

## Разработка канала измерения угловой скорости на основе цифрового волоконно-оптического гироскопа

А. Н. Пестунов<sup>1</sup>, Е. В. Ковалева

<sup>1</sup>к. т. н.  
АО «НПО ИТ»

e-mail: npoit@npoit.ru

**Аннотация.** Статья посвящена разработке канала измерения угловой скорости на основе цифрового волоконно-оптического гироскопа. Разработка проводится с целью снижения влияния дрейфов микросхем на точность измерения угловой скорости ВОГ без обратной связи. В статье приведены результаты численного моделирования метода цифровой обработки сигнала трансимпедансного усилителя в волоконно-оптическом гироскопе без обратной связи. Проведена оценка потенциального качества измерения угловой скорости данным методом, а также оценка качества измерения основных параметров, стабилизируемых в ВОГ без обратной связи. Результаты получены путем численного моделирования работы 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения, а также обработки сигнала АЦП фильтрами с конечной импульсной характеристикой при условиях приближения шумовых характеристик сигнала трансимпедансного усилителя к реальным. Моделирование проводилось при помощи пакета MathCad. В результате моделирования показано, что потенциально достижимая точность измерения угловой скорости данным методом составляет 0,01% при частоте дискретизации 50 МГц. Полученные результаты доказывают возможность применения данного метода в текущих разработках бесплатформенных инерциальных блоков (БИБ) на ВОГ без обратной связи, а также возможность реализации описанного принципа построения углоизмерительного канала с применением ЭРИ отечественного производства.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп без обратной связи, цифровая обработка сигнала, цифровой фильтр

## Development of Angular Velocity Measurement Channel Based on Digital Fiber-Optic Gyroscope

A. N. Pestunov<sup>1</sup>, E. V. Kovaleva

<sup>1</sup>candidate of engineering science  
Stock company "Scientific-production Association measuring equipment"

e-mail: npoit@npoit.ru

**Abstract.** The article is devoted to the development of channels for angular velocity measurement based on a digital fiber-optic gyroscope (FOG). The development is carried out to reduce the impact of microcircuit drift on the accuracy of angular speed measurement of open-loop FOG. The results of numerical simulation of the digital processing method of the transimpedance amplifier signal in open-loop FOG are presented. The estimation of the potential measurement quality of angular velocity by this method is performed, as well as the evaluation of the measurement quality of key parameters stabilized in open-loop FOG. The results were obtained from a numerical simulation of a 14-bit analog-to-digital converter (ADC) of successive approximation, as well as ADC signal processing with filters with finite pulse characteristic, in realistic noise conditions for a transimpedance amplifier signal. The simulation was performed using the MathCad. The simulation shows that the potentially achievable accuracy of angular velocity measurement by this method is 0,01% at a sampling rate of 50 MHz. The results demonstrate the possibility of using this method in the current development of strapdown inertial blocks (SIB) in open-loop FOG, as well as the possibility of implementing the described building principle of the angle-measuring channel using Russian electronic components.

**Keywords:** open-loop fiber optic gyroscope, digital signal processing, digital filter

## Введение

Характерная особенность волоконно-оптических гироскопов, применяемых в малогабаритных бесплатформенных инерциальных блоках производства АО «НПО ИТ», — отсутствие оптической обратной связи.

Для обработки информации волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) применяется аналоговая схема синхронного детектирования со стабилизацией оптической мощности суперлюминесцентного диода (СЛД).

В настоящее время развитие техники цифровой обработки сигналов позволяет применять для получения информации с ВОГ оцифровку полигармонического сигнала с последующей обработкой в сигнальном процессоре или на ПЛИС. Подобные методы обработки сигнала ВОГ применяются зарубежными фирмами, например фирмой KVH [5], для БИБ с характеристиками, аналогичными характеристикам приборов, выпускаемых АО «НПО ИТ».

Статья посвящена рассмотрению одного из возможных вариантов построения канала измерения угловой скорости с применением цифровой обработки сигнала. Настоящий метод отличается от метода, предложенного фирмой KVH, введением контуров стабилизации следующих параметров: индекса модуляции и оптической мощности.

## 1. Особенности электрофизической схемы канала измерения угловой скорости на ВОГ без обратной связи

Волоконно-оптический гироскоп содержит два функциональных блока: оптический и электронный. В оптическом блоке гироскопа при вращении оптоволоконного контура с распространяющимся в нем световым лучом формируется сложный электрический сигнал, содержащий высокочастотные составляющие, пропорциональные измеряемой угловой скорости.

В электронном блоке гироскопа выполняется избирательное линейное преобразование сигнала высокой частоты, сформированного в оптическом

блоке, в низкочастотный аналоговый электрический сигнал. Амплитуда низкочастотного электрического сигнала пропорциональна измеряемой угловой скорости.

В блоке электроники гироскопа формируются необходимые для работы оптического блока и измерительного тракта модулирующие и опорные сигналы высокой частоты, сигналы для подсистем автоматического регулирования режимов в контурах стабилизации индекса модуляции и оптической мощности излучающего диода.

Качество работы всех трактов в основном определяется стабильностью их амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, которые согласовываются с частотным спектром рабочих сигналов. Основная полоса рабочих частот лежит в диапазоне от 70 до 80 кГц и определяется рабочей частотой применяемого оптического фазового модулятора в оптическом блоке.

Аналитическое представление сигнала, формируемого в оптическом блоке и подвергаемого преобразованию в блоке аналоговой электроники гироскопа, имеет вид [1]:

$$\begin{aligned}
 I_{\Phi Д}(t) = I_{\Phi} \left\{ 1 + \cos(\psi_c) \cdot \left[ J_0(m) + \right. \right. \\
 \left. \left. + 2 \cdot \sum_{k=2n} J_k(m) \cdot \cos(k\omega t) \right] - \right. \\
 \left. - 2 \sin(\psi_c) \sum_{l=2n-1} J_l(m) \cdot \sin(l\omega t) + \right. \\
 \left. + 2 \sin(\varphi_0) \cdot J_1(m) \cdot \sin(\omega t) + \right. \\
 \left. + 2 \sin(\varphi_{СК}) \cdot J_1(m) \cdot \cos(\omega t) \right\}, \quad n = [1, \infty], \\
 I_{\Phi} = K_{\Phi Д} \cdot P_{\Phi Д},
 \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $I_{\Phi}$  — выходной ток фотодиода,  
 $K_{\Phi Д}$  — чувствительность фотодиода,  
 $P_{\Phi Д}$  — мощность оптического излучения,  
 $\psi_c$  — фаза Саньяка, рад,  
 $J_i(m)$  — коэффициенты функции Бесселя первого рода  $i$ -го порядка,  
 $m$  — индекс модуляции,  
 $\omega$  — круговая частота модуляции,  
 $\varphi_0$  — оптический сдвиг, рад,  
 $\varphi_{СК}$  — квадратурный сдвиг, рад.

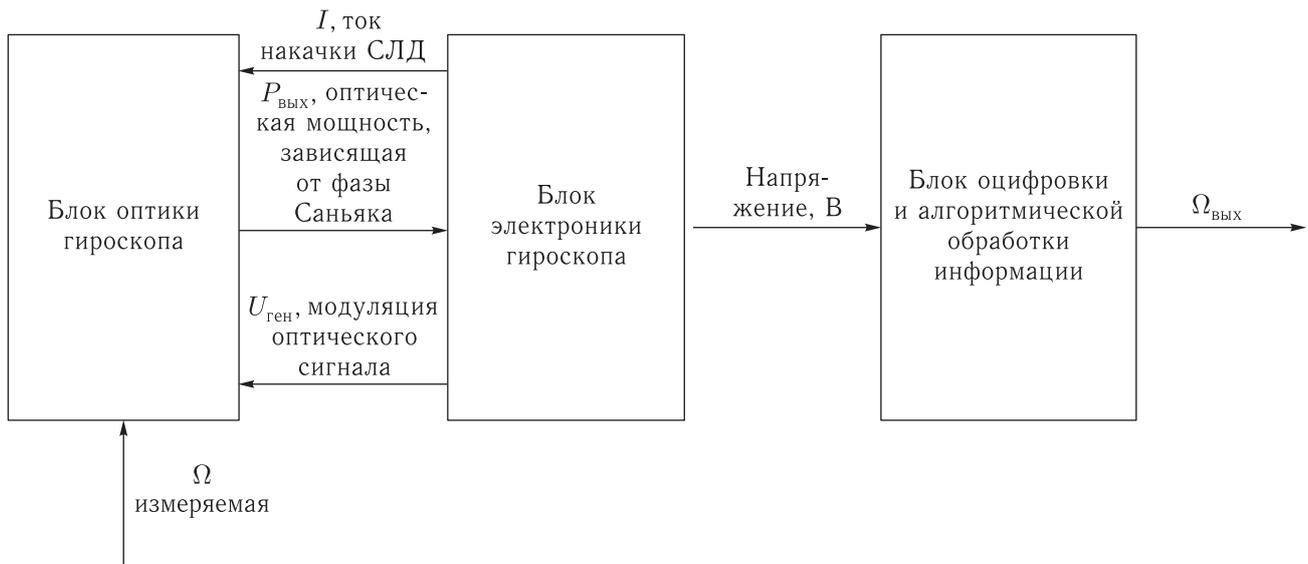


Рис. 1. Схема канала измерения угловой скорости

В выражении (1.1) составляющие  $k$ -го порядка представляют четные гармоники, составляющие  $l$ -го порядка — нечетные гармоники сигнала. Типовое значение частоты первой гармоники —  $75 \pm 5$  кГц.

Информационным сигналом, выделяемым в тракте аналогового преобразования сигнала ВОГ, является составляющая сигнала (1.1), приходящая на первую гармонику частоты фазовой модуляции излучения СЛД. Из формулы (1.1) видно, что полезный сигнал пропорционален синусу фазы Саньяка.

В гироскопах с аналоговой системой обработки сигнала напряжение с трансимпедансного усилителя приходит на синхронный детектор, который работает по первой гармонике напряжения, подаваемого на пьезомодулятор. Условия, обеспечивающие наилучшую точность измерения:

- оптимальное значение индекса модуляции ( $m = 1,84$ ), при котором масштабный коэффициент слабо чувствителен к внешним воздействиям;
- стабилизация мощности излучения СЛД;
- сдвиг по фазе между опорным напряжением и первой гармоникой сигнала (0).

На рис. 1 представлена схема канала измерения угловой скорости на основе ВОГ без обратной связи.

Как видно из рис. 1, канал измерения угловой скорости, основанный на аналоговом принципе обработки сигнала ВОГ, имеет сложную структуру и, как отмечено ранее, качество его работы зависит от стабильности характеристик каждого звена, кроме того, выходной сигнал принципиально нелинеен. Последнее обстоятельство заставляет применять многоступенчатые методы компенсации погрешности нелинейности, требующие значительных затрат времени и приводящие к усложнению модели погрешностей канала измерения угловой скорости.

Как альтернатива методу аналогового синхронного детектирования предлагается метод оцифровки сигнала непосредственно после преобразователя ток–напряжение.

## 2. Основные принципы цифровой обработки сигнала ВОГ

Суть метода состоит в оцифровке сигнала сразу после трансимпедансного усилителя и дальнейшем детектировании гармоник с применением численных алгоритмов [5]. Так как при настройке индекса модуляции на значение  $m = 1,84$  основная часть энергии сигнала сосредоточена на первых четырех гармониках, то оцифровку сигнала можно осуществлять на частоте от 1 МГц,

что существенно расширяет выбор аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В данном методе применяется цифровая фильтрация посредством фильтров с конечной импульсной характеристикой. Такие фильтры имеют строго линейную фазовую характеристику и всегда устойчивы [2].

Импульсная характеристика полосовых фильтров определяется по формуле [4]

$$h(n) = \begin{cases} \frac{\lambda_U - \lambda_L}{\pi}, & m = 0 \\ \frac{1}{m\pi} [\sin(m\lambda_U) - \sin(m\lambda_L)], & m \neq 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

где

$$\lambda_U = \frac{f_U \pi}{f_d},$$

$f_U$  — нижняя частота среза фильтра,

$f_d$  — частота дискретизации,

$\lambda_L$  — параметр фильтра,

$$\lambda_L = \frac{f_L \pi}{f_d},$$

$f_L$  — верхняя частота среза фильтра.

Для сглаживания частотной характеристики фильтра применяется взвешивающее окно. Импульсная характеристика окна описывается формулой [4]

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right). \quad (2.2)$$

Нужная гармоника выделяется путем выполнения операции свертки дискретизованного сигнала с импульсной характеристикой фильтра:

$$s_n = \sum_{k=0}^n x_n \cdot h_{n-k}, \quad (2.3)$$

где  $x_n$  — отсчет дискретизованного сигнала,

$h$  — импульсная характеристика фильтра.

После обработки по полученным данным можно определить

– величину индекса модуляции, пользуясь постоянством соотношения значений функций Бесселя при заданном индексе модуляции:

$$m = \frac{A4}{A2} = \frac{K \cdot 2 \cdot J4(m) \cdot \cos(\varphi_c)}{K \cdot 2 \cdot J2(m) \cdot \cos(\varphi_c)} = \frac{J4(m)}{J2(m)}, \quad (2.4)$$

где  $A2$  — значение амплитуды второй гармоники,  $A4$  — значение амплитуды четвертой гармоники,  $J4(m)$ ,  $J2(m)$  — значения функций Бесселя четвертого рода и второго рода при индексе модуляции  $m$ ;

– постоянную составляющую сигнала, не зависящую от фазы Саньяка, которая может использоваться для стабилизации мощности излучения СЛД:

$$U_{\max} = \bar{S} - A2/2 = K \cdot (1 + J0(m) \cdot \cos(\varphi_c) - J2(m) \cdot \cos(\varphi_c)) \approx K, \quad (2.5)$$

где  $\bar{S}$  — среднее значение сигнала,

$A2$  — значение амплитуды второй гармоники,

$J2(m)$  — значение функции Бесселя второго рода при индексе модуляции  $m$ . Нужно отметить, что соотношение (2.5) верно только для  $m = 1,84$ . В этом случае из-за того, что  $J0(m) \cdot \cos(\varphi_c) - J2(m) \cdot \cos(\varphi_c) \approx 0,0009$ , постоянная составляющая может быть измерена с точностью до третьего знака после запятой;

– угловую скорость:

$$\omega = \frac{J2(m)}{J1(m)} \cdot \frac{1}{T_{\text{вог}}} \cdot \arctg\left[\frac{A1}{A2}\right], \quad (2.6)$$

где  $J1(m)$ ,  $J2(m)$  — значения функции Бесселя второго рода при индексе модуляции  $m$ ,

$T_{\text{вог}}$  — оптическая постоянная времени ВОГ,

$A1$  — значение амплитуды первой гармоники,

$A2$  — значение амплитуды второй гармоники.

Чтобы определить правильно направление вращения по формуле (2.6), необходимо знать соотношение фаз первой и второй гармоник. Фаза определяется по фазовому спектру с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

### 3. Результаты моделирования метода

Цели моделирования: определить точность вычисления величин  $m$ ,  $\omega$ ,  $U_{\max}$  при условиях, максимально близко воспроизводящих реальную шумовую картину.

Для моделирования выбрана схема обработки информации оптического блока гироскопа, представленная на рис. 2.

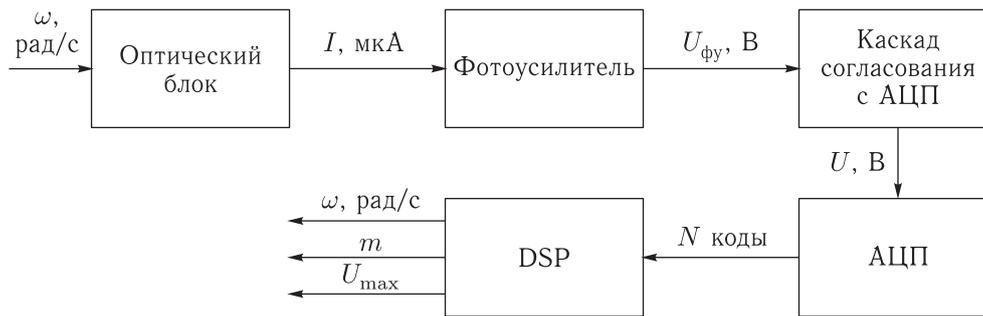


Рис. 2. Схема обработки информации оптического блока гироскопа

Т а б л и ц а. Результаты моделирования

Задаваемая величина фазы Саньяка, рад	ноль			$\pi/6$			$\pi/3$		
	100	50	1	100	50	1	100	50	1
Задаваемая частота дискретизации сигнала, МГц	100	50	1	100	50	1	100	50	1
Погрешность определения $\omega$ , %	–	–	–	0,006	0,14	0,4	0,01	0,05	0,1
Погрешность определения $m$ , %	0,01	0,03	0,5	0,02	0,13	0,25	0,04	0,05	0,05
Погрешность определения $U_{\max}$ , %	0,01	0,01	0,16	0,04	0,013	0,05	0,05	0,015	0,02

Моделирование проводилось при следующих условиях:

- сигнал гироскопа задавался с наложением случайного процесса — «белого шума»,  $3\sigma = 0,032$  В, что моделирует работу блока оптики, фотоусилителя и каскада согласования с АЦП;

- на входе системы задавались угловые скорости, которым соответствуют величины фазы Саньяка  $0, \pi/6, \pi/3$ ;

- имитировалась работа 14-разрядного АЦП последовательного приближения [3];

- выходные величины  $\omega$  и  $m$  и  $U_{\max}$  вычислялись по формулам (2.6), (2.4), (2.5).

Результаты моделирования приведены в таблице.

Из приведенных результатов можно сделать выводы.

При заданных условиях моделирования метод недостаточно чувствителен к малым угловым скоростям. Погрешность измерения высоких угловых скоростей достигает 0,01 % при частоте дискретизации 50 МГц. Для повышения точности измерения на угловых скоростях, близких к скорости вращения Земли, необходимо повысить разрядность АЦП как минимум до 16 разрядов.

Точность измерения индекса модуляции позволяет применять результат измерения в системе автоматической стабилизации напряжения генератора. В системе с аналоговой обработкой сигнала блока оптики выражение для выходной величины имеет вид (при скважности опорного сигнала 0,5 и нулевой разности фаз между информационным сигналом и опорным сигналом синхронного детектора):

$$U_{\text{вых}} = K \cdot J_1(m) \cdot \sin(\omega \cdot T_{\text{ВОГ}}),$$

где  $K = P \cdot C \cdot R$ ,

$P$  — оптическая мощность, приходящая на фотоприемник, Вт,

$C$  — коэффициент преобразования фотоприемника, А/Вт,

$R$  — сопротивление преобразователя тока-напряжение, Ом.

Потенциальная точность стабилизации величины первой гармоники при погрешности измерения  $\delta m = 0,4\%$  составляет порядка  $10^{-3}\%$ .

Что касается системы стабилизации оптической мощности, то при чувствительности мощности излучения СЛД к температуре  $10^{-5}$  Вт/°С (чувствительность тока СЛД 1 мА/°С, чувствительность мощности определяется по характеристикам используемой модели СЛД — SLD-57-МР) при воздействии скорости изменения температуры 0,2 °С/мин погрешность

приведенного метода поиска максимума позволит обнаружить изменение мощности за время не менее 1 с. Потенциальная точность стабилизации оптической мощности — 0,01 %.

## Заключение

Результаты моделирования метода цифровой обработки сигнала ВОГ доказывают возможность применения данного метода в текущих разработках БИБ, а также возможность реализации описанного принципа построения углоизмерительного канала с применением ЭРИ отечественного производства, при этом массогабаритные характеристики приборов сохранятся на уровне не более 1,3 кг.

## Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. Приложение А. М.: Техносфера, 2008.
2. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров / Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
3. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера. М.: Техносфера, 2007. 1016 с.
4. *Steven W. Smith*. The scientist engineer's guide to digital signal processing. Second edition. California Technical Publishing, 1997–1999.
5. *Steven Emge, Thomas Monte, Jeff Brunner, Robert Miller, Kalyan Ganesan*. Advances in Open-loop FOG Sensors. KVH Industries, Inc. 50 Enterprise Center, Middletown, RI 02842, 2006.