УДК 535

Д.А. Летов, Я.Д. Токарева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВОГО СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Представлены экспериментальные исследования величины степени остаточной поляризации источника излучения для волоконно-оптического гироскопа на примере эрбиевого суперлюминесцентного волоконного источника оптического излучения (ЭСВИОИ) и схемы деления оптической мощности. Рассчитан один из параметров шумового дрейфа волоконно-оптического гироскопа – случайный дрейф, вызванный неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока. Проведен сравнительный анализ DOP при нормальных условиях и в условии изменения температуры.

Ключевые слова: поляризация, степень остаточной поляризации (DOP), волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), эрбиевый суперлюминесцентный волоконный источник оптического излучения (ЭСВИОИ), случайный дрейф, деполаризованное излучение.

D.A. Letov, Y.D. Tokareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF RESIDUAL POLARIZATION OF RADIATION OF AN ERBIUM SUPERLUMINESCENT FIBER SOURCE FOR A FIBER-OPTICAL GYROSCOPE

Experimental studies of the magnitude of the residual polarization of the radiation source for a fiber-optic gyroscope are presented using the example of EFSSOR and the fission scheme of optical power. One of the parameters of noise drift is calculated – a random drift caused by the non-ideal polarization characteristics of the optical block. Comparative analysis of DOP during the temperature change and under normal conditions have been done.

Keywords: polarization, dilution of precision (DOP), fiber optic gyroscope, erbium fiber superluminescent source of optical radiation, depolarized radiation, random drift.

Введение

Более века механические гироскопы были единственной технологией, обеспечивающей точность и надёжность навигации самолетов, кораблей и наземной техники. Эти гироскопы со множеством деталей в процессе научного прогресса постепенно вытесняются более простыми по конструкции волоконно-оптическими гироскопами (ВОГ), работа которых основана на действии света.

Точность измерения отклонения курса от своей оси ВОГ навигационного класса точности достигает 0,01 град/ч [5]. Однако существует цель улучшить данный показателя до 0,001 град/ч. Для этого необходимо решить ряд поставленных задач. Первый путь решения – стабилизировать мощность излучения, но современных технологий уже недостаточно для усовершенствований в данном вопросе. Второй – исследовать мало изученную тему по эффекту поляризации нестабильности выходного излучения [1].

В качестве источника излучения ВОГ используется эрбиевый суперлюминесцентный волоконный источник оптического излучения (ЭСВИОИ). Излучение путём накачки в эрбиевом волокне, и пройдя ряд разветвительный, попадает на поляризатор, который пропускает только одну моду.

Исследуемый параметр – степень остаточной поляризации (DOP) – отражается на появлении дополнительных мод [2], что порождает шумы в выходном сигнале, тем самым снижает точность измерения гироскопа [3].

Актуальность данной работы заключается в том, что, решив вопрос по минимализации степени остаточной поляризации, можно достичь улучшения точности измерения на целый порядок.

Современные ЭСВИОИ позволяют генерировать практически деполаризованное выходное оптическое излучение (менее 1 %) [4].

В данной работе рассматриваются две проблемы: стабильность остаточной поляризации выходного оптического излучения и влияние температуры на стабильность степени остаточной поляризации (DOP) ЭСВИОИ. Предлагается сравнение значений степени остаточной поляризации и величины случайного дрейфа, который вызван неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока, ЭСВИОИ и схемы деления оптической мощности.

Дрейф – аддитивная величина, и одним из его параметров является случайный дрейф, который вызван неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока. Составляющая дрейфа, связанная с характеристиками источника излучения, описывается формулой:

$$Q = 2,05 \cdot 10^5 \cdot \frac{c \cdot \lambda}{\pi \frac{D}{z} L} \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\ln 2 \cdot h \cdot Lp \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot \Delta \lambda}}, \quad (1)$$

где c – скорость света, λ – средневзвешенная длина волны, D – внутренний диаметр ВК, L – длина контура, η – остаточная поляризация источника излучения, ε – коэффициент экстинкции поляризации, h – коэффициент межмодовой поляризационной связи ВК, Lp – длина поляризационных биений в световоде, $\Delta \lambda$ – ширина полосы пропускания источника излучения.

1. Описание экспериментального исследования

В волоконно-оптическом гироскопе источником излучения является широкополосный эрбиевый суперлюминесцентный волоконный источник (ЭСВИОИ). На рис. 1 представлена оптическая схема ВОГ.

Рис. 1. Оптическая схема ВОГ

В оптической схеме ВОГ мощность с ЭСВИОИ проходит через разветвитель, который используется для разделения сигнала (прямого и обратного) с волоконного контура. В связи с этим возникает задача: измерить степень остаточной поляризации (DOP) с излучателя и после

разветвителя. В итоге будет получена информация о степени остаточной поляризации ЭСВИОИ и излучения, поступающего в волоконный контур гироскопа.

Для анализа стабильности величины степени остаточной поляризации источника излучения для ВОГ при многократном включении была проведена оценка влияния разветвителя на DOP. В точка 1 и 2 (см. рис. 1) проводились замеры. После излучателя – 1, после разветвителя – 2.

Определение степени остаточной поляризации производилось при помощи устройства опроса – поляриметра Polarization Analyzing System.

Испытания проводились через 24 ч при температуре $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$. Время измерения составляло 15 мин.

Для анализа температуры на стабильность величины степени остаточной поляризации источника излучения ВОГ испытания проводились в температурном диапазоне от -50 до $+60^\circ\text{C}$, время измерения – 340 мин. Скорость изменения температуры составляла 1 град/мин. Время выдержки – 30 мин.

2. Результаты исследования и выводы

1. Анализ стабильности величины степени остаточной поляризации источника излучения для ВОГ при многократном включении в нормальных условиях

На графиках (рис. 2) представлены зависимости степени остаточной поляризации от времени.

На рис. 2, а, б и д можно наблюдать линейный рост степени остаточной поляризации (DOP), который может быть связан с прогревом прибора.

На рис. 2, в, г наблюдается уменьшение DOP.

Можно рассчитать среднеквадратичное отклонение по значениям табл. 1 и выражению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{cp}})^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

a

б

в

Рис. 2. Значение DOP излучателя, в % (см. также с. 377)

Рис. 2. Окончание

Таблица 1

Значения DOP излучателя (ЭСВИОИ)

DOP, %			Ср. знач. =	3,00
Ср. знач.	Min	Max	СКО =	0,20
3,28	2,91	3,21	σ =	3,19
3,01	2,59	3,42	2σ =	3,39
3,08	2,66	3,64	3σ =	3,60
2,71	2,19	2,79	$-\sigma$ =	2,78
2,92	1,96	3,72	-2σ =	2,58
			-3σ =	2,37

Исходя из данных табл. 1, делаем вывод, что максимальное и минимальное средние значения DOP соответственно равны 3,28 и 2,71 %. Однако внутри испытания разброс max и min составил 3,72 и 1,96 %

соответственно. Данное минимальное значение DOP (1,96 %) является наилучшим показателем для ЭСВИОИ, к такому результату необходимо стремиться при дальнейших испытаниях.

На диаграмме (рис. 3) показано среднеквадратичное отклонение значений DOP.

Рис. 3. СКО средних значений DOP излучателя, в %

Все средние значения DOP лежат в диапазоне от -2σ до 2σ , из этого можно сделать вывод о стабильности значений измерений при повторном включении излучателя в нормальных условиях.

Таблица 2

Коэффициенты, требуемые для расчета случайного дрейфа

Буквенное обозначение	Наименование	Чему равняется
c	скорость света, м/с	$2,99 \cdot 10^8$
λ	средневзвешенная длина волны, нм	1539,23
D	внутренний диаметр волоконной катушки, м	0,0965
L	длина контура, м	1000
η	остаточная поляризация источника излучения (DOP)	
e	коэффициент поляризации, дБ	-50
h	коэффициент межмодовой поляризационной связи ВК, 1/м	$3 \cdot 10^{-5}$
Lp	длина поляризационных биений в световоде, м	0,00295
$\Delta\lambda$	ширина полосы источника излучения, нм	7,22

При данных значениях параметров (табл. 2), величина случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока оказалась равна (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета случайного дрейфа ВОГ ЭСВИОИ

DOP, %	Q , рад·дБ/с · 10 ^{^(-5)}	Q , рад/с · 10 ^{^(-12)}	Q , град/ч · 10 ^{^(-6)}
3,28	-936	187	386
3,01	-859	172	354
3,08	-879	176	362
2,71	-773	155	319
2,92	-833	167	343

Из выражения (1) видно, что размерность величины случайного дрейфа – дБ·рад/с. Проведем математические операции для приведения размерности дрейфа к стандартному виду:

$$-50 \text{ дБ} = 0,0001 = 10^{-5}, \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \frac{180 \text{ град}}{\pi} \cdot 3600. \quad (3)$$

Покажем наглядно данные из табл. 3 (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость величины случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока (Q), от степени остаточной поляризации (DOP)

2. Аналогичные измерения были выполнены после разветвителя оптической мощности при температуре $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$, время – 15 мин (см. рис. 1, точка 2).

На рис. 5 представлены значения DOP ЭСВИОИ с указанием среднего, минимального и максимального значений DOP с добавлением линии тренда (аппроксимации).

a

б

в

Рис. 5. Значения DOP ЭСВИОИ с разветвителем в нормальных условиях, в %
(см. также с. 381)

Рис. 5. Окончание

На рис. 5 можно наблюдать линейную зависимость линии аппроксимации с уменьшением значений DOP.

Проанализируем среднее значение степени остаточной поляризации по всем измерениям и рассчитаем среднеквадратичное отклонение по данным значениям (табл. 4) и формулы (2).

На основании табл. 4 делаем вывод, что максимальное и минимальное значения DOP равны 3,44 и 2,82 % соответственно. Однако по разбросу внутри испытаний максимальное значение DOP составило 3,62 %, а минимальное 2,63 %. Данное значение DOP (2,63 %) является лучшим показателем для ЭСВИОИ и к этому результату необходимо стремиться при дальнейших измерениях.

Покажем отклонение средних значений на диаграмме (рис. 6).

Таблица 4

Значения DOP ЭСВИОИ с разветвителем

DOP, %			сред.знач. =	3,04
сред. знач.	min	max	СКО =	0,20
2,82	2,63	3,12	$\sigma =$	3,24
2,86	2,67	2,99	$2\sigma =$	3,44
2,84	2,69	2,99	$3\sigma =$	3,63
3,23	3,12	3,37	$-\sigma =$	2,84
3,44	3,24	3,62	$-2\sigma =$	2,64
2,82	2,63	3,12	$-3\sigma =$	2,44

Рис. 6. СКО средних значений DOP ЭСВИОИ с разветвителем, в %

Все средние значения DOP при выполненных измерениях лежат в диапазоне от -2σ до 2σ , из чего можно сделать вывод о стабильности значений измерений при повторном включении ЭСВИОИ с разветвителем в н. у.

Рассчитаем по формуле (1) с учетом значений параметров из табл. 2 случайный дрейф (табл. 5).

Таблица 5

Результаты расчета случайного дрейфа ВОГ ЭСВИОИ с разветвителем

DOP, %	Q , рад · дБ/с · $10^{(-5)}$	Q , рад/с · $10^{(-12)}$	Q , град/ч · $10^{(-6)}$
2,82	–805	161	332
2,86	–815	163	336
2,84	–811	162	334
3,23	–922	184	380
3,44	–980	196	404
2,82	–805	161	332

Представим данные из таблицы на рис. 7.

Рис. 7. Зависимость величины случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока (Q), от степени остаточной поляризации (DOP) ЭСВИОИ

Сравним результаты (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение расчетной величины случайного дрейфа ВОГ

ЭСВИОИ		ЭСВИОИ с разветвителем	
DOP, %	Q , град/ч $\cdot 10^{(-6)}$	DOP, %	Q , град/ч $\cdot 10^{(-6)}$
3,28	386	2,82	332
3,01	354	2,86	336
3,08	362	2,84	334
2,71	319	3,23	380
2,92	343	3,44	404
386	386	2,82	332

По данным табл. 6 можно сделать вывод о влиянии разветвителя (схемы деления мощности) на значения степени остаточной поляризации на выходе с ЭСВИОИ, однако значение DOP увеличилось незначительно, следовательно, можно уменьшить полученный результат до величины, полученной от ЭСВИОИ.

II. Анализ влияния температуры на стабильность величины степени остаточной поляризации источника излучения для ВОГ.

Навигационные ВОГ во время эксплуатации подвержены температурным нагрузкам в диапазоне от -50 до $+60$ °C. Было проведено три эксперимента, зависимость степени остаточной поляризации ЭСВИОИ

от времени представлена на рис. 8, на которые добавлены линии тренда, рассчитанные по методу наименьших квадратов.

Рис. 8. Значение DOP ЭСВИОИ в температурном диапазоне, в %:
— DOP; — температура

По данным рис. 8, *а* среднее, минимальное и максимальное значения DOP составляют 3,12, 2,32 и 3,92 % соответственно. Наблюдается тенденция увеличения линии тренда в процессе измерения.

Во время температурного перехода с +20 °C до –50 °C значение степени остаточной поляризации уменьшилось с 3,40 % до 2,32 %. Во время тридцатиминутной выдержки значение DOP возросло до 3,92 %, что является максимальным значениям в данном эксперименте.

Дальнейшие значения DOP менялось незначительно, в окрестности среднего значения.

Из рис. 8, *б* следует, что среднее, минимальное и максимальное значения DOP составляют 2,63 %, 1,93 % и 4,43 % соответственно. Линия тренда снижается во время измерения.

По рис. 8, *в* среднее, минимальное и максимальное значения DOP составляют 4,83 %, 3,40 % и 5,91 % соответственно. Наблюдается значительный рост линии аппроксимации во время измерения.

Градиент температуры (с +20 °C до –50 °C) изменяет значение DOP аналогично измерению 1. Однако при переходе к отрицательной температуре значение DOP уменьшается, не возрастает и достигает своего наименьшего значения (3,40 %).

При температурных переходах значение величины остаточной поляризации излучения изменяется. Для всех измерений наблюдается нестабильность зависимости DOP от температуры от измерения к измерению. В последнем эксперименте так же наблюдается значительный гистерезис значений на температуре +20 °C. На установившихся температурах наблюдается стабилизация величины DOP.

3. Сравнение результатов

Представим среднее, минимальное и максимальное значения DOP во время всего термоцикла и температурных выдержках на –50 °C и +60 °C в табл. 7.

По данным табл. 7 можно сделать вывод, что во время всего термоцикла при сравнении трех испытаний максимальное и минимальное среднее значение DOP равны 4,83 и 2,63 % соответственно. Однако по разбросу внутри испытаний максимальное значение DOP составило 5,91 %, а минимальное 1,93 %. Данное значение DOP (1,93 %) является наилучшим показателем для ЭСВИОИ.

Таблица 7

Значение DOP во время измерений, в %

Наименование	Измерение 1			Измерение 2			Измерение 3		
	DOP, %			DOP, %			DOP, %		
	ср. знач.	min	max	ср. знач.	min	max	ср. знач.	min	max
Весь термоцикл	3,12	2,32	3,92	2,63	1,93	4,43	4,83	3,4	5,91
Выдержка при -50°C	3,52	2,72	3,92	4,12	3,87	4,43	3,87	3,4	4,36
Выдержка при +60°C	3,13	3,04	3,23	2,91	2,47	3,16	5,25	4,99	5,46

Разброс значений DOP от ~6 до ~2 %. Попробуем спрогнозировать, как будет меняться величина случайного дрейфа ВОГ при таком разбросе значений DOP.

Представим данные табл. 7 на графике (рис. 9).

Рис. 9. Значение DOP во время измерений а – сред. знач., б – минимальные значения DOP, в – максимальные значения DOP, в %; ■ весь термоцикл, ■ выдержка при -50 °C; ■ выдержка при +60 °C

Рассчитаем по формуле (1) случайный дрейф. При данных значениях параметров (см. табл. 2) величина случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока, оказалась равна (табл. 8).

Таблица 8

Результаты случайного дрейфа ВОГ

	DOP, %	Q , рад/с $\cdot 10^{(-12)}$	Q , град/ч $\cdot 10^{(-6)}$
Измерение 1	3,12	1780	367
Измерение 2	2,63	1500	309
Измерение 3	4,83	2756	568

Из формулы (1) следует размерность величины случайного дрейфа – дБ·рад/с, проведем математические операции для приведения размерности дрейфа к стандартному виду (3), используемого на производстве.

Представим данные из таблицы наглядно (рис. 10).

Рис. 10. Зависимость величины случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока (Q), от степени остаточной поляризации (DOP)

На рис. 10 наблюдается линейная зависимость величины случайного дрейфа от DOP, как и следует из формулы (1).

4. Сравнение с результатами в нормальных температурных условиях

Ранее были проведены измерения по изучению стабильности величины степени остаточной поляризации источника излучения для

ВОГ при многократном включении в нормальных условиях. Ранее использовался тот же ЭСВИОИ, что и в данной работе.

В нормальных условиях было проведено шесть измерений, при термоциклировании – три. Представим данные в табл. 9.

Таблица 9

Результаты случайного дрейфа ВОГ

Нормальные условия		Термоциклирование	
DOP, %	Q , град/ч $\cdot 10^{-6}$	DOP, %	Q , град/ч $\cdot 10^{-6}$
2,82	2,82	3,12	367
2,86	2,86	2,63	309
2,84	2,84	4,83	568
3,23	3,23		
3,44	3,44		

По данным табл. 9 можно сделать вывод, что значение степени остаточной поляризации и величина случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического блока, ЭСВИОИ в нормальных условиях и при термоциклировании имеют схожие результаты.

Заключение

По результатам первой части выполненной работы можно сделать выводы, что схема деления ЭСВИОИ вносит свой негативный вклад в величину DOP (среднее значение по пяти измерениям DOP излучателя составило 3,00 %, а излучателя с разветвителем – 3,04 %).

Минимальное значение DOP внутри измерений составило 1,96 % для ЭСВИОИ и 2,63 % для схемы деления. При дальнейших исследованиях по данной теме, следует стремиться к уменьшению данных значений.

Поскольку дрейф является аддитивной величиной, значение случайного дрейфа, вызванного неидеальностью поляризационных характеристик оптического излучателя (ЭСВИОИ) и для излучателя (ЭСВИОИ) с разветвителем, равное $3,52 \cdot 10^{-4}$ и $3,57 \cdot 10^{-4}$ град/ч соответственно, вносит малую поправку в шумовую погрешность гироскопа.

По результатам второй части выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- градиент температуры отражается на значениях степени остаточной поляризации;
- на стационарных температурах параметр DOP стабилизирует свое значение;
- наблюдается разброс значений данного ЭСВИОИ по параметру остаточной поляризации от измерения к измерению от ~ 6 до ~ 2 %. Этот разброс может объясняться как влиянием укладки волокна в изделии, так и влиянием температурного воздействия на полимерное покрытие волокна. Полученный разброс необходимо учитывать в дальнейшем при расчете точности ВОГ и выборе конструктивных решений датчика.

Расчетный случайный дрейф в инерционном ВОГ, вызванный нестабильностью поляризационных характеристик источника излучения, может приобретать значения от $\sim 0,3 \cdot 10^{-3}$ до $\sim 0,6 \cdot 10^{-3}$ град/ч.

Научный руководитель – доцент кафедры «Общая физика» ПНИПУ Г.Н. Вотинов.

Список литературы

1. Azzam R.M.A., Bashara N.M. // *Elipsometry and polarized light*. – 1997. – 583. – P. 15.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology // *Optical Fiber Technology*. – 2013. – Vol. 19, № 6. – P. 828–832. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.08.007
3. Горохов С.Л. Волоконно-оптические гироскопы: обзор // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2005. – Вып. 3. – С. 60–67.
4. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения / А.С. Алейник, Н.Е. Кикилич, А.А. Козлов [и др.] // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 593–607. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607
5. Сравнительный анализ волоконно-оптических гироскопов на деполяризованной излучении / М.И. Коптенков, Е.В. Шаховцев [и др.] //

Системный анализ, управление и обработка информации в космической отрасли. – 2015. – Т. 3. – С. 57–62.

References

1. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Elipsometry and polarized light. 1997, 583, p. 15.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology. *Optical Fiber Technology*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 828-832. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.08.007
3. Gorokhov S.L. Volokonno-opticheskie giroskopy (review) [Fiber Optic Gyroscopes (review)] // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki*, 2005, вып. 3, с. 60-67.
4. Aleynik A.S., Kikilich N.E., Kozlov A.A. et al. Metody postroeniya vysokostabilnykh erbievykh superlyuminestsentnykh volokonnykh istochnikov opticheskogo izlucheniya [Construction of highly stable erbium superluminescent fiber optical radiation sources]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 593-607. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607
5. Koptenkov M.I., Shakhovtsev E.V. et al. Sravnitelnyy analiz volokonno-opticheskikh giroskopov na depolyarizovannoi izluchanii [Comparative analysis of fiber-optic gyros on depolarized radiation]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii v kosmicheskoy otrasli*, 2015, vol. 3, pp. 57-62.

Получено 16.11.2018