

07

Снижение поляризационных ошибок в волоконном кольцевом интерферометре с помощью поляризующих световодов

© А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов

Филиал Центра эксплуатации объектов наземной космической
инфраструктуры НИИ прикладной механики им. акад. В.И. Кузнецова,
Москва
E-mail: akurbatov54@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2010 г.

Рассмотрены поляризационные ошибки в волоконном кольцевом интерферометре Саньяка. Показано, что совместное применение поляризующих световодов на входе интерферометра и в чувствительной катушке способно радикально подавить эти ошибки.

В последнее время для точной навигации все чаще используются волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). ВОГ содержит в своем составе волоконный кольцевой интерферометр (ВКИ) и блок обрабатывающей электроники. Одним из источников ошибок ВОГ являются поляризационные эффекты в элементах ВКИ.

На рис. 1 приведена схема ВКИ, содержащего, в частности, входной световод с линейным двулучепреломлением b_{in} , длиной L_{in} и длиной деполяризации $L_{\gamma, in}$, а также чувствительную катушку из волокна с линейным двулучепреломлением b , длиной L и длиной деполяризации $L_{\gamma} \ll L$.

В отсутствие входного световода (классическая схема ВКИ [1–5]) основные вклады в поляризационную ошибку (ПО) угловой скорости обусловлены: 1) поляризационной связью мод в волокне катушки (ПО-1); 2) разьюстировкой осей волокна катушки и волноводов Y-разветвителя (ПО-2). Для трех составляющих ПО-1, обусловленных параметрами Стокса излучения $s_{1,2,3}$, имеем [1]:

$$\Phi_1 \sim \varepsilon^2 p h (L_{\gamma} L)^{1/2}, \quad \Phi_{2,3} \sim \varepsilon p (h L_{\gamma})^{1/2}, \quad (1)$$

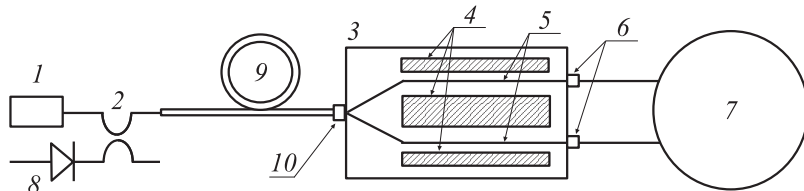


Рис. 1. Схема ВКИ: 1 — источник излучения, 2 — изотропный разветвитель, 3 — интегрально-оптический Y-разветвитель, 4 — электроды для подачи напряжения фазовой модуляции, 5 — каналные волноводы, 6 — места стыковки каналных волноводов Y-разветвителя и волокна чувствительной катушки, 7 — чувствительная катушка, 8 — фотоприемник, 9 — входной световод, 10 — стык входного световода и Y-разветвителя.

где ε — коэффициент экстинкции каналных волноводов 5 Y-разветвителя 3 (рис. 1) по амплитуде поля, p — остаточная степень поляризации излучения, h — h -параметр волокна катушки. Ошибка Φ_1 обусловлена отрезками этого волокна в длинами L_y , расположенными по всей длине симметрично относительно его середины [4], а $\Phi_{2,3}$ — начальным и конечным участками этого волокна с длинами L_y [1–5]. Если чувствительная катушка выполнена из поляризующего (PZ) световода с коэффициентом α затухания y -волн (по мощности), то расчет, подобный описанному в [1], дает оценки

$$\Phi_1 \sim \varepsilon^2 p h (L_y / \alpha)^{1/2}, \quad \Phi_{2,3} \sim \varepsilon p \{ h L_y \exp[\alpha L_y / 2]^2 \operatorname{erfc}(\alpha L_y / 2) \}^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок, h — h -параметр при $\alpha = 0$. Таким образом, даже при невыполнимом на практике условии $\alpha L_y \gg 1$ влияние дихроизма на $\Phi_{2,3}$ очень мало.

Помимо этого, на ПО-2 дихроизм волокна катушки сказывается еще меньше [4], что, казалось бы, окончательно делает его бессмысленным. Однако ниже мы покажем, что в ВКИ с сильно анизотропным световодом на входе применение PZ-волокна в чувствительной катушке полностью оправданно.

Итак, пусть на входе ВКИ имеется анизотропный световод, и пусть $L_{in} \gg L_{y,in}$ (рис. 1). Это аналогично анизотропному элементу в ВКИ [6], с помощью которого ПО, выведенная в [7] в форме $\Phi = \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_1$ (см. (1)–(2)), подавляется до уровня $\Phi = \Phi_1$ (так как изначально

Таблица 1. ПО для ВКИ на Рис. 2 с входным РМ-световодом, поляризующим световодом чувствительной катушки и без разъюстировок его оптических осей с осями Y-разветвителя

α , dB/m	Ω_1 , deg/h	Ω_2 , deg/h	Ω_3 , deg/h
0	$8.5 \cdot 10^{-4}(8.7 \cdot 10^{-4})$	0.0055(0.0051)	0.0052(0.0054)
10^{-1}	$3.5 \cdot 10^{-4}(2.6 \cdot 10^{-4})$	0.0022(0.0023)	0.0024(0.0026)
10^0	$7 \cdot 10^{-5}(6.4 \cdot 10^{-5})$	0.0011($2.9 \cdot 10^{-4}$)	0.0011($3.1 \cdot 10^{-4}$)
10^1	$2.3 \cdot 10^{-5}(2 \cdot 10^{-5})$	$5.2 \cdot 10^{-4}(2.7 \cdot 10^{-9})$	$5.3 \cdot 10^{-4}(2.9 \cdot 10^{-9})$

$\Phi_1 \ll \Phi_{2,3}$) [6] (а также в (1) и (2)) учтена только поляризационная связь мод первого порядка. Численная модель сохраняющего поляризацию (РМ) волокна катушки, описанная в [5], в присутствии входного световода с длиной $L_{in} \ll L$ привела нас к эмпирической формуле

$$\Phi_{2,3} \sim \varepsilon phL(L_y)^{1/2}, \quad (3)$$

т.е. лишь к снижению ошибок $\Phi_{2,3}$ в $1/(hL)$ раз вместо их полного подавления, как в [6]. Этого недостаточно для навигационного класса точности. Покажем, что для достижения условия $\Phi_{2,3} \approx 0$ можно применить PZ-волокно катушки.

Для PZ-волокна мы обобщили известную модель [5]. Остальное делалось в полном соответствии с [5]. Другие параметры ВКИ: рабочая длина волны $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, ширина спектра 5 nm, $\varepsilon = 0.01$, $p = 0.02$, радиус катушки 40 mm, $b = 6 \cdot 10^{-4}$, $L = 100$ (для быстроты расчетов, так как время расчета $\sim L^2$ [5]). Мы опробовали модель на схеме ВКИ без входного световода и, с точностью до коэффициентов ~ 1 , получили хорошее согласие с (2).

Рассмотрим входной РМ-световод ($\alpha = 0$), имеющий двулучепреломление $b_{in} = b$, при двух его длинах: $L_{in} = 1$ и 10 m. Ошибки угловой скорости $\Omega_{1,2,3}$, обусловленные $\Phi_{1,2,3}$, приведены в табл. 1 (в скобках — для $L_{in} = 10$ m). Здесь мы пока не учитываем разъюстировку осей волокна катушки с осями канальных волноводов Y-разветвителя и поляризационную связь мод во входном световоде.

Итак, из табл. 1 следует: 1) ошибки $\Omega_{2,3}$ снижаются даже в отсутствие дихроизма в волокне чувствительной катушки (3)); 2) ошибки $\Omega_{1,2,3}$ далее заметно снижаются дихроизмом волокна катушки; 3) при

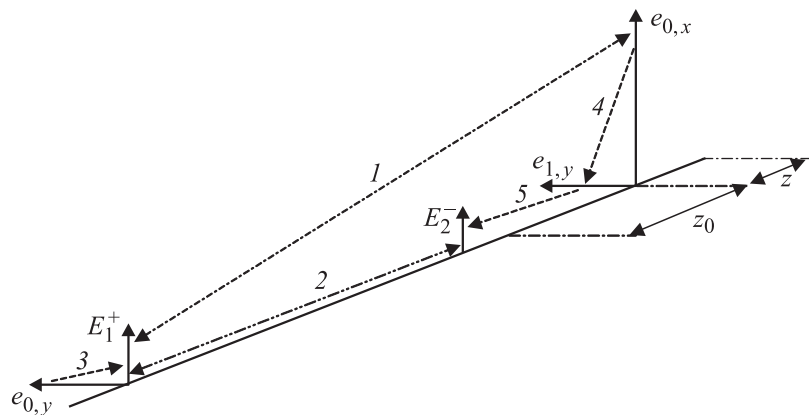


Рис. 2. Схема образования новой ПО. Стрелка 1 объединяет волны, приводящие к классической ПО, стрелка 2 — к новой ПО. $e_{0,x,y}$ — изначальные x - и y -поляризационные моды, входящие в волокно чувствительной катушки. Стрелкой 3 показано образование волны E_1^+ из входной моды $e_{0,y}$, стрелками 4 и 5 — образование волны E_2^- из входной моды $e_{0,x}$, $z_0 = L_{in}b_{in}/b$.

$\alpha > 1$ dB/m и $L_{in} = 10$ m ошибки $\Omega_{2,3}$ много меньше, чем при $L_{in} = 1$ m. Дадим физическую интерпретацию этих результатов.

Из-за поляризационной связи мод (далее — ПСМ) в волокне чувствительной катушки прямую волну (бегущую по часовой стрелке) и обратную волну (против часовой стрелки) можно представить в виде $E^\pm = E_0^\pm + E_1^\pm + E_2^\pm$. Здесь E_0^\pm — x -волна в отсутствие ПСМ, E_1^\pm — x -волна, перешедшая из входной y -волны из-за однократной перекачки мощности, E_2^\pm — из входной x -волны из-за двукратной перекачки мощности.

Далее, ошибки $\Phi_{2,3}$ (1) в отсутствие входного световода определяются волнами E_1^\pm и E_0^\mp [1]. Но в его присутствии эти волны некогерентны, поэтому они дают $\Phi_{2,3} = 0$ [6]. Однако есть также интерференция волн E_1^\pm и E_2^\mp , приводящая к $\Phi_{2,3} \neq 0$, в отличие от [6] (см. табл. 1 для $\alpha = 0$). На рис. 2 проиллюстрирована схема образования этой новой ПО.

Итак, поляризационная мода $e_{0,y}$ входит в волокно катушки в начале, а поляризационная мода $e_{0,x}$ — в конце. Первая из-за ПСМ переходит в x -волну E_1^+ , вторая — сначала в y -волну $e_{1,y}$, затем в x -волну E_2^- . Из-за

входного световода моды $e_{0,y}$ и $e_{0,x}$ имеют разность оптических путей (некогерентны при $L_{in} \gg L_{\gamma,in}$).

Пусть теперь на участке dz на расстоянии z от конца волокна катушки часть моды $e_{0,x}$ перешла в волну $e_{1,y}$. Последняя будет генерировать x -волну E_2^- по всей оставшейся длине $L - z$. Ясно, что когерентные с E_1^+ компоненты волны E_2^- появляются на расстояниях от конца волокна катушки, превышающих $z + z_0$ ($z_0 = L_{in}b_{in}/b$), — только так компенсируется разность путей, приобретенная во входном световоде, так как волна E_2^- , находясь в состоянии волны $e_{1,y}$, проходит по оси y волокна катушки необходимое для этого расстояние. При этом компоненты волны E_2^- , образованные далее волной $e_{1,y}$ на некотором расстоянии $z + z_0 + z_1$ от конца волокна катушки, когерентны с компонентами волны E_1^+ , образовавшимися из $e_{0,y}$ в области расстояний от $z_1 - L_{\gamma}$ до $z_1 + L_{\gamma}$ от начала волокна. Эта схема — половина картины, вторая — зеркальное отражение этих процессов относительно центра волокна катушки.

Отсюда для РМ-волокна чувствительной катушки при $z_0 > L$ теоретически возможно $\Omega_{2,3} \approx 0$, так как нет компонент E_2^{\mp} , когерентных с E_2^{\pm} . Однако на практике скажется ПСМ во входном световоде, ограничив подавление ошибок $\Omega_{2,3}$. Также необходимо, чтобы было $L_{in}b_{in} > Lb$ (т.е., как правило, $L_{in} \sim L$).

Далее, как скажется на величинах $\Omega_{2,3}$ дихроизм волокна чувствительной катушки?

1) Он подавляет волну $e_{0,y}$ (рис. 2), и при $z > 1/\alpha$ от начала (конца) волокна катушки волны E_1^+ (E_1^-) перестают генерироваться;

2) Если $\alpha z_0 \gg 1$, то волна $e_{1,y}$ (рис. 2) затухнет, прежде чем пройдет расстояние z_0 . Из-за этого в табл. 1 при $\alpha = 10$ dB/m и $L_{in} = 10$ m величина $\Omega_{2,3}$ много меньше, чем при $L_{in} = 1$. Таким образом, имеем радикальный механизм подавления ошибок $\Omega_{2,3}$ (как в [6]).

К сожалению, второй механизм почти не затрагивает Ω_1 , которая в основном подавляется тем, что остается вклад в нее лишь от участков с длиной L_{γ} , расположенных на расстояниях менее $1/\alpha$ от начала и конца PZ-волокна катушки (2). Дальнейшее подавление Ω_1 возможно, только если входной световод также является поляризующим.

Рассмотрим ВКИ с разьюстировкой осей волокна катушки и волноводов Y-разветвителя в пределах 2° . Дихроизм входного световода $\alpha_{in} = 60$ dB. Далее, $\alpha = 10$ dB/m, $b_{in} = 8 \cdot 10^{-4}$, $b = 6 \cdot 10^{-4}$. Рассмотрим комбинации с ПСМ во входном световоде и без нее, с разь-

Таблица 2. ПО для ВКИ на рис. 2 с поляризующим входным световодом для случаев поляризующего и сохраняющего поляризацию волокна чувствительной катушки

Поляризующее волокно чувствительной катушки			
ВКИ	$\Omega_1, \text{deg/h}$	$\Omega_2, \text{deg/h}$	$\Omega_3, \text{deg/h}$
Без ПСМ и разъюстировки	$2 \cdot 10^{-6} (1.9 \cdot 10^{-6})$	$2.2 \cdot 10^6 (0)$	$2.3 \cdot 10^{-6} (0)$
Без ПСМ с разъюстировкой	$3 \cdot 10^{-6} (3.2 \cdot 10^{-6})$	$8.0 \cdot 10^{-5} (0)$	$7.7 \cdot 10^{-5} (0)$
С ПСМ без разъюстировки	$2 \cdot 10^{-6} (1.9 \cdot 10^{-6})$	$2.2 \cdot 10^{-6} (9.6 \cdot 10^{-9})$	$2.3 \cdot 10^{-6} (9.3 \cdot 10^{-9})$
С ПСМ и разъюстировкой	$5.4 \cdot 10^{-6} (3.3 \cdot 10^{-6})$	$8.0 \cdot 10^{-5} (6 \cdot 10^{-8})$	$7.7 \cdot 10^{-5} (5.8 \cdot 10^{-8})$
Сохраняющее поляризацию волокно чувствительной катушки			
ВКИ	$\Omega_1, \text{deg/h}$	$\Omega_2, \text{deg/h}$	$\Omega_3, \text{deg/h}$
Без ПСМ и разъюстировки	$6.3 \cdot 10^{-6} (5.4 \cdot 10^{-6})$	$2.7 \cdot 10^{-4} (2.2 \cdot 10^{-4})$	$2.6 \cdot 10^{-4} (2.1 \cdot 10^{-4})$
Без ПСМ с разъюстировкой	$7.9 \cdot 10^{-6} (7 \cdot 10^{-6})$	$5.6 \cdot 10^{-4} (4.8 \cdot 10^{-4})$	$5.3 \cdot 10^{-4} (4.8 \cdot 10^{-4})$
С ПСМ без разъюстировки	$6.3 \cdot 10^{-6} (5.4 \cdot 10^{-6})$	$2.7 \cdot 10^{-4} (2.2 \cdot 10^{-4})$	$2.6 \cdot 10^{-4} (2.1 \cdot 10^{-4})$
С ПСМ и разъюстировкой	$10^{-5} (8.5 \cdot 10^{-6})$	$5.6 \cdot 10^{-4} (4.8 \cdot 10^{-4})$	$5.3 \cdot 10^{-4} (4.8 \cdot 10^{-4})$

юстировкой и без нее (4 случая). ПО приведены в табл. 2, где даны ПО для $L_{in} = 1$ м (в скобках — для $L_{in} = 20$ м). Также даны ПО для РМ-волокна катушки. Здесь, чтобы подчеркнуть совместное действие входного световода и PZ -волокна катушки, мы считаем, что дихроизм волноводов $5Y$ -разветвителя 3 (рис. 1) отсутствует ($\varepsilon = 1$).

Итак, при $L_{in} = 20$ м ошибка $\Omega_{2,3}$ не равна нулю только из-за ПСМ во входном световоде, а при $L_{in} = 1$ м она определяется ПСМ в волокне катушки и разъюстировкой (ее можно рассматривать как точечные центры ПСМ и применить к ним схему на рис. 2). Таким образом, деполяризация во входном PZ -световоде и дихроизм PZ -волокна катушки могут радикально подавить $\Omega_{2,3}$ (если $\alpha z_0 \gg 1$), т.е. достичь результата, полученного в [6]. Отметим, что здесь можно взять $L_{in} \ll L$, в отличие от ВКИ с РМ-световодами (см. выше).

Совместное действие деполяризации и дихроизма во входном световоде и PZ -волокне катушки можно считать частью общего принципа подавления ПО в ВКИ с помощью деполяризации и дихроизма. Ранее [8] этот принцип проявил себя через смягчение требований к поляризатору с помощью деполяризации в волокне катушки.

Что касается ошибки Ω_1 , то она не подавляется до нуля даже при $L_{in} = 20$ м. Именно Ω_1 теперь определяет общую ПО. Но ее подавление дихроизмом входного световода и PZ -волокна катушки тем не менее заметно. Кроме того, мы рассматривали длину L всего 100 м, тогда как $\Omega_1 \sim 1/L$ (2). Также не учитывался дихроизм волноводов Y -разветвителя. Но и без этого ПО мала даже для ВОГ навигационного класса точности.

В случае же РМ-волокна катушки разница ошибок для $L_{in} = 1$ и 20 м невелика, и все эти ошибки определяются ПСМ в волокне катушки и разъюстировкой, тогда как ПСМ во входном световоде на них практически не влияет. При этом ошибки $\Omega_{2,3}$ на несколько порядков, а Ω_1 в несколько раз больше, чем соответствующие ошибки в случае PZ -волокна катушки, благодаря чему применение PZ -волокна в чувствительной катушке ВКИ может быть полностью оправданным.

Меры по дальнейшему устранению ПО, на наш взгляд, имеют смысл лишь в единичных сверхточных измерениях, где нет требований компактности ВКИ. В [4] описан ВКИ для обнаружения эффектов общей теории относительности с чувствительной катушкой диаметром несколько километров, выполненной из изотропного одномодового во-

локна. В нашем случае радиус катушки может быть порядка нескольких метров и менее.

На практике дихроизм в волокне катушки можно получить либо на основе обычных анизотропных световодов с так называемой малой числовой апертурой [9], либо на основе анизотропных *W*-волокон. Входной *PZ*-световод также можно выполнить на основе *W*-профиля показателя преломления [10]. Прототипом *W*-волокна для чувствительной катушки можно считать волокно, описанное нами в [11]. Здесь дихроизм обеспечивается разностью изгибных потерь основных поляризационных мод. Если радиус намотки не мал (> 50 mm), спектральные кривые этих потерь резко растут, так что достичь указанных выше значений дихроизма, на наш взгляд, реально. А например, для ВОГ навигационного класса точности, как видно из табл. 2, достаточно и меньших значений дихроизма волокна чувствительной катушки (~ 1 dB/m, как показывает расчет).

Список литературы

- [1] Козел С.М. и др. // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 61. В. 6. С. 1295.
- [2] Burns W.K. et al. // J. Lightwave Technology. 1983. V. LT-1. N 1. P. 98.
- [3] Курбатов А.М. // Отчет по НИР „Разработка волоконного гироскопа“. Арзамас: ОКБ „Импульс“, МАП, 1984.
- [4] Андропова И.А., Малыкин Г.Б. // УФН. 2002. Т. 172. В. 8. С. 849.
- [5] Малыкин Г.Б., Позднякова В.И. Оптика и спектроскопия. 2003. Т. 95. В. 4. С. 646.
- [6] Jones E., Parker J.W. // Electr. Lett. 1986. V. 22. 1. P. 54.
- [7] Kintner E.C. // Opt. Lett. 1981. V. 6. 3. P. 154.
- [8] Burns W., Moeller R. // J. Lightwave Technology. 1984. V. LT-2. N 4. P. 430.
- [9] Varnham M.P. et al. // Electron. Lett. 1983. V. 19. N 7. P. 246.
- [10] Messerly M. et al. // J. Lightwave Technology. 1991. V. 9. N 7. P. 817.
- [11] Курбатов А.М., Курбатов Р.А. // Письма в ЖТФ. 2010. V. 36. В. 17. С. 23.