

07

Преобразование фазовой модуляции света в модуляцию интенсивности с помощью внешнего волоконно-оптического интерферометра

© *О.И. Котов, Л.Б. Лиюкумович, В.М. Николаев,
В.Ю. Петрунькин, Зехрауи Буабид*

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 24 января 1997 г.

В работе рассмотрен новый метод детектирования фазовой модуляции, основанный на использовании "внешнего" световодного интерферометра. Такой "прием" характеризуется слабой зависимостью от длины, расположения и внешних условий тракта распространения фазомодулированного света и в ряде случаев может быть эффективнее традиционных методов построения волоконно-оптических систем с фазовой модуляцией.

В оптических системах с фазовой модуляцией необходимо осуществлять преобразование фазовой модуляции света в модуляцию интенсивности для регистрации фотодетектором информационного сигнала. Такая задача возникает в системах сбора и передачи данных, измерительных системах и т.п. [1–3]. Для преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности используют интерференционные схемы Фабри–Перо, Маха–Цендера и др. [4,5]. При этом, как правило, оптический (волоконно-оптический) канал, в котором осуществляется модуляция и распространяется фазомодулированный свет, непосредственно входит в состав интерференционной схемы. Воздействия внешней среды на канал распространения сигнала вызывают дрейф его оптической длины. Это известная в интерферометрических датчиках и линиях сбора и передачи данных фазовой модуляции проблема компенсации медленного температурного дрейфа рабочей точки интерферометра [5–7]. При существенной протяженности тракта становится затруднительным скомпенсировать дрейф рабочей точки интерференционной схемы при регистрации и обработке выходного сигнала. Специальные оптические

методы приема, снижающие "фединг" сигнала являются сложными и малоэффективными [8–10].

В ряде случаев воздействие на чувствительный волоконно-оптический элемент имеет узкополосный, квазигармонический характер. При этом условии для преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности в протяженных волоконных системах может быть использован внешний (по отношению к тракту распространения фазомодулированного света) интерферометр. Особенности такого приема рассмотрены в данной работе.

Внешний интерферометр возможно использовать для преобразования частотной и фазовой модуляции в модуляцию интенсивности, поскольку частотная и фазовая модуляции относятся к одному виду угловой модуляции и связаны дифференциально-интегральным соотношением. Первое из отмеченных преобразований широко используется, например в системах стабилизации частоты лазеров [11]. Преобразование фазовой модуляции в модуляцию интенсивности с помощью внешнего интерферометра менее изучено и не применяется в связи с низкой эффективностью при использовании обычных зеркальных интерферометров. Использование волоконно-оптического интерферометра с большой разностью хода лучей позволяет, как показано ниже, эффективно преобразовать фазовую модуляцию света в модуляцию интенсивности и регистрировать информацию в оптических системах с фазовой модуляцией. Этот метод построения протяженных измерительных и передающих фазовых систем позволяет преодолеть ряд недостатков, свойственных другим известным способам и прежде всего существенно снизить влияние внешних условий канала распространения на прием полезного сигнала.

Рассмотрим волоконно-оптическую систему, содержащую источник когерентного оптического излучения, световод с укрепленным на нем модулятором фазы (или другой источник фазомодулирующего воздействия), волоконный интерферометр и фотодетектор (рис. 1). При подаче на модулятор гармонического сигнала на выходе световода получаем оптическое излучение с гармонической модуляцией фазы света ψ :

$$\psi = \psi_0 + \delta\psi \sin(\Omega t). \quad (1)$$

Для простоты рассмотрения будем полагать, что используются одномодовые изотропные волокна без потерь, а интерферометр является

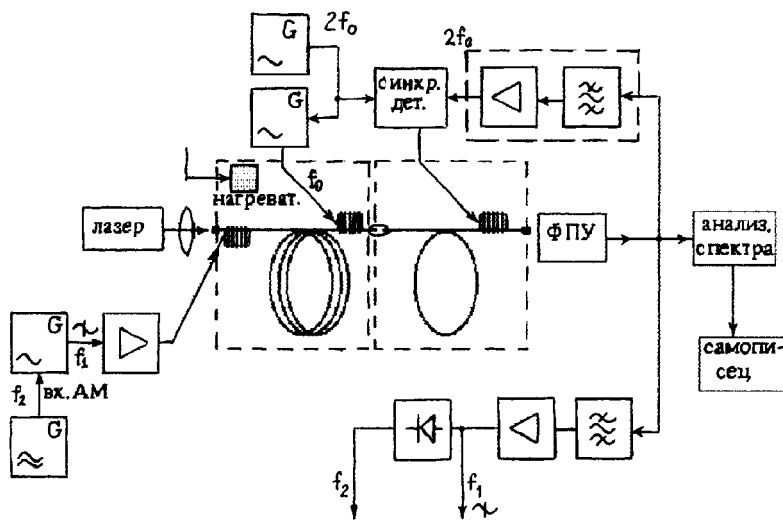


Рис. 1.

двухлучевым. Последнее условие выполняется для двухлучевых интерферометров или многопроходных интерферометров с низкой добротностью. С учетом этих условий можно показать, что при подаче на вход интерферометра излучения с фазой (1) переменная составляющая интенсивности на выходе интерферометра будет иметь вид

$$I_-(t) = I_0 A \cdot \cos [2\delta\psi \cdot \sin(\Omega L n / 2c) \cdot \cos(\Omega\{t - \tau\} + \beta L)], \quad (2)$$

где A — коэффициент, определяемый контрастностью интерференции, $A = (1/2)(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$; I_0 — интенсивность на выходе тракта; $L = |l_1 - l_2|$ — разность хода лучей в интерферометре (l_1, l_2 — пути лучей в интерферометре); $\tau = (l_1 + l_2)n/2c$; β — постоянная распространения света в волокне.

Формула (2) выражает преобразование фазовой модуляции в модуляцию интенсивности в рассматриваемой волоконно-оптической системе. Сдвиг фазы, связанный с τ , по физическому смыслу может быть отнесен к общей задержке сигнала при прохождении через интерферометр.

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= \beta L, \\ \delta\varphi &= 2\delta\psi \sin(\Omega L n / 2c), \\ \varphi &= \Omega\tau,\end{aligned}\quad (3)$$

то выражение (2) можно записать в виде:

$$I_- = I_0 A \cdot \cos[\varphi_0 + \delta\varphi \cdot \cos(\Omega t - \varphi)]. \quad (4)$$

Согласно (3), максимальная эффективность преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности ($\delta\varphi = 2\delta\psi$) достигается при частотах, для которых $(\Omega L n / c) = k\pi$, где k — нечетные числа. Если $(\Omega L n / c) = k\pi$, для четного k , то $\delta\varphi = 0$, информация не регистрируется, в частности не влияют на сигнал интерферометра флуктуации фазы в передающем световоде с частотами, близкими к нулевой.

Структура сигнала (4) аналогична структуре сигналов, получающихся в обычных интерферометрических системах, где волоконный канал распространения фазомодулированного света входит в состав интерференционной схемы, преобразующей фазовую модуляцию в модуляцию интенсивности. Однако в случае внешнего интерферометра имеют место отличия от таких традиционных систем, например:

отсутствует влияние медленного теплового дрейфа фазы света в канале передачи;

”внешний” интерферометр, преобразующий фазовую модуляцию в модуляцию интенсивности всегда может быть компактным и изолированным от воздействий;

параметры ”внешней” системы приема полезного сигнала не зависят от длины и конфигурации тракта распространения фазовой модуляции оптического сигнала.

Выделение модулирующего сигнала (1) может производиться с помощью любых методов обработки сигнала (4), применяемых в волоконной интерферометрии [3,5–7]. Например, как сделано в приведенных ниже экспериментах, можно стабилизировать рабочую точку интерферометра в середине линейного участка. Тогда $\varphi_0 = \pi/2$, при $\delta\varphi \ll \pi$ на выходе системы получаем

$$I_- = I_0 A \cdot \cos[\varphi_0 + \delta\varphi \cdot \cos(\Omega t - \varphi)] \approx I_0 A \cdot \delta\varphi \cdot \cos(\Omega t - \varphi) \quad (5)$$

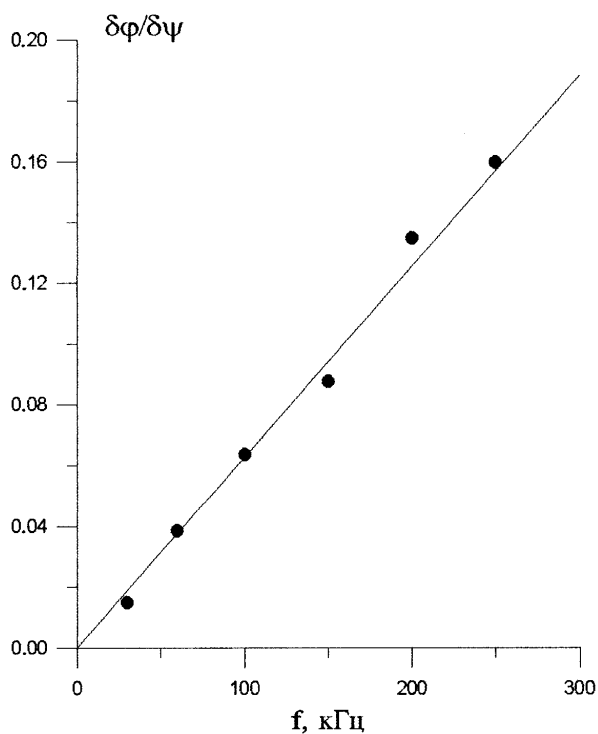


Рис. 2.

и фотодетектор регистрирует непосредственно информационный сигнал.

При подаче на модулятор сложного, негармонического информационного сигнала на выходе системы он будет выделен с учетом частотной характеристики $(\delta\varphi/\delta\psi) = 2 \sin(\Omega L n / 2c)$, как видно из выражений (2), (3). Если параметры интерферометра выбраны так, что спектр полезного сигнала сосредоточен в области экстремума указанной частотной характеристики, то он будет зарегистрирован практически без искажений.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для демонстрации рассматриваемого метода приема фазовой модуляции оптических сигналов. Источник света — He-Ne лазер ЛГН-208Б

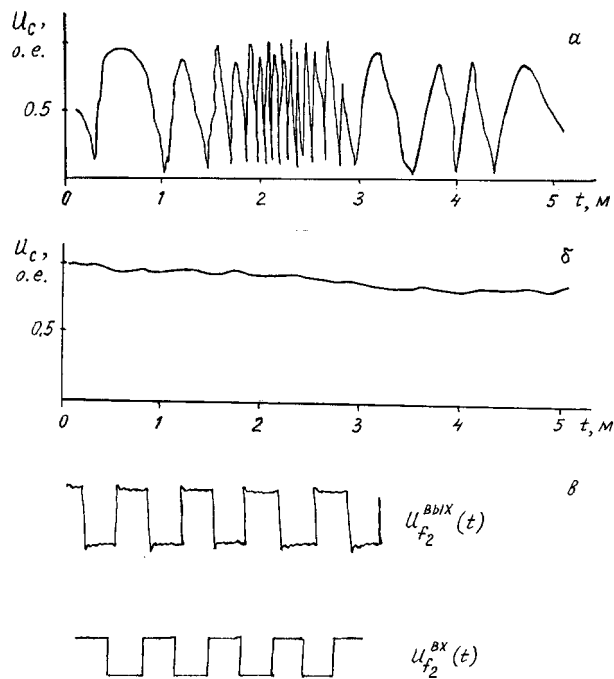


Рис. 3.

($\lambda = 0.63 \mu\text{м}$). В качестве тракта передачи фазовой модуляции сигнала использовалось оптическое волокно с диаметром сердцевины $d = 10 \mu\text{м}$, длиной 100 м. Для простоты оптической схемы использовался одноволоконный принимающий интерферометр Фабри–Перо ($d = 50 \mu\text{м}$) длиной 10 м. На торцы интерферометра были нанесены диэлектрические зеркала (коэффициент отражения по интенсивности $R = 60\%$). При такой добротности обеспечивалось повышение контрастности интерференции, но в то же время интерферометр был близок к двухлучевой модели. Для модуляции фазы оптического излучения (и для компенсирующих воздействий) использовались пьезокерамические цилиндрические волоконные фазовые модуляторы на передающем волокне и на интерферометре. Используемая элементная база позволяла исследовать только область, в которой $(\Omega L n / 2c) \ll \pi$, т. е. линейную

область частотной характеристики (2), а значит, фактически принимать производную модулирующего сигнала.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость $(\delta\varphi/\delta\psi)$ от частоты. Теоретическая зависимость для интерферометра Фабри–Перо с невысокой добротностью и $L = 20$ м (рис. 2, сплошная линия), очевидно, имеет вид

$$\frac{\delta\varphi}{\delta\psi} = 2 \cdot \sin(2\pi f \cdot Ln/2c) \approx 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot f \quad (6)$$

и хорошо сходится с экспериментальной.

Для демонстрации передачи сигналов посредством модуляции фазы света и приема внешним интерферометром на экспериментальной установке была реализована простая система стабилизации интерферометра. Стабилизация основана на введении вспомогательной модуляции сигнала интерферометра и минимизации второй гармоники этого сигнала на выходе за счет петли обратной связи с усилением. Результаты, приведенные ниже, получены при частоте вспомогательного сигнала $f_0 = 30$ кГц и "информационного сигнала" $f_1 = 500$ кГц.

На рис. 3, *а* приведен типичный временной дрейф выходного сигнала частотой 500 кГц (при разомкнутой петле стабилизации интерферометра). Фединг сигнала вызван прежде всего флуктуациями температуры интерферометра. На рис. 3, *б* изображено поведение сигнала 500 кГц после замыкания петли стабилизации. На рис. 3, *в* приведены осциллограммы, демонстрирующие передачу на поднесущей 500 кГц низкочастотного сигнала $f_2 = 1$ кГц (посредством амплитудной модуляции поднесущей).

В заключение следует отметить, что при использовании предлагаемого метода построения протяженных измерительных и передающих систем с фазовой модуляцией света:

устраняется фединг полезного сигнала, вызываемый дрейфом внешних условий канала распространения фазовой модуляции света (присущий другим методам построения подобных систем);

отсутствуют потери оптической мощности на диафрагмирование (необходимое в многомодовых системах с интерференцией мод);

протяженность и конфигурация тракта распространения сигнала не влияют на требования к когерентности источника излучения, на параметры интерферометра и методы регистрации полезного сигнала.

Список литературы

- [1] Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение / Ю.В. Гуляев, М.Я. Мещ, В.В. Проклов. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
- [2] *Davies D.E.N., Kingslay S. A.* // *Electr. Letters*. 1974. V. 10. N 2. P. 21–22.
- [3] *Евтихеев Н.Н., Засовин Э.А., Мировицкий Д.И.* // *Итоги науки и техники. Связь*. 1991. Т. 8. С. 24–109.
- [4] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
- [5] *Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бугусов, С.Л. Галкин и др.* Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1987. 328 с.
- [6] *Sheem S.K., Giallorenzi T.G., Koo K.* // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. N 4. P. 689–693.
- [7] *Оптоволоконные сенсоры. Принципы и компоненты. Вып. 1 / Дж. Дейкин и Б. Калшо.* М.: Мир, 1992. 438 с.
- [8] *Ball P.R., Culshaw B.* // *Electr. Letters*. 1980. V. 16. N 7. P. 259–260.
- [9] *Culshaw B., Ball P.R., Pond J.C., Sadler A.A.* // *Electronics and Power*. 1981. V. 11. N 2. P. 148–150.
- [10] *Ball P.R., Culshaw B., Kingsley S.A.* // *SPIE*. 1980. V. 232. P. 216–233.
- [11] *Иванов В.А., Привалов В.Е.* Применение лазеров в приборах точной механики. СПб.: Политехника, 1993. 216 с.