД, а затем отрезают. Соединенные между собой участки волокон вытягиваются и сплавляются так, чтобы получить 3-дБ ответвитель. Вытяжка волокон прекращается, когда сигнал на фотоприемнике (U_2) достигает максимума (рис.4).

После изготовления ответвителей формируется поляризатор. Это важнейший компонент датчика, так как его качество (потери и коэффициент экстинкции) в значительной степени определяют величину дрейфа нуля. Сначала на участке волокна, расположенного между ответвителями, вытягивается биконический переход. Затем перетяжка биконического перехода зарастивается кристаллом моноатровой селитры так, что оптическая ось кристалла перпендикулярна волокну. Поляризирующая способность поляризатора обусловлена двулучепреломлением кристалла. Показатель преломления для обыкновенной волны больше, а показатель преломления необыкновенной волны меньше показателя преломления перетяжки из кварцевого стекла. Такой поляризатор пропускает волну только одной поляризации, а его коэффициент экстинкции находится в диапазоне 40–60 дБ [4].

Важный элемент технологии – возможность юстировки разрешенного направления поляризатора относительно оси двулучепреломления волокна, которое находится между поляризатором и первым ответвителем. Разрешенное направление поляризатора должно быть развернуто под углом $\rho = 45^\circ$ к осям двулучепреломления волокна. При этом сигнал на выходе не зависит от разворота осей двулучепреломления волокон в первом ответвителе (рис. 5). Юстировка поляризатора

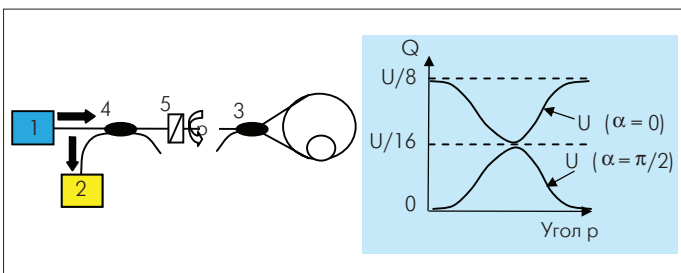


Рис.5. Юстировка поляризатора: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель, 4 – второй ответвитель, 5 – поляризатор

производится путем поворота конического перехода со стороны контура. После юстировки поляризатор закрепляют на кварцевой подложке и заливают гелем. Ориентация разрешенного направления поляризатора к оси двулучепреломления волокна позволяет уменьшить чувствительность датчика к магнитному полю. Поэтому, когда к чувствительности датчика к магнитному полю предъявляются высокие требования, юстировка должна быть максимально точной.

Завершающий этап производства оптической части датчика – подсоединение волокон к излучателю и фотоприемнику. И здесь важно согласовать волокно с излучателем. Для этого используется специальный технологический прием: кристалл СЛД и волокно припаиваются к двум медным блокам, которые юстируются на максимум сигнала и спаиваются между собой низкотемпературным припоем. Изготовленные по "сплавной" технологии компоненты долговечны и очень устойчивы к механическим и тепловым воздействиям. В конце сборки ВОГ устанавливают оптические компоненты в корпус датчика и заливают защитным силиконовым гелем.

Таким образом, для технологии "Физоптики" характерны минимальное количество операций (намотка и термообработка) и малое количество первичных компонентов (волокно и чип СЛД). Эти факторы сокращают время изготовления и, соответственно, себестоимость датчика.

ПОГРЕШНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОГ

Выходной сигнал ВОГ выражается через величину измеряемой угловой скорости Ω с помощью масштабного коэффициента (МК):

$$U_{\text{вых}} = \text{МК} \times \Omega + U_{\text{д}} + U_{\text{ш}}$$

где $U_{\text{д}}$ – медленно меняющееся напряжение (сдвиг нуля), $U_{\text{ш}}$ – шумы. Величина МК определяется параметрами преобразователя вращения и блока электроники. Значения МК приведены в табл.1.

Таблица 1. Значения МК и $\Omega_{\text{макс}}$ для основных типов датчиков

Параметр	Тип датчика				
	910Ф	941-3AS	951	035	949П
МК, мВ/град/с	10	5	25	20	7
$\Omega_{\text{макс}}$, град/с	300	500	80	100	400

Кроме полезного сигнала, выходной сигнал ВОГ содержит также мультипликативную и аддитивную погрешность. Мультипликативная погрешность вызвана искажениями МК, а аддитивная погрешность представляет собой сумму медленно меняющегося напряжения (сдвиг нуля) $U_{\text{д}}$ и "белого" шума $U_{\text{ш}}$ (рис.6). В зависимости от механизмов, приводящих к сдвигу нуля, его подразделяют на электронный, квадратурный и оптический [7, 8, 9].

Электронный сдвиг нуля вызван смещением операционных усилителей, динамической ошибкой детектирования и взаи-

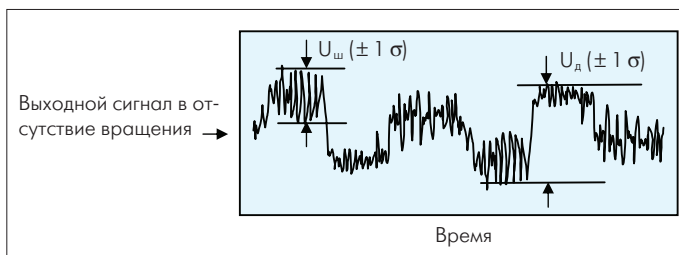


Рис.6. Выходной сигнал ВОГ в отсутствие вращения

мольствием аналоговых цепей. Для него характерны плавная температурная зависимость и хорошая воспроизводимость.

Квадратурный сдвиг нуля возникает из-за модуляции двухлучепреломления в фазовом модуляторе. В результате появляется паразитный квадратурный сигнал (сдвинутый на $\pi/2$ относительно полезного сигнала). Этот сигнал не подавляется полностью синхронным детектором. Он характеризуется квазисинусной зависимостью от температуры с периодом от долей до единиц градуса. Оптический сдвиг нуля появляется в магнитном поле из-за эффекта Фарадея и при тепловых ударах из-за эффекта Шупа и из-за поляризационной анизотропии контура (при малых значениях коэффициента экстинкции поляризатора). Этот паразитный сигнал находится в фазе с полезным сигналом и в отличие от квадратурного сигнала не может быть уменьшен с помощью синхронного детектора.

Шумы зависят от мощности излучения на входе в фотоприемник. Минимальное значение угловой скорости, которое можно обнаружить, ограничивается как шумами датчика, так и дрейфом нуля – в зависимости от времени усреднения сигнала. В системах стабилизации и контроля, где время измерения мало, чувствительность датчика ограничена шумами. В навигационных системах, где величину угла поворота находят путем интегрирования угловой скорости, ограничивающим фактором является дрейф нуля [10].

При малых угловых скоростях точность измерения угла ограничивается аддитивными погрешностями – дрейфом нуля и шумами, а при больших скоростях мультипликативной погрешностью – стабильностью МК. Требования к величине шумов, дрейфу нуля и стабильности МК для навигационных систем различного уровня приведены в табл. 2.

Таким образом, в навигационных системах наряду с шумами и дрейфом нуля ограничителем выступает стабильность МК. В схеме прямого преобразования стабильность МК обычно не выше 0,1 %, поэтому такие датчики относят к среднему

Таблица 2. Требования к величине шумов, дрейфу нуля и стабильности МК в различных системах

Класс датчика	Параметр		
	Шум, град/√ час	Дрейф нуля, град/час	Стабильность МК, ppm
Инерциальный класс	< 0,001	< 0,01	< 5
Средний класс	от 0,5 до 0,05	от 0,1 до 10	от 10 до 1000
Измеритель скорости	> 0,5	от 10 до 1000	от 1000 до 10000

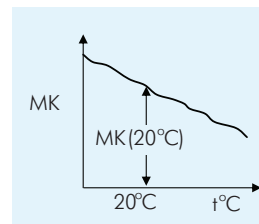
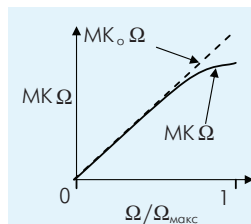


Рис.7. Зависимости МК от угловой скорости и температуры

классу точности. Температурные и нелинейные искажения МК датчика, построенного по схеме прямого преобразования, можно представить в виде

$$MK(t^{\circ}, \Omega) = MK_0 \cdot k_t \cdot k_{\Omega},$$

где $k_t = 1 - T_1 \cdot t^{\circ} + T_2 (t^{\circ})^2$ и $k_{\Omega} = 1 - K_2 (\Omega/\Omega_{\text{макс}})^2 - K_4 (\Omega/\Omega_{\text{макс}})^4$ – квазилинейные функции температуры t° и угловой скорости (рис.7), MK_0 – значение МК при нормальных условиях, а K_2, K_4, T_1, T_2 – корректирующие коэффициенты. Нелинейность МК обусловлена выходным сигналом, пропорциональным $\sin \varphi_c$. А нелинейность (до 15–20%) – максимальным сдвигом фаз, возникающим в интерферометре ($\varphi_c \cong 1$ радиан при $\Omega = \Omega_{\text{макс}}$). Как правило, $K_2 \cong 0,1$, а $K_4 \ll K_2$. Зависимость МК от температуры – квазилинейная функция, которая определяется в основном зависимостью от температуры длины волны излучения СЛД. Это соответствует $T_1 \cong 0,05 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, а $T_1 \gg T_2$.

Таблица 3. Основные параметры базовых моделей ВОГ

Характеристика	Модель				
	ВГ910Ф	ВГ941-3AS	ВГ949П	ВГ951	ВГ035К
Макс. измеряемая скорость, град/с	300	500	400	80	150
Точность преобразования, %	0,1	1	1	0,1	0,1
Чувствительность (1 Гц, 1 σ), град/с	0,002	0,003	0,005	0,0003	0,001
Дрейф (после коррекции, 1 σ), град/с	0,005	0,01	0,005	0,0003	0,00003
Полоса частот выходного сигнала, Гц	450	1000	1000	450	450
Габариты (диаметр/высота), мм	80/20	25/60	60/20	150/30	120/25
Вес, г	110	40	50	700	300

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОГ

"Физоптика" производит несколько моделей ВОГ (табл.3). Перечислим их преимущества:

- бесшумная работа;
- мгновенный запуск (0,01– 0,1 с);
- мгновенная реакция на вращение (полоса частот до 1000 Гц);
- низкое энергопотребление (менее 2 Вт);
- низковольтное однополярное питание (+ 5 В);
- высокая надежность (наработка на отказ в нормальных условиях до 50 000 ч);
- срок службы – до 15 лет (количество запусков не ограничено).

Так, ВГ910 оптимально сочетает в себе точность, габариты и стоимость. Применяется в навигационных системах подвижных наземных объектов, для стабилизации ТВ-камер, в системах контроля, в GPS интегрированных системах. ВГ941-3AS – самый миниатюрный ($\varnothing 25 \times 60$ мм) и легкий (40 г) датчик с прочной конструкцией. ВГ035К – точный датчик (0,1 град/ч). Он предназначен для прецизионного тестирования и навигационных систем. ВГ949П – первый прибор в пластиковом исполнении для широкого коммерческого использования.

Все приборы могут эксплуатироваться:

- при температуре окружающей среды $-30...70^{\circ}\text{C}$;
- при вибрациях с амплитудой до 6 g с частотой от 20 Гц до 2 кГц;
- после ударов до 90 g.

Области применения ВОГ постоянно расширяются. Конструкции и технологии непрерывно модернизируются. Кроме того, благодаря использованию пластиковых узлов приборы в скором времени станут дешевле, а также сократится время их производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Logozinski V., Semenov A. Proc., Fib. Opt. Las. Sen. 23–26 May, 1994, Boston: Boston, Univ., SPIE vol. 1585. 1994, p.284–285.
2. Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V. Proc. 8-th. Int. Conf. Navig. Syst. 28–30 May 2001. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 2001, p.49.
3. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 5-th. Int. Conf. Navig. Syst. 25–27 May, 1998. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1998, p.233–238.
4. Logozinski V., Glavatskih N. Proc. Symp. Gyr. Techn. 21–23 September, 1992. Stuttgart: Stuttgart Univ. 1992, p. 3–11.
5. Listvin V., Logozinski V., Solomatin V. Opt. Gyr. Appl. RTO-AG-339. 1999, p.9–18.
6. Logozinski V., Listvin V., Solomatin V. Proc. 13-th Int. Conf. Opt. Fib. Sen. (OFS-13) 22–25 July 2000, Seoul: Seoul KIST, SPIE v. 3746, 2000, p.113–115.
7. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 1-th. Int. Conf. Navig. Syst. 25–26 July 1994. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1994, p.153.
8. Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V. Proc. 9-th. Int. Conf. Navig. Syst. 27–29 May, 2002. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 2002, p.327.
9. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 4-th. Int. Conf. Navig. Syst. 26–28 May, 1997. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1997, p.19–22.
10. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 2-th. Int. Conf. Navig. Syst. 24–25 May, 1995, St.Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1995, p.57–59.

