

07;01;12

Когерентный провал в огибающей сигнала интерферометра с источником частично когерентного излучения

© М.И. Лобачев, Д.В. Лякин, В.П. Рябухо

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов
Саратовский государственный университет
E-mail: rvp@sgu.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 9 июня 2000 г.

При использовании в интерферометре смешанного излучения физически различных источников с существенно отличающимися по ширине спектральными контурами в огибающей временного интерференционного сигнала при определенных условиях формируется одиночный провал, который может быть использован в качестве измерительного сигнала.

В низкокогерентной интерферометрии для расширения спектрального контура излучения и соответствующего сужения функции временной когерентности и, как следствие, обострения огибающей интерференционного сигнала используют смешанное излучение от двух и более источников света с немного отличающимися центральными частотами [1,2]. Однако если центральные частоты отличаются более чем на ширину спектрального контура и в спектре смешанного излучения имеют место отчетливые локальные максимумы, то в интерференционном сигнале появляются осцилляции его огибающей, поскольку функция временной когерентности излучения с таким спектром имеет осциллирующий характер [3]. Эти осцилляции огибающей сигнала в существенно неравноплечных интерферометрах, в том числе и лазерных, проявляются как мешающий фактор [4], но и могут использоваться в измерительных задачах [5]. Цель настоящей работы заключалась в установлении условий формирования одиночного (изолированного) минимума–провала, в огибающей временного интерференционного сигнала.

Для сигнала интерферометра $u_p(\Delta t)$, например интерферометра Майкельсона, при условии взаимной пространственной когерентности интерферирующих волн можно записать следующее упрощенное выра-

жение:

$$u_p(\Delta t) \sim I_R + I_S + 2|\Gamma(\Delta t)| \cos(\bar{\omega}\Delta t + \alpha), \quad (1)$$

где I_R , I_S и $\Gamma(\Delta t)$ — соответственно интенсивности и функция временной когерентности интерферирующих волн; $\alpha = \arg \Gamma(\Delta t)$; $\bar{\omega}$ — средняя частота излучения. Функция $|\Gamma(\Delta t)|$ выполняет роль огибающей интерференционного сигнала.

Для модуля функции временной когерентности смешанного излучения от двух физически различных, следовательно взаимно некогерентных источников, можно записать выражение, имеющее, важно подчеркнуть, вид интерференционного уравнения:

$$\begin{aligned} |\Gamma(\Delta t)|^2 &= |\Gamma_1(\Delta t)|^2 + |\Gamma_2(\Delta t)|^2 \\ &+ 2|\Gamma_1(\Delta t)||\Gamma_2(\Delta t)| \cos(\Delta\omega_{12}\Delta t + \Delta\Phi), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Gamma_1(\Delta t)$, $\Gamma_2(\Delta t)$ — функции временной когерентности излучений источников; $\Delta\omega_{12} = \bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_2$ — разность частот этих излучений; $\Delta\Phi$ — разность фаз волн средних частот смешиваемых излучений.

При $\Delta\Phi = 0$ симметрично относительно положения максимума огибающей сигнала $|\Gamma(\Delta t = 0)|$ будут наблюдаться локальные минимумы при условии $2\pi/\Delta\omega_{12} < \min(\tau_{c1}, \tau_{c2})$, где τ_{c1} и τ_{c2} — времена когерентности излучений. Если параметры τ_{c1} и τ_{c2} существенно отличаются, то провал функции $|\Gamma(\Delta t)|$ до нулевого значения имеет место только для одной пары симметричных минимумов, когда

$$|\Gamma_1(\Delta t)| \exp(i\bar{\omega}_1 \Delta t) = -|\Gamma_2(\Delta t)| \exp(i\bar{\omega}_2 \Delta t).$$

Для наблюдения одиночного минимума на всем интервале Δt существования интерференционного сигнала $|\Delta t| \leq \max(\tau_{c1}, \tau_{c2})$ необходим отличный от нуля фазовый сдвиг $\Delta\Phi$ и выполнение условия

$$2 \min(\tau_{c1}, \tau_{c2}) < 2\pi/\Delta\omega_{12} \quad (3)$$

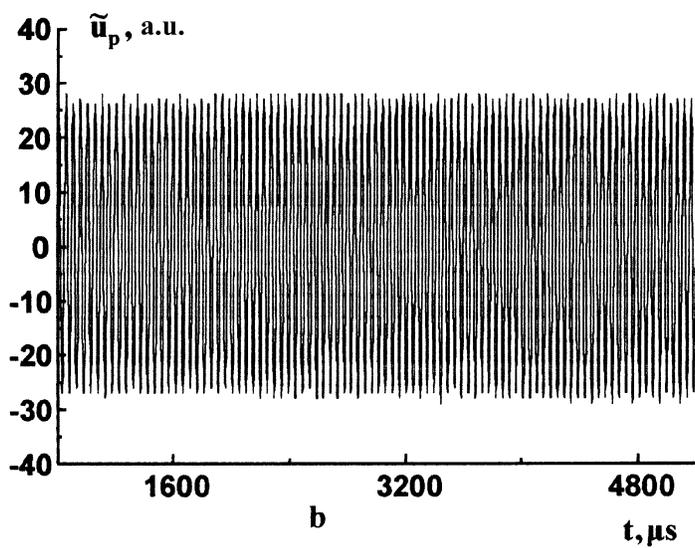
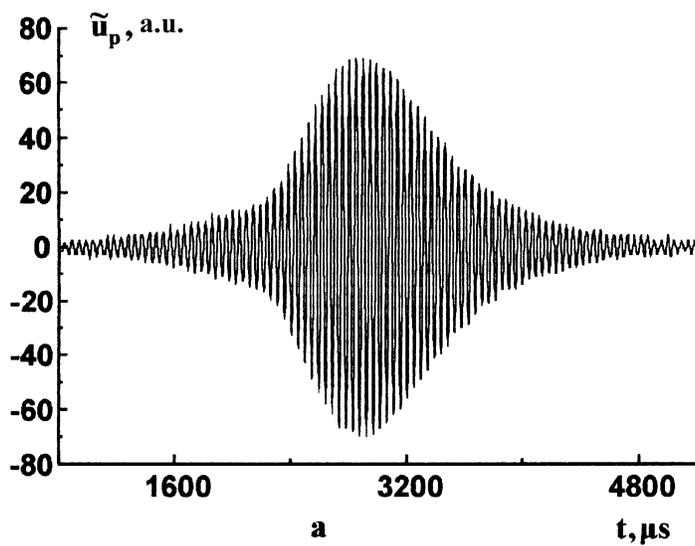
— период осцилляций превышает полную ширину функции когерентности излучения с наименьшей длиной когерентности τ_c . Если $\Delta\Phi = \pi$, то провал в огибающей интерференционного сигнала должен наблюдаться при нулевой разности хода $\Delta t = 0$.

Для экспериментальной проверки возможности наблюдения одиночного провала в интерференционном сигнале нами использовался интерферометр Майкельсона с источниками света — красным светодиодом марки HLMP-8103 ($\bar{\lambda}_1 = 0.6354 \mu\text{m}$) и He-Ne-лазером ($\bar{\lambda}_2 = 0.6328 \mu\text{m}$). Полуширина спектра излучения светодиода составляла $\Delta\lambda_1 \approx 13 \text{ nm}$, соответственно длина когерентности $l_{c1} = c\tau_{c1} \approx 7 \mu\text{m}$. В интерферометре для создания временного сигнала использовалось колеблющееся с большой амплитудой $l_a > 2l_{c1}$ опорное зеркало.

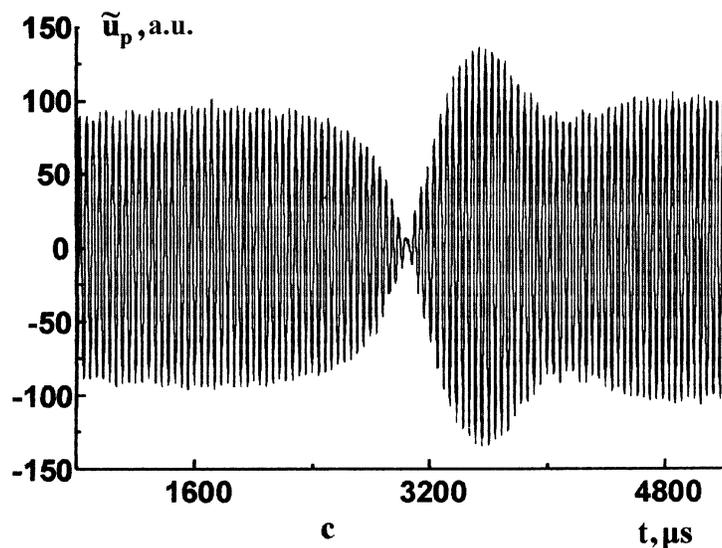
На рисунке приведены экспериментальные цифровые осциллограммы переменной составляющей сигнала интерферометра \tilde{y}_p , полученные: *a* — при использовании излучения одного светодиода; *b* — с лазерным светом; *c* — при использовании смешанного излучения светодиода и лазера. Соотношения разности длин волн (частот) и длины (времени) когерентности излучения светодиода удовлетворяют условию (3) для наблюдения одиночного провала в огибающей сигнала.

Отличный от нуля фазовый сдвиг $\Delta\Phi$ для волн с различной частотой может образоваться в интерферометре только благодаря различию в разностях оптических путей этих волн. Такое различие возникает при наличии слоя диспергирующей среды в одном из плеч интерферометра. Для возникновения фазового сдвига $\Delta\Phi = \pi$, например в стекле марки К-8 с дисперсией $dn/d\lambda = -3.4 \cdot 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ в области $\bar{\lambda} = 0.63 \mu\text{m}$, достаточно слоя толщины $h \approx 140 \mu\text{m}$ с учетом двойного прохождения слоя светом в интерферометре Майкельсона. Отметим, что такой слой может иметь место за счет неточности изготовления делительного кубика, что и наблюдалось в эксперименте.

Полуширина провала определяется разностью центральных частот смешиваемых излучений, и она может быть заметно меньше, чем полуширина огибающей сигнала от одного из смешиваемых излучений с меньшей длиной когерентности (см. рисунок, *a* и *b*). Эта особенность сигнала с провалом может быть использована для увеличения точности интерференционного контроля положения объекта. Изменение разности фаз $\Delta\Phi$ и, следовательно, положения провала в интерференционном сигнале, в зависимости от оптической толщины диспергирующей среды в интерферометре, также может быть использовано в высокоточных интерференционных измерениях. При изменении $\Delta\Phi$ на $\delta(\Delta\Phi)$ провал переместится в шкале интерференционных осцилляций сигнала на $\delta t = \delta(\Delta\Phi)\bar{\omega}/2\pi\Delta\omega_{12}$, где $\bar{\omega} = (\bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)/2$ — средняя частота смешанного излучения.



Экспериментальные цифровые осциллограммы сигнала интерферометра Майкельсона, полученные при использовании: низкокогерентного (спектрально-широкополосного) излучения (a), лазерного (b) и смешанного излучений (c).



(Продолжение рисунка).

Одиночный провал в огибающей интерференционного сигнала можно получить не только путем смешения излучений двух физически различных источников, но и путем интерференционного преобразования спектра излучения широкополосного источника [6]. Для этого в предварительном (осветительном) интерферометре, например интерферометре Майкельсона, необходимо реализовать взаимную задержку волн, сравнимую со временем когерентности $\Delta t \approx \tau_c$, при разности фаз в π рад для центральных частот спектра исходного излучения.

Поскольку в вышерассмотренном интерферометре реализуется некогерентное смешение на фотоприемнике двух интерференционных сигналов с несколько отличающимися периодами осцилляций, то образование провалов в огибающей результирующего сигнала можно рассматривать как эффект биений этих сигналов. Следовательно, аналогичный результат можно получить путем электрического смешения фотоэлектрических сигналов двух интерферометров с низкокогерентным излучением, синхронизированных движением одного общего опорного зеркала. В этом случае не обязательно использовать излучения с различными

частотами; для получения интерференционных осцилляций сигналов с отличающимися периодами достаточно ввести небольшую угловую расстройку в направлении освещения в одном из интерферометров. Такая система из двух интерферометров будет выполнять роль "оптических весов", реагируя с субмикронной чувствительностью на относительное изменение разности оптических путей в интерферометрах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 00-15-96667, программа "Ведущие научные школы РФ".

Список литературы

- [1] *Schmitt J.M., Lee S.L., Yung K.M.* // Opt. Commun. 1997. N 142. P. 203–207.
- [2] *Wang D.N., Ning Y.N., Grattan K.T.V., Palmer A.W., Weir K.* // Appl. Opt. 1994. N 33. P. 7326–7333.
- [3] *Стюард И.Г.* Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1985. 182 с.
- [4] *Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Николаев В.М., Петрунькин В.Ю., Зехрауи Б.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 20. С. 61–69.
- [5] *Golubev A.N., Chekhovsky A.M.* // Opt. Eng. 1997. N 36(8). P. 2229–2232.
- [6] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.