

# Краткие сообщения

07;12

## К вопросу о предельной чувствительности волоконных оптических гироскопов

© Г.Б. Малыкин

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: malykin@ufp.appl.sci.-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 7 ноября 2007 г.)

Рассмотрено влияние шумов источников излучения и эффектов, обусловленных связью поляризационных мод на случайных неоднородностях одномодовых волоконных световодов (ОВС), на предельную чувствительность волоконных оптических гироскопов (ВОГ) к вращению. Показано, что поляризационные эффекты в основном лимитируют предельную чувствительность ВОГ, предназначенных для целей навигации, и прецизионных ВОГ, предназначенных для регистрации фундаментальных физических эффектов. В ориентационных ВОГ, напротив, превалируют шумы излучения.

PACS: 42.25.Dd, 42.25.Ja, 42.50.Lc

Датчики угловой скорости вращения на основе волоконных оптических гироскопов (ВОГ), основным элементом которых является волоконный кольцевой интерферометр (ВКИ), изготовленный на основе одномодового волоконного световода (ОВС), находят широкое применение как для целей гироскопии, навигации и ориентации [1–3], так и для решения ряда других фундаментальных и прикладных задач [1]. Экспериментальные исследования ВКИ выявили наличие на выходе интерферометра ряда дополнительных сигналов, идентичных вращению, но не связанных с вращением [1], которые ограничивают предельную чувствительность ВОГ к вращению. Наиболее значительными из них являются:

1) шумы источника излучения, которые складываются из квантовых — дробовых — шумов фототока, связанных с дискретностью света и фототока (фотонами и электронами), и волновых — так называемых избыточных шумов, природа которых связана со случайными биениями статистически независимых спектральных компонент источника немонохроматического излучения<sup>1</sup> — суперлюминесцентного диода [4–8];

2) изменяющаяся во времени (из-за изменения температуры) поляризационная невязанность ВКИ — так называемый дрейф нуля ВКИ, который обусловлен наличием случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ [1,9–14].

Влияние шумов источника излучения и поляризационных эффектов на предельную чувствительность ВОГ неоднократно рассматривалось, но по отдельности; сравнение их влияния до сих пор, насколько нам известно, не проводилось.

Цель настоящего сообщения заключается в проведении численных оценок влияния обоих рассмотренных

<sup>1</sup> Дробовые шумы являются следствием корпускулярной природы света, а избыточные шумы — следствием его волновой природы.

эффектов на предельную чувствительность ВОГ. Отметим здесь, что серийно выпускаемые ВОГ, предназначенные для целей гироскопии, навигации и ориентации, и прецизионные ВОГ, предназначенные для решения фундаментальных физических задач [1]<sup>2</sup>, имеют весьма различные характеристики: ширину линии и интенсивность источника излучения, коэффициент экстинкции поляризатора, двулучепреломление и величину  $h$ -параметра (который характеризует связь поляризационных мод [17] в ОВС) и весьма различные полосы пропускания системы обработки сигнала с выхода фотоприемника. Отметим также, что ВОГ, предназначенные для целей навигации и ориентации, также имеют различные полосы пропускания [2,3]. Например, для стабилизации углового положения фотокамеры, расположенной на самолете [2], необходимо весьма значительное быстроедействие системы автоподстройки и, следовательно, весьма широкую полосу пропускания. Вследствие этого численные оценки для различных классов ВОГ будем производить отдельно.

Во всех современных ВОГ применяется так называемая несимметричная фазовая модуляция, что позволяет реализовать наиболее высокую чувствительность при малых значениях угловой скорости вращения [1–3]. В этом случае величина случайной разности фаз встречных волн, обусловленная шумами излучения, определяется выражением [5]:

$$\Phi_{\text{noise}} = \frac{2\sqrt{\left(\frac{\epsilon}{i} + \frac{1}{n}\right) \Delta F}}{J_1 \left[ 2\Phi_1 \sin\left(\frac{2\pi F L n}{c}\right) \right]}, \quad (1)$$

<sup>2</sup> С помощью ВОГ (ВИК) могут быть зарегистрированы гравитационные волны [15], эффект Лензе–Тирринга [10] и невязанное линейное двулучепреломление, возникающее в скрещенных электрическом и магнитном полях [16]

где  $e \simeq 1.6 \cdot 10^{-19}$  К — заряд электрона,  $i$  — ток фотоприемника на выходе ВКИ,  $\Pi$  — оптическая ширина полосы суперлюминесцентного диода,  $\Delta F$  — ширина полосы системы обработки сигнала с выхода фотоприемника,  $J_1$  — функция Бесселя первого порядка первого рода,  $F$  — частота фазовой модуляции,  $\Phi_1$  — амплитуда фазовой модуляции на частоте  $F$ ,  $L$  — длина волоконного контура ВКИ,  $n$  — коэффициент преломления светонесущей жилы (кора) ОВС,  $c$  — скорость света в вакууме. В ВОГ величина  $\Phi_1$  обычно выбирается таким образом, чтобы

$$2\Phi_1 \sin\left(\frac{2\pi FLn}{c}\right) \simeq 1.85 \text{ rad},$$

тогда

$$J_1\left[2\Phi_1 \sin\left(\frac{2\pi FLn}{c}\right)\right] \simeq 0.58$$

и величина  $\varphi_{\text{noise}}$  становится минимальной. Величина дрейфа нуля ВКИ  $\Omega$ , выраженная в размерности deg/h, связана со случайной разностью фаз встречных волн [1]:

$$\Omega = 10^5 \frac{\varphi \lambda_0 c}{\pi LD}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  — средняя длина волны света в вакууме,  $D$  — диаметр катушки контура ВКИ.

Для проведения численных оценок следует рассмотреть параметры серийно выпускаемых ВОГ. В качестве примера укажем параметры ВОГ, выпускаемых компанией „Физоптика“ (Москва) [2,3]. Величина фототока на выходе ВКИ составляет  $0.5\text{--}0.8 \mu\text{A}$ , полоса пропускания системы обработки составляет  $500\text{--}1000$  Hz, но в случае их использования в качестве навигационного прибора может быть уменьшена в нужное число раз. Средняя длина волны излучения суперлюминесцентного диода  $\lambda_0 = 800$  nm, ширина линии излучения  $\Delta\lambda = 10\text{--}15$  nm, степень поляризации излучения —  $20\text{--}30\%$ . Коэффициент экстинкции поляризатора в схеме ВКИ составляет  $\varepsilon = 10^{-2}\text{--}10^{-3}$ , величина линейного двулучепреломления ОВС контура ВКИ —  $\Delta n = (2\text{--}3) \cdot 10^{-4}$ , величина  $h$ -параметра ОВС —  $10^{-3}\text{--}10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .

Отметим, что использование в контуре ВКИ сильноанизотропных ОВС со сравнительно большой величиной  $h$ -параметра продиктовано двумя причинами:

1) стоимость ОВС с очень малыми значениями  $h$ -параметра ( $h \leq 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ) очень велика, что делает ВОГ на их основе неконкурентоспособными;

2) при намотке высококачественного ОВС на катушку контура ВКИ ( $D = 2\text{--}15$  cm) величина его  $h$ -параметра возрастает на  $2\text{--}3$  порядка [18–20] как вследствие изгиба ОВС [19,20], так и вследствие наличия неровностей поверхности [18], которые становятся особенно заметными при намотке второго и последующих слоев.

Отметим, что в ВОГ, выпускаемых компанией „Физоптика“, с целью подавления влияния нестационарных тепловых эффектов [21] добиваются уменьшения толщины катушки контура ВКИ, для чего используются ОВС не

со стандартным диаметром  $125 \mu\text{m}$ , а с меньшим диаметром  $\sim 40 \mu\text{m}$ , которые характеризуются повышенным значением  $h$ -параметра [2,3].

Производятся также ВОГ на основе ВКИ с контуром из ОВС со слабым линейным двулучепреломлением. Такие ВОГ выпускает фирма „Honeywell“ (США). Такие ВОГ оценкам, проведенным в нашей работе [17], величина  $h$ -параметра слабоанизотропного ОВС может составлять  $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ .

Для численных оценок шумов излучения положим, что в серийно выпускаемых ВОГ величина фототока составляет  $i = 0.65 \mu\text{A}$ , ширина линии излучения  $\Delta\lambda = 12.5$  nm ( $\Pi = 6 \cdot 10^{12}$  Hz), полоса пропускания системы обработки сигнала составляет  $\Delta F = 1000$  Hz для ориентационных ВОГ и  $\Delta F = 1$  Hz — для ВОГ, предназначенных для целей навигации. В прецизионных ВОГ, предназначенных для регистрации фундаментальных эффектов,  $i = 100 \mu\text{A}$ ,  $\Delta\lambda = 150$  nm ( $\Pi = 7 \cdot 10^{13}$  Hz), и поскольку указанные эффекты очень малы, то требуется весьма большое время усреднения, вследствие чего положим  $\Delta F \sim 10^{-4}$  Hz [16]<sup>3</sup>.

Тогда, в соответствии с (1),  $\varphi_{\text{noise}} \sim 7 \cdot 10^{-5}$  для серийных ориентационных ВОГ,  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  для серийных навигационных ВОГ и  $\sim 4 \cdot 10^{-9}$  для прецизионных ВОГ. Отметим, что для первого типа ВОГ вклад от дробовых и избыточных шумов примерно одинаков, для второго типа ВОГ влиянием дробовых шумов можно пренебречь.

Проведем численные оценки дрейфа нуля ВОГ, обусловленного изменением поляризационной невзаимности ВКИ вследствие температурных изменений оптических разностей фаз между концами контура ВКИ и различными случайными неоднородностями в ОВС контура ВКИ. Как было показано в [22], величина дрейфа нуля ВКИ (ВОК) в главном порядке величины определяется выражением

$$\varphi_n \simeq 0.5\varepsilon \sqrt{k l_{\text{dep}}} S_{2,3}, \quad (3)$$

где

$$l_{\text{dep}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda \Delta n}$$

— длина деполаризации немонахроматического излучения в ОВС,  $\Delta n$  — разность коэффициентов преломления для медленной и быстрой осей двулучепреломления ОВС,  $S_2$  и  $S_3$  — вторая и третья компоненты вектора Стокса поляризации излучения на входе ВКИ, т.е. линейная поляризация, ориентированная под углом  $45^\circ$  к направлению пропускания поляризатора, или соответственно циркулярная поляризация. Выражение (3) справедливо в случае, когда на длине деполаризации укладывается много случайных неоднородностей  $l_{\text{dep}} \gg l_c$  (длина корреляции случайных неоднородностей составляет  $\sim 2$  cm [17]), т.е. выполняется главное условие эргодичности [12–14], и, кроме того, выполняются условия:  $hL \ll 1$ ,  $\sqrt{h l_{\text{dep}}} \ll 1$ ,  $l_{\text{dep}} \ll L$ . В этом случае

<sup>3</sup> Как показано в [2], в случае, если полоса пропускания меньше, чем  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  Hz, шумы начинают возрастать.

справедливость (3) была подтверждена результатами численного моделирования [10,11].

Для численных оценок положим, что в серийно выпускаемых ВОГ для случая контура ВКИ из ОВС с сильным линейным двулучепреломлением  $\Delta n = 2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta \lambda = 12.5 \text{ нм}$ . В этом случае при  $S_2 = 0.25$  или  $S_3 = 0.25$  в соответствии с (3)  $\varphi_n = 6 \cdot 10^{-6}$ , что в три раза больше, чем шумы излучения навигационного ВОГ, и на порядок меньше, чем шумы излучения ориентационного ВОГ.

Для случая, если контур ВКИ изготовлен из ОВС со слабым линейным двулучепреломлением, положим, что  $\Delta n = 10^{-6}$ ,  $h = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta \lambda = 12.5 \text{ нм}$ . В этом случае выражение (3) уже нельзя использовать, поскольку условия  $hL \ll 1$  и  $\sqrt{hL_{\text{деп}}} \ll 1$  уже не выполняются, так как величина  $h$ -параметра велика, а длина деполаризации составляет десятки метров, но зато на ней укладывается несколько тысяч случайных неоднородностей, т.е. выполняется главное условие эргодичности  $l_{\text{деп}} \gg l_c$  [12–14] и, следовательно, можно воспользоваться результатами численного моделирования [10], где проводилось усреднение по ансамблю независимых реализаций случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ<sup>4</sup>.

Из [10] следует, что при  $S_2 = 0.25$  или  $S_3 = 0.25$ ,  $\varepsilon = 10^{-4}$  и  $L = 500 \text{ м}$  (при такой длине контура ВКИ  $L$  выполняется условие  $l_{\text{деп}} \ll L$ , что гарантирует отсутствие вредного эффекта двухканальности [1]) величина невязанной разности фаз встречных волн составляет  $\varphi_n \simeq 4 \cdot 10^{-5}$ . Результаты численного моделирования [10] показывают, что величина  $\varphi_n$  линейно зависит от коэффициента экстинкции  $\varepsilon$  и, следовательно, при  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-3}$   $\varphi_n \simeq 4.5 \cdot 10^{-4}$ , что существенно превышает шумы излучения как ориентационного, так и навигационного ВОГ. Отметим, что для уменьшения поляризационного дрейфа нуля ВОГ на основе ВКИ с контуром из ОВС со слабым линейным двулучепреломлением фирма „Honeywell“ использует деполаризаторы немонахроматического излучения, изготовленные на основе ОВС с сильным линейным двулучепреломлением [23,24], что позволяет уменьшить дрейф нуля ВКИ в 30–50 раз [23,25].

Для прецизионных ВКИ главное условие эргодичности  $l_{\text{деп}} \gg l_c$  уже не выполняется, поэтому ни выражение (3), ни усреднение по ансамблю независимых реализаций случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ применять нельзя [12]. В этом случае следует производить усреднение при изменении температуры ОВС контура ВКИ [12]. Проведенное в [13] математическое моделирование изменения температуры ОВС контура ВКИ для случая  $\Delta \lambda = 100 \text{ нм}$ ,  $\Delta n = 10^{-3}$  и  $\varepsilon = 10^{-4}$  показало, что для различных реализаций случайных неоднородностей в ОВС контура ВКИ величина  $\varphi_n$  значительно различается и может составлять от  $\varphi_n \leq 10^{-8}$  до  $\varphi_n = 3 \cdot 10^{-8}$ . Такое существенное различие объясняется тем, что в отдельных реализациях имелись

<sup>4</sup> При проведении численных оценок в [10] ширина полосы излучения полагалась  $10 \text{ нм}$ , а  $S_{2,3} = 1$ .

сильные неоднородности в пределах  $0.3l_{\text{деп}}$  хотя бы от одного из концов контура ВКИ, в других — слабые неоднородности, в третьих неоднородности лежали за пределами  $0.3l_{\text{деп}}$  или даже за пределами  $l_{\text{деп}}$  от концов контура. В рассматриваемом здесь случае  $\Delta \lambda = 150 \text{ нм}$  и, следовательно, величина  $\varphi_n$  составляет  $2.6 \cdot 10^{-8}$ . Таким образом, для прецизионных ВОГ величина  $\varphi_n$  более чем на порядок превышает шумы излучения.

Подчеркнем еще раз, что навигационные и ориентационные ВОГ создаются на одной и той же элементной базе, и для снижения шумов излучения в навигационных ВОГ используется существенно более узкая полоса системы обработки сигнала. Для повышения чувствительности навигационных ВОГ может быть увеличен диаметр намотки  $D$  и длина контура  $L$  (см. выражение (2)), что, однако, не влияет на величину случайной разности фаз встречных волн на выходе ВКИ, обусловленной как шумами излучения, так и поляризационными шумами — дрейфом нуля. Прецизионные ВОГ (ВКИ), которые в настоящее время проектируются и исследуются, создаются на существенно более совершенной и дорогостоящей элементной базе.

Основной вывод работы заключается в том, что для серийно выпускаемых ВОГ, необходимых для как целей навигации, так и разрабатываемых прецизионных ВОГ, предназначенных для регистрации фундаментальных физических эффектов, дрейф нуля ВКИ, связанный со случайными неоднородностями ОВС контура ВКИ, значительно превышает дрейф нуля ВОГ, обусловленный шумами излучения. Для серийно выпускаемых ВОГ, предназначенных для целей ориентации, имеет место обратная ситуация, что является следствием весьма широкой полосы пропускания системы обработки сигнала. Следовательно, целесообразно проводить дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования, в том числе и рассмотрение физических моделей случайных неоднородностей в ОВС, направленные на снижение влияния случайных неоднородностей на дрейф нуля ВКИ.

В заключение автор выражает благодарность В.Н. Логозинскому за консультации по характеристикам серийных ВОГ, В.И. Поздняковой за помощь с работе.

Работа частично поддержана грантом совета при президенте РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ7738-2006-2.

## Список литературы

- [1] Андропова И.А., Малыкин Г.Б. // УФН. 2002. Т. 172. № 8. С. 849–873.
- [2] Листвин В.Н., Логозинский В.Н. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 6. С. 742–750.
- [3] Листвин В.Н., Логозинский В.Н. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 8. С. 72–76.
- [4] Алексеев Э.И., Базаров Е.Н., Израелян В.Г. и др. // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 192–194.

- [5] Андропова И.А., Берштейн И.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 1. С. 426–435.
- [6] Burns W.K., Moeller R.P., Dandridge A. // IEEE Photonics Techn. Lett. 1990. Vol. 2. N 8. P. 606–609.
- [7] Burns W.K., Moeller R.P. // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2837. P. 381–387.
- [8] Rabelo R.C., de Carvalho R.T., Blake J. // J. Lightwave Techn. 2000. Vol. 18. N 12. P. 2146–2150.
- [9] Малыкин Г.Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 7. С. 817–824.
- [10] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 1. С. 145–151.
- [11] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 2003. Т. 95. № 4. С. 646–656.
- [12] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 2. С. 274–293.
- [13] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 2006. Т. 100. № 5. С. 813–832.
- [14] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 5. С. 854–873.
- [15] Kingsley S.A. // Fiber-Optic rotation sensors / Ed. by S. Ezekiel, H.J. Arditty. Berlin: Springer-Verlag, 1982. P. 386–397.
- [16] Малыкин Г.Б. // Опт. и спектр. 1996. Т. 80. № 2. С. 280–283.
- [17] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И., Шерешевский И.А. // Опт. и спектр. 1997. Т. 83. № 5. С. 843–852.
- [18] Ulrich R., Rashleigh S.C. // IEEE J. Quantum Electron. 1982. Vol. QE-18. N 12. P. 2032–2039.
- [19] Rashleigh S.C., Marrone M.J. // Electron. Lett. 1983. Vol. 19. N 20. P. 850–851.
- [20] Малыкин Г.Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 1. С. 98–100.
- [21] Shupe D.M. // Appl. Opt. 1980. Vol. 19. N 5. P. 654–655.
- [22] Козел С.М., Листвин В.Н., Шаталин С.В. и др. // Опт. и спектр. 1986. Т. 60. № 6. С. 1295–1299.
- [23] Малыкин Г.Б. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 6. С. 1314–1319.
- [24] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 3. С. 505–512.
- [25] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 3. С. 513–521.