

Свободные от шумов смещений
интерферометрические гравитационные антенны
с многочастотной накачкой

А. А. Рахубовский, С. П. Вятчанин

Москва, 4 сентября 2009 г.



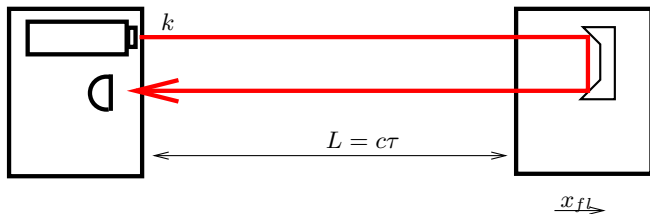
План доклада

Введение

Многочастотная накачка



Идея антенны, свободной от смещений



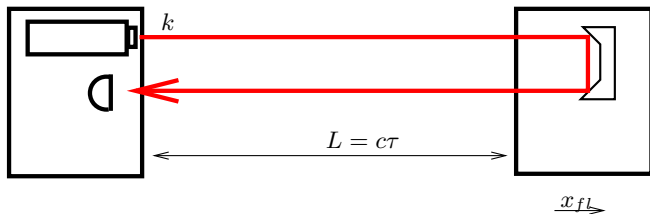
Сигнал простейшего “round-trip” датчика

$$I(\Omega) \simeq a_{fl} + Akx_{fl} + AkLh$$

a_{fl} — лазерные флуктуации,
 x_{fl} — флуктуационное смещение пробного тела,
 h — гравитационный сигнал.



Идея антенны, свободной от смещений



Сигнал простейшего “round-trip” датчика

$$I(\Omega) \simeq a_{fl} + Akx_{fl} + AkLh$$

Сигнал DFI прибора

$$I_{DFI}(\Omega) \simeq a_{fl} + (\Omega\tau)^n AkLh$$

Флуктуационные смещения исключены.

a_{fl} — лазерные флуктуации,

x_{fl} — флуктуационное смещение пробного тела,

h — гравитационный сигнал.



Идея антенны, свободной от смещений

Идея: распределенный эффект ГВ

Гравитационные волны и флуктуации пробных тел по разному влияют на интерферометр. Надлежащая комбинация откликов интерферометра позволяет исключить флуктуации пробных масс, но сохранить информацию о ГВ.

В 2004 С. Кавамура и Я. Чен

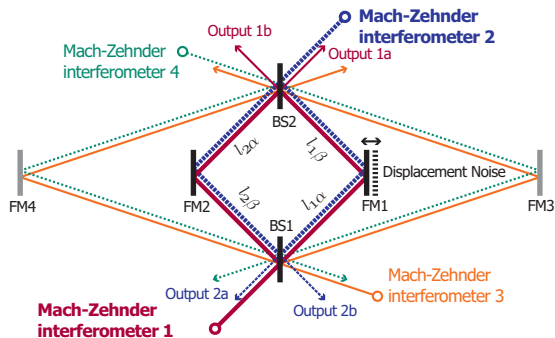
предложили т.н. “свободный от смещений” (DFI) интерферометр, сигнал которого не содержит ни флуктуаций пробных масс, ни лазерного шума ¹.

¹S. Kawamura, Y. Chen, PRL, **93**, 211103 (2004),
Y. Chen, S. Kawamura, PRL, **96**, 231102 (2006),
Y. Chen, A. Pai, K. Somiya, S. Kawamura, S. Sato, K. Kokeyama, R. Ward, K. Goda and E. Mikhailov, PRL, **97**, 151103 (2007),
S. Sato, K. Kokeyama, R. Ward, S. Kawamura, Y. Chen, A. Pai, K. Somiya, PRL, **98**, 141101 (2007)



2D интерферометр Маха–Цандера

Kawamura, Chen *et al* [PRL,**97**, 151103(2006)]:



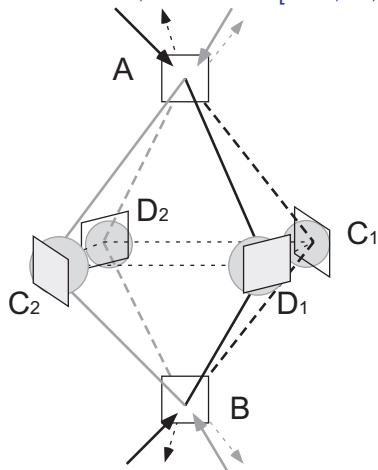
Комбинируя отклики **можно избавиться от флуктуаций всех 6 зеркал** и сохранить ГВ-сигнал.

“Цена”: в длинноволновом приближении ($L \ll \lambda_{GW}$) “свободный от смещений” сигнал уменьшается на множитель $(\Omega_{GW}L/c)^3$.



3D интерферометр Маха–Цандера

Kawamura, Chen *et al* [PRL,**97**, 151103(2006)]:

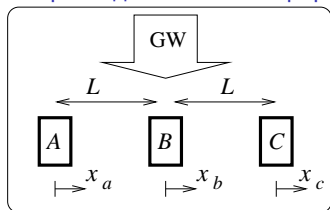


“Цена”: в длинноволновом приближении ($L \ll \lambda_{GW}$) “свободный от смещений” сигнал уменьшается на множитель $(\Omega_{GW}L/c)^2$.



Упрощенная модель из трех платформ

Три подвижные платформы



Комбинируя^a сигналы детекторов, расположенных на платформах A и B (используя некоторую комбинацию C_{AB}), можно избавиться от флуктуаций платформы A .

^aA.A. Rakhubovsky, S.P. Vyatchanin, Phys. Lett. **A373**, 13 2008

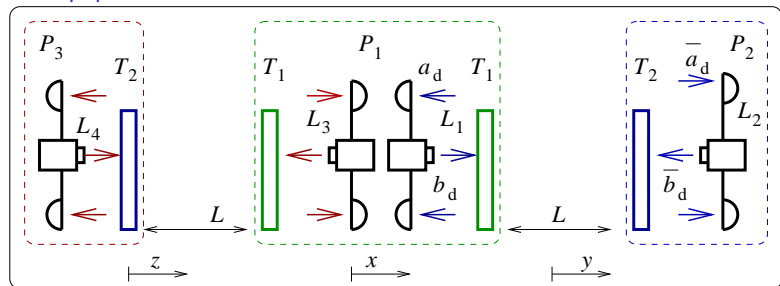
Используя сигналы детекторов, расположенных на платформах B и C , можно исключить флуктуации платформы C в комбинации C_{BC} . Сумма $C_{AB} + C_{BC}$ не содержит флуктуаций ни одной из платформ. “Цена” — ослабление гравитационного сигнала (в длинноволновом приближении на множитель $\sim (\Omega\tau)^2$):

$$C_{AB}(\Omega) + C_{BC}(\Omega) \simeq (\Omega\tau)^2 kLh(\Omega)$$



Два интерферометра Фабри–Перо на 3 платформах

Два накачиваемых с двух сторон интерферометра Фабри–Перо на 3 платформах



Манипулируя откликами интерферометров, можно исключить флуктуации всех платформ в соответствующей комбинации C_{DFI} .



Два интерферометра Фабри–Перо на 3 платформах

В длинноволновом приближении:

$$C_{\text{DFI}} \simeq \text{Флуктуационные компоненты} + \left(\frac{\sqrt{T_1^3 T_2}}{T_1^2 + T_2^2} \frac{\gamma \delta \Omega}{((\gamma - i\Omega)^2 + \delta^2)(\gamma - i\delta)} \right) (\Omega\tau) AkLh(\Omega),$$

Благодаря резонансному выигрышу ослабление гравитационного сигнала происходит только на множитель $\sim \Omega\tau$ по сравнению с простейшим детектором (не $\sim (\Omega\tau)^2$).

Основные недостатки

Модель с тремя платформами **мысленная**: слишком много устройств должно быть закреплено на **одной** платформе.



План доклада

Введение

Многочастотная накачка



Два интерферометра Фабри–Перо на 3 платформах

Основные недостатки

- ▶ Слишком много устройств должно быть жестко закреплено на **каждой (особенно, центральной)** платформе.
- ▶ Дополнительные зеркала

Разделение платформ \Rightarrow рост числа неизвестных \Rightarrow нужно увеличить количество сигналов.

Каждый выходной сигнал дает одно линейное алгебраическое уравнение.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{1x}\mathbf{x} + a_{1y}\mathbf{y} + a_{1z}\mathbf{z} + a_{1h}\mathbf{h} = \text{сигнал}_1, \\ \dots \\ \underbrace{a_{nx}\mathbf{x} + a_{ny}\mathbf{y} + a_{nz}\mathbf{z}}_{\text{смещения}} + \underbrace{a_{nh}\mathbf{h}}_{\text{ГВ}} = \text{сигнал}_n. \end{array} \right.$$

Свободный от смещений сигнал — решение системы относительно \mathbf{h} .
Количество уравнений должно совпадать с количеством неизвестных.



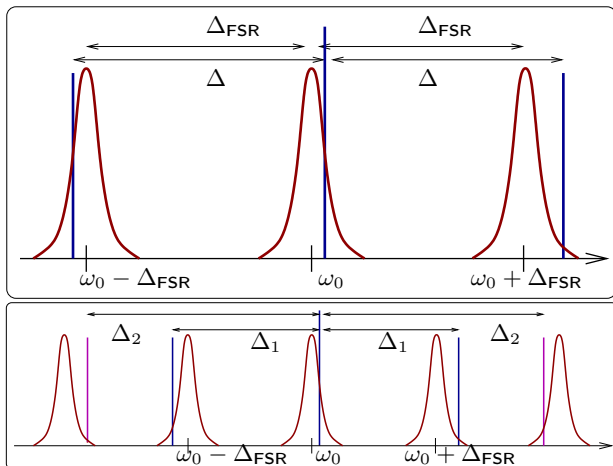
Многочастотная накачка

Лазер может излучать несколько частот. Много выходных сигналов. Амплитудная модуляция — несущая ω_0 и “крылья” $\omega_0 \pm \Delta$ (2 сигнала).

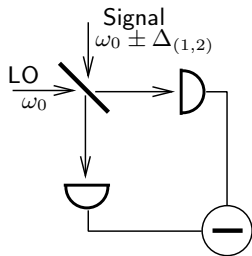
$$\Omega_{GW} \ll \Delta_{FSR} \lesssim \Delta.$$

Можно измерять только **отраженный** свет (не прошедший).

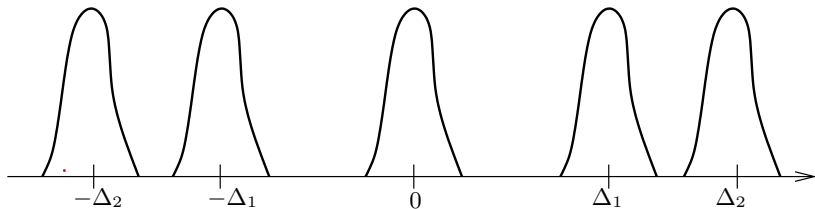
Простейший случай амплитудной модуляции



Детектирование многочастотного сигнала

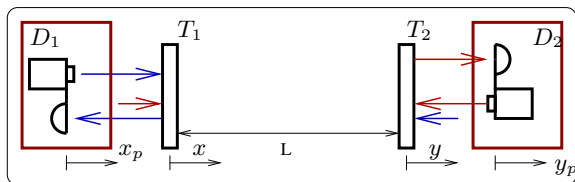


Детектирование амплитудно-модулированного сигнала дает несколько "полос" сигнала, разделенных радиочастотами. Сигналы в этих "полосах" можно измерять независимо друг от друга.



Двухчастотная накачка

Схема прибора

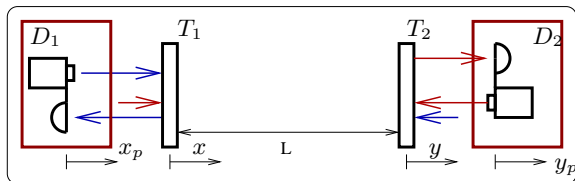


- ▶ Измеряется только отраженный сигнал
- ▶ Не нужны дополнительные зеркала



Двухчастотная накачка

Схема прибора



Система уравнений (анализ комплексных амплитуд)

$$\begin{cases} C_{1xp} \mathbf{X}_p + C_{1x} \mathbf{X} + C_{1y} \mathbf{Y} + C_{1yp} \mathbf{Y}_p + \underbrace{C_{1h}}_{\text{ГВ}} \mathbf{h} = \text{сигнал}_1, \\ C_{2xp} \mathbf{X}_p + C_{2x} \mathbf{X} + C_{2y} \mathbf{Y} + C_{2yp} \mathbf{Y}_p + \underbrace{C_{2h}}_{\text{ГВ}} \mathbf{h} = \text{сигнал}_2, \\ C_{3xp} \mathbf{X}_p + C_{3x} \mathbf{X} + C_{3y} \mathbf{Y} + C_{3yp} \mathbf{Y}_p + \underbrace{C_{3h}}_{\text{ГВ}} \mathbf{h} = \text{сигнал}_3, \\ \underbrace{C_{4xp} \mathbf{X}_p + C_{4x} \mathbf{X} + C_{4y} \mathbf{Y} + C_{4z} \mathbf{Y}_p}_{\text{смещения}} + \underbrace{C_{4h}}_{\text{ГВ}} \mathbf{h} = \text{сигнал}_4. \end{cases}$$

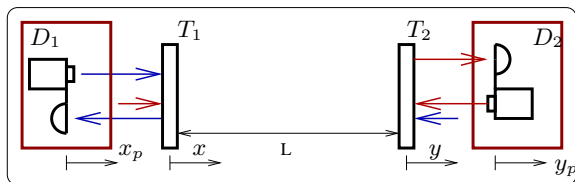
Четыре независимых уравнения, пять неизвестных.

⇒ Нужно использовать одну из неизвестных (x_p), как параметр.



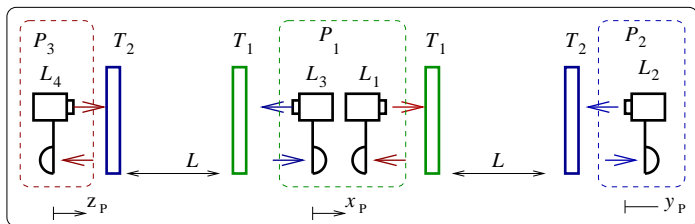
Двухчастотная накачка

Схема прибора



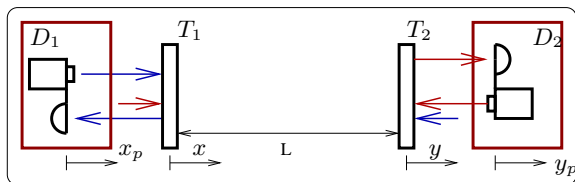
Решение

Используем одно из смещений (x_p), как параметр.



Трехчастотная накачка

Схема прибора

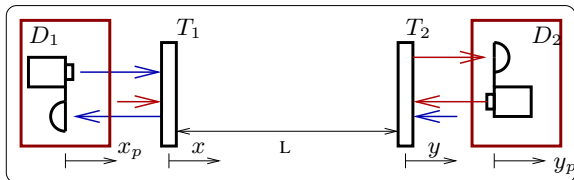


Измеряется только отраженный сигнал



Трехчастотная накачка

Схема прибора



Система уравнений (анализ комплексных амплитуд)

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{1xp}x_p + C_{1x}x + C_{1y}y + C_{1yp}y_p + \underbrace{C_{1h}}_{\text{ГВ}} h = \text{сигнал}_1, \\ C_{2xp}x_p + C_{2x}x + C_{2y}y + C_{2yp}y_p + \underbrace{C_{2h}}_{\text{ГВ}} h = \text{сигнал}_2, \\ \dots \\ \underbrace{C_{6xp}x_p + C_{6x}x + C_{6y}y + C_{6z}y_p}_{\text{смещения}} + \underbrace{C_{6h}}_{\text{ГВ}} h = \text{сигнал}_6. \end{array} \right.$$

Шесть уравнений, **пять** неизвестных.

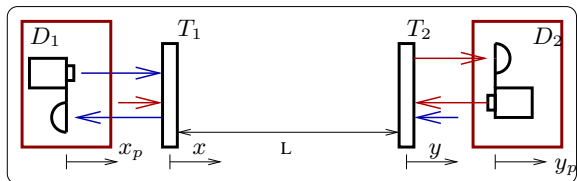
Ранг системы (в комплексных амплитудах) равен **четырем**.

Третья частота накачки излишня.



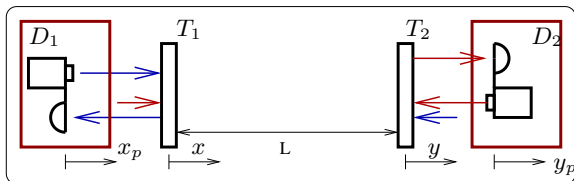
Измерение квадратур (двухчастотная накачка)

Схема прибора

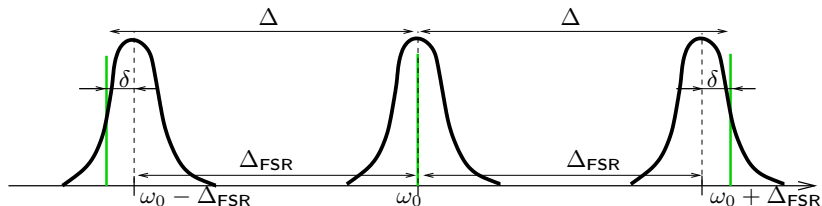


Измерение квадратур (двухчастотная накачка)

Схема прибора



Симметричные расстройки

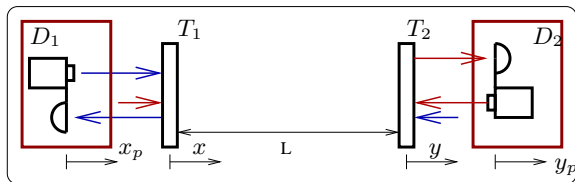


- ▶ В несущей моде измеряется фазовая квадратура
- ▶ В «крыльях» измеряются амплитудные квадратуры

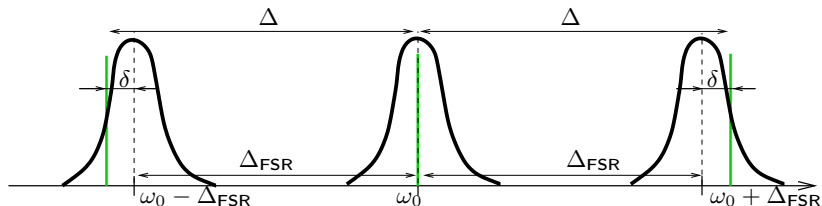


Измерение квадратур (двухчастотная накачка)

Схема прибора



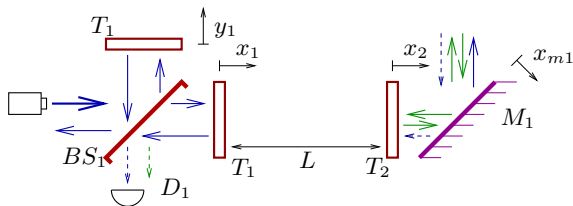
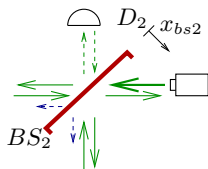
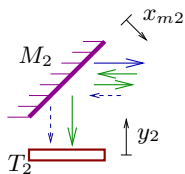
Симметричные расстройки



Исключение флуктуаций происходит также ценой ослабления сигнала на множитель порядка $\sim (\Omega\tau)^2$.



Балансная схема



6 неизвестных: 2 координаты светодетелей, 2 разностные координаты зеркал интерферометра Майкельсона, сумма координат зеркал M_1 и M_2 , гравитационный сигнал.



Возможно создание интерферометра, свободного от смещений!

Рассмотренная схема, состоящая из двух интерферометров Фабри-Перо **со свободными зеркалами** каждый из которых накачивается с двух сторон на двух частотах, позволяет избавиться от флуктуационных смещений всех пробных тел, а также лазеров и детекторов.

Уменьшение чувствительности

Исключение флуктуационных смещений происходит за счет ослабления гравитационного сигнала на множитель, который для низких частот имеет вид $\sim (\Omega\tau)^2$ (результат лучше, чем для плоского интерферометра Маха-Цандера).



Планы на будущее

В обозримом будущем планируется:

- ▶ Определить наилучший набор параметров расстройки
- ▶ Определить, какие из квадратур измерять
- ▶ Конкретизировать балансные схемы для подавления лазерных шумов

