

07;12

Спектр фазового шума в пентагональном кольцевом интерферометре "Дулкын" и тестовые эксперименты по обнаружению слабого периодического сигнала

© А.Р. Агачев, А.Б. Балакин, Г.В. Кисунько,
С.В. Маврин, З.Г. Мурзаханов, А.Ф. Скочиллов, Ю.П. Чугунов

Научный центр гравитационно-волновых исследований
на правах института АН Татарстана, Казань

Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.

Описаны результаты первых долговременных экспериментов на пентагональном интерферометре, которые позволили отработать процесс обнаружения заданного имитационного сигнала на фоне помех.

В рамках работы над проектом "Дулкын" по детектированию периодического гравитационного излучения [1,2] коллективом Объединенной экспериментальной лаборатории гравитационно-оптических исследований был собран, отъюстирован и успешно опробован пентагональный кольцевой двухконтурный лазерный интерферометр, работающий в пассивном режиме [3].

Начиная с декабря 1997 года на пентагональном интерферометре были проведены несколько серий непрерывных долговременных экспериментов (до 8 суток каждый), которые позволили изучить спектр фазового шума в пентагональном интерферометре в области частот от 10^{-5} до 10^{-1} Hz, а также отработать процесс обнаружения заданного периодического (имитационного) сигнала на фоне реальных фазовых помех в условиях действия сервосистемы стабилизации (СС) разности фаз интерферирующих пучков [4].

Выбор указанного нетрадиционного для интерферометрических исследований крайне низкочастотного диапазона обусловлен тем, что проект "Дулкын" ориентирован на детектирование периодического гравитационного излучения от двойных релятивистских астрофизических объектов, излучающих гравитационные волны именно в этой области

частот. По той же причине фазовый модулятор, использованный для имитации детектируемого сигнала, располагался именно в сигнальном контуре пентагонального интерферометра.

1. Спектральная плотность шума

Сервосистема стабилизации была выполнена в аналого-цифровом варианте с использованием компьютера, который управлял процессом стабилизации по разработанной универсальной программе. Основным элементом СС являлся специальный фазовый модулятор ФМ [4], представляющий собой комбинацию тонких диэлектрических пластин с возможностью их управляемого от компьютера поворота на малые углы вокруг вертикальной оси. ФМ обеспечивал возможность минимизации по амплитуде флуктуаций разности фаз $\Phi(t)$ в интерференционной картине до уровня не более $\Phi_0 = 10^{-2}$ рад ("порог стабилизации").

С теоретической точки зрения изменение разности фаз в интерференционном поле можно представить в виде

$$\Phi(t) = \varphi(t) + \varphi_s \sin(\Omega_s t) + \Psi_{\text{ФМ}}(t), \quad (1)$$

где первый член суммы представляет нередуцированный фазовый шум интерферометра $\varphi(t)$, который можно наблюдать при отключении СС; второй член — заданное периодическое изменение фазы, имитирующее полезный сигнал с амплитудой φ_s и частотой Ω_s ; третий член описывает управляемые изменения фазы, вносимые ФМ системы СС по сигналу ошибки. Пусть $\max |\varphi(t)|$ — верхний порог нередуцированного шума в интерферометре. Система стабилизации дает возможность зафиксировать сумму $\xi(t) = \varphi(t) + \Psi_{\text{ФМ}}(t)$ на уровне $|\xi(t)| \leq \Phi_0$, причем верхний порог для редуцированного шума $\xi(t)$ на несколько порядков ниже, чем $\max |\varphi(t)|$.

Спектральная плотность флуктуаций нередуцированного фазового шума $S_\varphi(\nu) = F[\langle \varphi(t)\varphi(t+\tau) \rangle]$, где $\langle \varphi(t)\varphi(t+\tau) \rangle$ — автокорреляционная функция, а $F[\dots]$ — оператор Фурье-преобразования, связана с аналогичной функцией $S_\xi(\nu)$ для редуцированного шума соотношением

$$S_\xi(\nu) = \frac{S_\varphi(\nu)}{(1 + K(\nu))^2}$$

($K(\nu)$ — коэффициент усиления в цепи обратной связи).

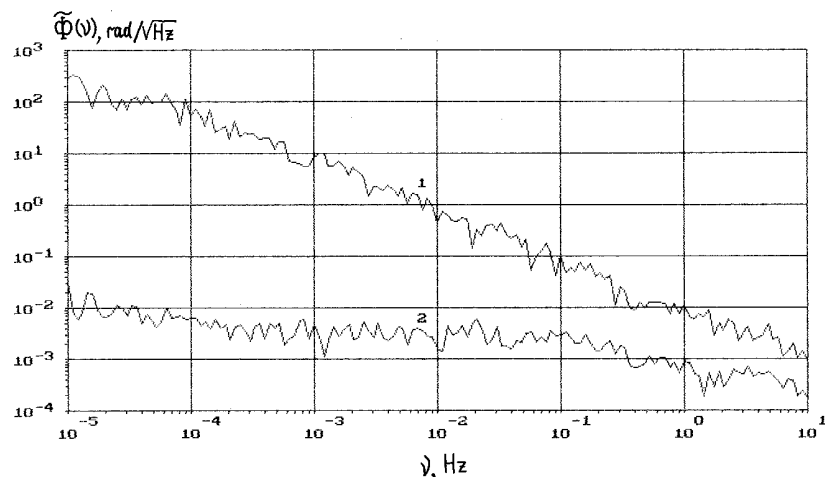


Рис. 1. Спектральная плотность амплитуды фазового шума (система стабилизации: 1 — выключена, 2 — включена).

Спектральные плотности амплитуды нередуцированного $\tilde{\varphi}(\nu) = \sqrt{S_{\varphi}(\nu)}$ (кривая 1) и редуцированного $\tilde{\xi}(\nu) = \sqrt{S_{\xi}(\nu)}$ (кривая 2) шумов как функции частоты ν , вычисленные на основе экспериментальных данных, представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, нередуцированный шум интерферометра имеет спектр, характерный для фликкер-шума, и может быть аппроксимирован функцией $\tilde{\varphi}(\nu) \simeq \tilde{\varphi}_0 \nu_0 / \nu$ с параметрами $\nu_0 = 10^{-5}$ Hz и $\tilde{\varphi}_0 = 5 \cdot 10^2$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Редуцированный шум в области частот от 10^{-5} до 10^{-1} Hz достаточно хорошо аппроксимируется белым шумом: $\tilde{\xi}(\nu) \simeq \xi_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Соответственно коэффициент усиления $K(\nu)$ для этой области частот может быть представлен в виде $K(\nu) \simeq \tilde{\varphi}_0 \nu_0 / \xi_0 \nu - 1$.

2. Выделение сигнала из шума

Благодаря тому что частота гравитационных волн, излучаемых двойными релятивистскими астрофизическими объектами типа PSR J1537 + 1155, известна с большой точностью, для выделения полезного

сигнала из шумов в детекторе "Дулкын" можно использовать хорошо известный гребенчатый адаптивный фильтр накопления (ГАФИН) [1,2].

Принцип работы ГАФИНа, который во многом похож на известный метод многоканального уплотнения, заключается в следующем. Период искомого сигнала $T_s = 2\pi/\Omega_s$ разбивается на M временных интервалов длительностью $\Delta t = T_s/M$. Затем в течение одного периода T_s сигнала в моменты времени $t_m = m\Delta t$ ($m = 0, 1, \dots, M$) измеряются значения фазы $\Phi_m = \Phi(t_m)$, которые нумеруются и заносятся в определенные ячейки памяти компьютера. Далее, в течение следующего периода сигнала процедура повторяется, и результаты измерений добавляются в соответствующие ячейки. В итоге после N периодов накопления будем иметь

$$\Phi_m = \sum_{j=1}^N \Phi(t_{mj}), \quad t_{mj} = \left(\frac{m}{M} + j - 1\right) T_s. \quad (2)$$

Если подставить (1) в (2), то формально на выходе ГАФИНа получаем

$$\Phi_m = N\varphi_s \sin\left(2\pi\frac{m}{M}\right) + \sum_{j=1}^N \xi(t_{mj}). \quad (3)$$

Первый член суммы в уравнении (3) представляет собой когерентно накопленный сигнал, амплитуда которого в N раз больше амплитуды исходного сигнала φ_s . При оценке второго члена суммы нужно проявить достаточную осторожность.

В случае отсутствия ($\varphi_s = 0$) полезного сигнала в (1), величина $\xi(t)$ является случайной стохастической функцией, поскольку система стабилизации "обрабатывает" случайный собственный шум интерферометра $\varphi(t)$, и поэтому второй член суммы в (3) будет расти по закону \sqrt{N} .

При наличии периодического сигнала ($\varphi_s \neq 0$) возможны два варианта: либо амплитуда сигнала φ_s настолько мала, что СС не "чувствует" его присутствия, и тогда $\xi(t)$ по-прежнему остается случайной величиной; либо (при достаточно большой амплитуде сигнала) СС начнет его "отрабатывать" и в $\xi(t)$ появится регулярная часть, ответственная за компенсацию сигнала. В первом случае второй член суммы в (3) будет расти по закону \sqrt{N} , и после достаточного количества накопленных периодов первый член суммы превысит второй, т.е. полезный сигнал будет обнаружен. Во втором случае выделить полезный сигнал из шума невозможно.

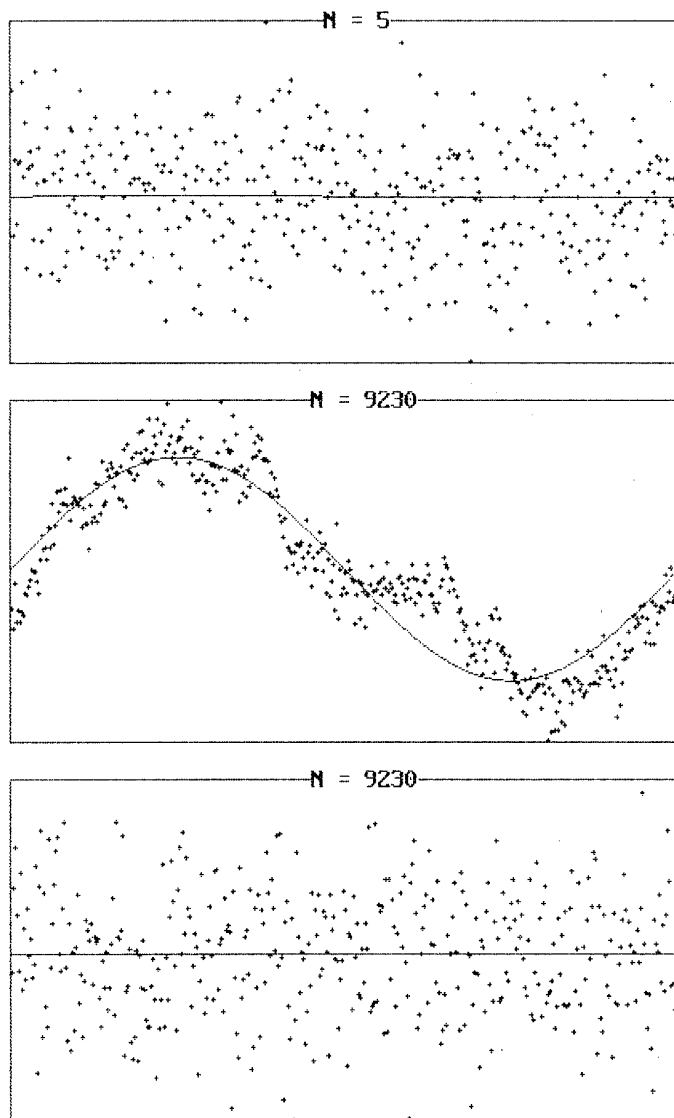


Рис. 2. Экспериментальные результаты работы ГАФИНа.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в двухконтурном пентагональном интерферометре "Дулкын" система стабилизации не уничтожает полезный периодический сигнал, если его амплитуда по крайней мере на два порядка меньше "порога стабилизации" Φ_0 . На рис. 2 представлены характерные результаты работы ГАФИН на примере сигнала с амплитудой $\varphi_s = 10^{-4}$ rad и частотой $\Omega_s = 1.460 \cdot 10^{-2}$ Hz. На трех диаграммах рис. 2 точками отмечены значения $\Phi_m(M = 3185)$, а сплошная линия характеризует заданный сигнал. На верхней и средней диаграммах период накопления точно совпадал с периодом сигнала, а на нижней диаграмме период накопления соответствовал частоте $\Omega = 1.461 \cdot 10^{-2}$ Hz. Как видно из рис. 2, при количестве накопленных периодов $N = 9230$ на частоте детектируемого сигнала возможно его уверенное выделение (см. среднюю диаграмму) из шума, максимальная амплитуда которого на два порядка больше амплитуды сигнала (см. верхнюю диаграмму). При приближении амплитуды сигнала φ_s к "порогу стабилизации" Φ_0 полезный сигнал разрушался, и результат его накопления становился похож на нижнюю диаграмму рис. 2.

3. Заключение

1. На кривой спектральной плотности фазового шума, редуцированного сервосистемой стабилизации пентагонального интерферометра "Дулкын", отсутствует аномальный рост при частотах, близких к нулю; поведение кривой в области частот менее одного герца типично для белого шума и принципиально отличается в этом смысле от неограниченно растущих спектральных кривых, характерных для длиннобазовых лазерно-интерферометрических гравитационно-волновых детекторов.

2. Сервосистема стабилизации разности фаз интерферирующих пучков пентагонального интерферометра "Дулкын" не уничтожает периодический полезный сигнал до тех пор, пока порог стабилизации на два (или более) порядка превышает амплитуду полезного сигнала; в этом случае гребенчатый адаптивный фильтр накопления позволяет уверенно выделить периодический полезный сигнал из шума.

Список литературы

- [1] Балакин А.Б., Кисунько Г.В., Мурзаханов З.Г., Скочилов А.Ф. // Докл РАН. 1996. Т. 346. № 1. С. 39–42.
- [2] Balakin A.B., Murzakhanov Z.G., Skochilov A.F. // Gravitation and Cosmology. 1997. V. 3. N 1 (9). P. 71–81.
- [3] Агачев А.Р. и др. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 5. С. 121–125.
- [4] Константинов И.Б., Мурзаханов З.Г., Скочилов А.Ф. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1998. № 2. С. 22–28.