

УДК 621.373.535.8

## ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА СДВИГ ЕГО НУЛЯ

Г.Б.Малыкин

Рассмотрено влияние несинусоидальности фазовой модуляции в волоконном кольцевом интерферометре на сдвиг его нуля. Показано, что наибольший вклад в сдвиг нуля дает вторая гармоника частоты фазовой модуляции. Показано также, что в случае, если обработка сигнала ведется по третьей гармонике, то сдвиг нуля можно существенно уменьшить.

В работе [1] рассмотрено влияние фазового модулятора на сдвиг нуля волоконного кольцевого интерферометра (ВКИ), при наличии высших гармоник частоты фазовой модуляции  $F$ , а также при наличии модуляции интенсивности излучения. В [1] показано, что при условии  $\Psi = -2\pi FLn/c = \pi$ , где  $c$  — скорость света,  $n$  — показатель преломления на средней длине волны источника излучения  $\lambda$ , эти эффекты обращаются в ноль. Однако, практически выполнить это условие довольно сложно, поскольку кроме сдвига нуля ВКИ, связанного с работой фазового модулятора, существует сдвиг нуля, связанный с поляризационной невзаимностью ВКИ [2–4], и подбирая частоту  $F$  таким образом, чтобы сдвиг нуля отсутствовал, в действительности можно лишь взаимно компенсировать эти эффекты, при этом  $\Psi \approx \pi$ . Отметим, что такая компенсация будет носить временный характер, поскольку, как показано в [3, 4], поляризационная невзаимность будет меняться при изменении температуры одномодового волоконного световода (ОВС).

Целью настоящей работы является расчет влияния высших гармоник частоты фазовой модуляции на сдвиг нуля, ВКИ, а также определения методов уменьшения этого нежелательного явления.

При расчетах, для простоты, не будем учитывать влияния модуляции двулучепреломления ОВС, для чего положим, что направление собственных осей ОВС на входе и выходе контура ВКИ совпадает с направлением пропускания поляризатора и что связь поляризационных мод в ОВС отсутствует. В этом случае в обеих встречных волнах в контуре ВКИ будет возбуждена одна поляризационная мода, и модуляция двулучепреломления не скажется на работе ВКИ. Положим также, что коэффициент экстинции поляризатора в схеме ВКИ равен нулю.

Введем обозначения:  $\Phi_i$  — величина фазовой модуляции (полная фазовая модуляция составляет  $\sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i \cos(i\Omega t + \varphi_i)$ ) на  $i$ -й гармонике частоты

$F$ ,  $\varphi_i$  — разность фаз между модуляцией на  $i$ -той и первой гармонике ( $\varphi_1 = 0$ ),  $K_1$  — коэффициент модуляции амплитуды излучения в фазовом модуляторе, связанный с изменением диаметра намотки и, следовательно, изгибных потерь в ОВС, на первой гармонике. Полагаем  $\Phi_{2,3,\dots} \ll \Phi_1$ ,  $K_1 \ll 1$  ( $K_{2,3} \ll K_1$  и при расчетах учитываться не будут). Соотношения между  $\Phi_i$  и  $\varphi_i$  в случае, если фазовый модулятор линейно преобразует электрическое напряжение в фазу, определяются коэффициентом гармоник и их фазовыми соотношениями в выходном напряжении генератора частоты  $F$ , а также АЧХ и ФЧХ модулятора. Причины, которые могут вызвать нелинейность фазового модулятора будут рассмотрены ниже.

Проводя расчеты, аналогичные [1], при условии  $\Psi \approx \pi$  ( $|\cos \Psi/2| \ll 1$ ) и  $\Phi_c \ll 1$ ,  $\Phi_c$  — разность фаз, связанная с эффектом Саньяка (вращением ВКИ), получим выражение для величины полезного сигнала в интерференции излучения на выходе ВКИ на  $i$ -той нечетной гармонике частоты  $F$  (при расчетах опущены члены порядка  $K_1\Phi_c$ ,  $K_1\Phi_i$ ,  $\Phi_c\Phi_i$  ( $i > 1$ ), т.к.  $K_1, \Phi_c, \Phi_i \ll 1$  ( $i > 1$ )):

$$I_i^{\text{пол}} = -2\Phi_c S_i(x) \sin[i(\Omega t + \Psi/2)], \quad (1)$$

$$(i = 1, 3, 5, \dots)$$

где  $\Omega = 2\pi F$ ,  $x = 2 \sin(\Psi/2) \cdot \Phi_1$ ,  $S_i(x)$  — функция Бесселя  $i$ -того порядка. Выражение для паразитного сигнала, связанного с модуляцией потерь, при условии, что фаза модуляции потерь совпадает с  $\varphi_1$  имеет вид:

$$(I_i^{\text{пар}})_1 = \begin{cases} \cos \Psi/2 \cdot K_1[1 + S_0(x) + S_2(x)] \cos(\Omega t + \Psi/2), & (i = 1), \\ \cos \Psi/2 \cdot K_1[S_{i-1}(x) + S_{i+1}(x)] \cos[i(\Omega t + \Psi/2)], & (i = 3, 5, \dots). \end{cases} \quad (2)$$

Видно, что в этом случае паразитный сигнал находится в квадратуре по отношению к полезному, и его влияние можно существенно уменьшить с помощью фазового детектирования. (В [1] рассмотрен более общий случай, когда фаза амплитудной и фазовой модуляции не совпадают. Тогда  $(I_i^{\text{пар}})_1$  будет иметь и синфазную компоненту по отношению к полезному сигналу.) Паразитный же сигнал, вызванный наличием высших гармоник, имеет как квадратурную, так и синфазную компоненту относительно полезного сигнала. Анализ выражений для паразитного сигнала показывает также, что высшие нечетные гармоники фазовой модуляции  $\Phi_3, \Phi_5, \dots$  не дают вклада в нечетные гармоники модуляции интенсивности на выходе ВКИ. Что касается четных гармоник более высокого порядка, чем  $\Phi_2$ , то членами, пропорциональными им, можно пренебречь, поскольку член, соответствующий  $\Phi_4$ , пропорционален  $\cos^2 \Psi/2$ , член, соответствующий  $\Phi_6$ , пропорционален  $\cos^3 \Psi/2$  и т.д., а как было отмечено выше,  $|\cos \Psi/2| \ll 1$ .

Таким образом, основное влияние на сдвиг нуля ВКИ, связанный с работой фазового модулятора, оказывает вторая гармоника частоты фазовой модуляции.

Запишем выражение для первых трех нечетных гармоник паразитного сигнала, синфазного с полезным, то есть той его части, влияния которой на сдвиг нуля ВКИ невозможно устраниить с помощью фазового детектирования:

$$(I_1^{\text{пар}})_2 = -A[\Im_1(x) - \Im_3(x)] \sin(\Omega t + \Psi/2), \quad (3)$$

$$(I_3^{\text{пар}})_2 = A[\Im_1(x) + \Im_5(x)] \sin 3(\Omega t + \Psi/2), \quad (4)$$

$$(I_5^{\text{пар}})_2 = A[\Im_3(x) + \Im_7(x)] \sin 5(\Omega t + \Psi/2), \quad (5)$$

где  $A = 4\Phi_2 \cos \Psi/2 \cdot \sin \Psi/2 \cdot \sin \varphi_2$ .

Сделаем оценку сдвига нуля ВКИ со следующими параметрами: длина контура  $L = 500$  м, диаметр намотки ОВС  $D = 10$  см, средняя длина волны источника излучения  $\lambda = 0,8$  мкм, для случая обработки сигнала по первой (I), третьей (III), и пятой (V), гармонике частоты фазовой модуляции, при условии, что фаза опорного сигнала на фазовом детекторе выставлена точно относительно полезного сигнала, а величина фазовой модуляции в каждом случае такова, что величина полезного сигнала максимальна, то есть  $x = 1,85$  (I),  $x = 4,2$  (III),  $x = 6,4$  (V). Величина  $\sin \varphi_2$  может принимать любые значения (например, при изменениях температуры АЧХ и ФЧХ пьезоэлемента меняются, что может привести к изменению сдвига нуля ВКИ — дрейфу нуля), поэтому для оценки максимально возможного сдвига нуля ВКИ —  $\Delta\Omega_{\max}$  положим  $\sin \varphi_2 = 1$ . При вычислении сдвига фазы ВКИ  $\Delta\varphi$  коэффициент при сигнале ошибки (выражения (3), (4), (5)) будет нормирован на коэффициент при полезном сигнале (при величине  $\Phi_c$ ). Сдвиг нуля ВКИ  $\Delta\Omega$  связан со сдвигом фазы  $\Delta\varphi$  следующим образом:  $\Delta\Omega = 2 \cdot 10^5 \Delta\varphi \cdot \lambda \cdot c / 2\pi LD$ . Рассчитаем максимально возможный сдвиг нуля для случая  $|\cos \Psi/2| = (3 \div 8) \cdot 10^{-2}$  (частота модуляции  $F$  соответствует условию  $\Psi = \pi$  с точностью  $(2 \div 5)\%$ ) и  $\Phi_2 = (2 \div 5) \cdot 10^{-3} \cdot \Phi_1$ . В этом случае

$$(I) \quad |\Delta\Omega_{\max}| = 40 \div 250 \text{ град/час},$$

$$(III) \quad |\Delta\Omega_{\max}| = 3 \div 20 \text{ град/час},$$

$$(V) \quad |\Delta\Omega_{\max}| = 50 \div 350 \text{ град/час}.$$

Небольшая величина сдвига нуля при обработке сигнала по третьей гармонике связана с тем фактом, что  $\Im_1(4,2) + \Im_5(4,2) \ll 1$ , (см. выражение (4)). Если в этом случае установить несколько большую фазовую модуляцию  $x = 4,3$ , то  $\Im_5(4,3) = -\Im_1(4,3)$  и сдвига нуля ВКИ, связанного со

второй гармоникой фазовой модуляции, не будет. При обработке сигнала по первой гармонике подбором величины фазовой модуляции невозможно занулить разность  $(\mathfrak{F}_1(x) - \mathfrak{F}_3(x))$  (см. выражение (3)) в районе значений  $x$ , близких к 1,85.

Таким образом, для уменьшения влияния высших гармоник частоты фазовой модуляции на сдвиг и дрейф нуля ВКИ можно рекомендовать проводить обработку сигнала с выхода ВКИ по третьей гармонике. Кроме того, следует по возможности уменьшить содержание высших гармоник (в особенности второй) в напряжении, подаваемом на модулятор. Отметим, что рассматриваемый эффект приводит к сдвигу нуля ВКИ, который не зависит, в отличие от сдвига нуля, вызываемого поляризационной анизотропией контура ВКИ [2-4], от величины коэффициента экстинции поляризатора ВКИ и, следовательно, не может быть уменьшен за счет повышения качества поляризатора или использования какого-либо типа деполяризатора немонохроматического излучения [5-7]. К числу таких эффектов относится модуляция потерь [1] и двулучепреломления [8] в контуре ВКИ. На эксперименте разделить влияние этих эффектов довольно сложно, поэтому можно предложить следующий метод проверки влияния второй гармоники фазовой модуляции на сдвиг нуля в ВКИ: при переключении системы обработки сигнала с первой гармоники на третью величина сдвига нуля должна измениться.

Отметим также, что в случае, если для модуляции используется достаточно высокое переменное напряжение, порядка ста и более вольт, пьезоэлемент фазового модулятора становится нелинейным и может сам породить высшие гармоники. К нелинейности фазового модулятора может привести также и наличие толстого, сравнимого с диаметром ОВС, защитного покрытия волокна, в случае, если материал, из которого изготовлено покрытие, обладает свойствами разномодульности относительно растяжения и сжатия [9] (в литературе приводятся весьма различные значения разномодульности пластичных материалов [9, 10], а также наличие в покрытии небольших пузырьков воздуха [11]). Поэтому следует выбирать такую конструкцию модулятора, которая обеспечивает достаточную фазовую модуляцию (порядка 4 рад.) в той области, где он еще не проявляет нелинейности (с точностью десятых-сотых долей процента). Желательно также наматывать на пьезоцилиндр ОВС в тонкой защитной оболочке, для предотвращения возникновения нелинейности модулятора из-за возможной разномодульности материала оболочки и наличия в нем воздушных пузырьков. Необходимо также точно измерить оптическую длину контура  $L \cdot n$ , что даст возможность с высокой точностью выполнить условие  $\Psi = \pi$  и, следовательно, существенно уменьшить сдвиг нуля ВКИ.

В заключение автор выражает благодарность И. А. Андроновой и В.Н.Листвину за обсуждение результатов работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bergh R.A., Lefevre H.C., Shaw H.J. //Opt. Lett. 1981. V.6, N 10. P.502.
2. Kintner E. //Opt. Lett. 1981. V.6, N 3. P.154.
3. Козел С.М., Листвин В.Н., Шаталин С.В., Юникайтис Р.В. //Опт. и спектр. 1986. Т.61, вып.6. С.1295.
4. Малыкин Г.Б. //Изв.вузов. Радиофизика. 1991. Т.34, N 7. С.817.
5. Bohm K., Marten P., Petermann K. //Elektron lett. 1981. V.17, N 10. P.352.
6. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. //Изв.вузов. Радиофизика. 1991. Т.34, N 9. С.1001.
7. Малыкин Г.Б. //Изв.вузов. Радиофизика. 1992. Т.35, N 2. С.189.
8. Gangding P., Shangyuan H., Zongqi L. //Electron lett. 1986. V.22, N 25. P.1337.
9. Амбарцумян С.А. Раэномодульная теория упругости. — М.: Наука, 1982.
10. Жуков А.М. //ПМТФ. 1985. N 4. С.128.
11. Островский Л.А. //Акустический журнал. 1988. Т.34, вып.5. С.908.

Институт прикладной физики  
РАН

Поступила в редакцию  
11 ноября 1992 г.

**AN INFLUENCE OF THE PHASE MODULATION NONSINUSOIDALITY  
IN A FIBER RING INTERFEROMETER ON ITS ZERO SHIFT**

*G.B.Malykin*

An influence of the phase modulation nonsinusoidality in a fiber ring interferometer on its zero shift has been considered. It has been shown that the largest contribution to the zero shift is from the second harmonic of the phase modulation frequency. It has been also demonstrated that the zero shift can be significantly reduced if the third harmonic is used in signal processing.