

УДК 621.373:535

С.Ф. Левин, д-р техн. наук,
З.Г. Мурзаханов

ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВОЙНЫХ ПУЛЬСАРОВ

Обсуждается возможность построения гравитационно-волнового детектора как пассивного пеленгатора источников низкочастотного гравитационного излучения двойных релятивистских астрофизических объектов – двойных пульсаров типа PSR J0737-3039.

Ключевые слова: гравитационно-волновой детектор, двойная лазерная система на бегущих волнах, гравитационное излучение двойных пульсаров.

S.F.Levin, ScD.,
Z.G.Murzahanov

THE DETECTOR OF GRAVITATIONAL RADIATION OF DOUBLE PULSARS

Possibility of construction of the gravitation-wave detector as passive direction finder for a source of low-frequency gravitational radiation from double relativistic astrophysical objects – double pulsars of type PSR J0737-3039 is discussed.

Keywords: gravitation-wave detector, double laser system on running waves, gravitational radiation from double pulsars.

С.Ф. Левин, д-р техн. наук,
З.Г. Мурзаханов

ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОДВІЙНИХ ПУЛЬСАРІВ

Обговорюються можливості створення гравітаційно-хвильового детектора як пасивного пеленгатора джерел низькочастотного гравітаційного випромінювання подвійних релятивістських астрофізичних об'єктів – пульсарів типу PSR J0737-3039.

Ключові слова: гравітаційно-хвильовий детектор, подвійна лазерна система на хвилях, що бігають, гравітаційне випромінювання подвійних пульсарів.

Проблема обнаружения гравитационных волн привлекает особое внимание теоретиков и экспериментаторов. Это связано с тем, что гравитационно-волновой эксперимент – это решающий эксперимент, затрагивающий теоретические основы современной физики. Открытие и использование гравитационно-волнового канала информации о строении Вселенной, структуре звезд и природе тяготения, несомненно, обогатило бы науку.

Не менее важно и то, что гравитационно-волновое поле не может конкурировать с другими физическими полями по силе воздействия, однако его принципиальная неэкранируемость, универсальность, дальность действия и особая тензорная природа оказывают непредсказуемое воздействие на сложные системы. При этом сам процесс регистрации и измерения гравитационных волн может стать для современной науки явлением чрезвычайным.

Экспериментальным обнаружением гравитационного излучения занимаются проекты LIGO (США), VIRGO (Франция–Италия),

GEO-600 (Германия–Великобритания), TAMA-300 (Япония), LISA (международный, космического базирования), ДУЛКЫН (Россия) и др. [4, 5].

Целью этих проектов является обнаружение коротких импульсов гравитационного излучения от вспышечных источников. Однако отсутствие априорной информации о характеристиках гравитационного излучения этих источников уменьшает вероятность их обнаружения и достоверность однозначного отождествления.

Эксперименты по детектированию гравитационных волн относятся к предельно трудным задачам. Практические вопросы таких опытов лежат в области поисков максимально чувствительных методов детектирования, определения источников шума и помех и мер по их снижению и компенсации. В силу чрезвычайной слабости гравитационных волновых сигналов (ГВС) измерительная аппаратура с уникальной чувствительностью должна обладать еще высокой избирательностью.

Развитие современной эксперименталь-

© Левин С.Ф., Мурзаханов З.Г., 2012

ной базы гравитационно-волновой физики направлено на решение трех основных задач:

обнаружение ГВС с надежным доказательством их природы;

пеленгация источника по его излучению;

идентификация моделей астрофизических процессов в источнике гравитационных волн по характеристикам принятого ГВС.

В соответствии с этими задачами обнаружение ГВС космического происхождения требует создания широко разнесенной глобальной сети наземных гравитационных волновых детекторов (ГВД). Главным принципом функционирования сети антенн ГВД является схема совпадений с оптимизацией ориентации сети. Твердотельные антенны веберовского типа и интерферометры Майкельсона с большой базой направлены на организацию глобальной гравитационной волновой службы вспыхивающих источников.

Существуют также периодические низкочастотные ГВС релятивистских двойных астрофизических объектов – двойных пульсаров типа PSR 1547+1155. Амплитуда ГВС этих источников более чем на два-три порядка меньше амплитуды ГВС вспыхивающих источников, а искомым сигналом принимается ГВД в смеси с гравитационным волновым фоном и сигналами других астрофизических объектов. Но высокоточная априорная информация о характеристиках двойных систем обеспечит возможность оптимальной обработки сигнала на выходе ГВД при длительном накоплении.

Реализация проекта LISA на интерферометре космического базирования с длиной плеч $5 \cdot 10^6$ км для обнаружения низкочастотных ГВС двойных релятивистских астрофизических объектов планируется на 2020 г.

В проекте ДУЛКЫН рассматривались два варианта построения ГВД для обнаружения низкочастотных ГВС двойных астрофизических объектов: либо использующие кольцевой 2-резонаторный с общей активной средой и единым основанием с общими зеркалами лазерный интерферометр на бегущих волнах [6], либо двухрезонаторный с общей активной средой и фиксированными на едином основании общими зеркалами лазерный интерферометр на стоячих волнах с геомет-

рически и (или) пространственно неэквивалентными к воздействию ГВС контурами [7]. При построении этих вариантов ГВД учитывалась, что при одновременном формировании эласто- и электродинамических откликов компактных с упруго связанными зеркалами лазерно-интерферометрических антенн на воздействие ГВС вклад эластодинамического отклика пренебрежимо мал [3].

Электродинамический отклик ГВД ДУЛКЫН на воздействие ГИ выражается в набеге фаз в оптических излучениях резонаторов лазерной системы через изменение показателей преломления вдоль оптических путей. Пространственная неэквивалентность контуров к воздействию ГВС приводит к различным набегам фаз оптических излучений резонаторов и гарантирует между ними ненулевую разность фаз, меняющуюся по закону изменения детектируемого ГВС. Предсказываемые теорией характеристики ГВС низкочастотных источников излучения и длительное время их существования позволяют проводить (например, методами длительного когерентного внутри- и межпериодного накопления) согласованную фильтрацию сигнала из шума с требуемым отношением сигнал/шум.

В работе [8] рассмотрены варианты схем 2-резонаторных с общей активной средой и фиксированными на едином основании общими зеркалами лазерных интерферометров на стоячих волнах с геометрически неэквивалентными к воздействию ГВС контурами. Это позволяет использовать информацию об источниках излучения – частоте, угловых координатах, векторах поляризации и времени наступления максимальной амплитуды гравитационного излучения, что существенно облегчает оптимальную обработку сигналов с выхода фазового детектора.

Рассмотрим новый вариант построения ГВД на базе 2-резонаторных кольцевых лазерных интерферометров на бегущих волнах, использующие принципы, изложенные в работе [8] для стоячих волн.

Выбор источника ГВС определяет ориентацию установки ГВД. Плоскость стола (основание детектора) располагают горизонтально, зеркала резонаторов закрепляют перпендикулярно к этой плоскости. Три па-

параллельно размещенных зеркала рассматриваемого участка резонатора устанавливают относительно местного меридиана так, чтобы в момент пересечения источником плоскости математического горизонта в процессе вращения Земли плоскости зеркал были перпендикулярны к вектору направления на источник, а вектор горизонтальной поляризации детектируемых гравитационных волн был параллелен этим зеркалам. Для географического положения ГВД ДУЛКЫН таким предпочтительным источником является двойной пульсар PSR J0737-3039. В этом случае отклик ГВД будет зависеть от набега фаз оптического излучения, вызванного изменением показателей преломления вдоль оптического пути между этими зеркалами, и диаграмма направленности ГВД будет определяться только оптическим излучением между этими зеркалами.

Функциональная схема нового варианта построения ГВД представлена на рис.1.

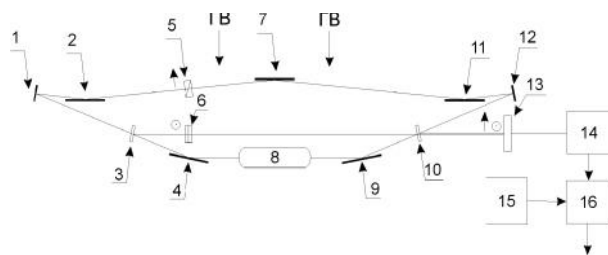


Рис.1. Функциональная схема нового варианта построения ГВД

1-й резонатор содержит: активную среду 8 [He-Ne трубка без окон Брюстера] и определяющие частоту резонатора глухие зеркала 4, 9 и полупрозрачные разделительные зеркала 3, 10. В состав также входит поляризатор 6 с ТЕ-поляризацией, обеспечивающий генерацию луча с вектором электрического поля, перпендикулярным к плоскости рисунка.

2-й резонатор содержит: общую с 1-м резонатором активную среду 8 и определяющий частоту 2-го резонатора (общие с 1-м), глухие зеркала 4 и 9, а также входящие в состав только 2-го резонатора глухие зеркала 1 и 2 и параллельно размещённые относительно друг друга глухие зеркала 2, 7, 11. Эти зеркала параллельны также к лучу между зеркалами 3 и 10. 2-й резонатор содержит также поляриза-

тор 5 с ТМ-поляризацией, обеспечивающий генерацию луча с вектором электрического поля, лежащим в плоскости рисунка. Излучения резонаторов, выходящие из общего полупрозрачного разделительного зеркала 10, после прохождения через линейный поляризатор 13, у которого ось пропускания образует угол 45° с плоскостью рисунка, формирует интерференционное поле, регистрируемое фотоприёмником 14. Полупрозрачное зеркало 10 размещают так, чтобы угол γ между падающим на это зеркало и отражённым от него лучом был меньше 45° , а расстояние между зеркалами

$$L_1 = L_2 + L_3 + L_4 + L_5, \quad (1)$$

где L_1 – расстояние между зеркалами 3 и 10, L_2 – между зеркалами 1 и 3, L_3 – между зеркалами 1 и 2, L_4 – между зеркалами 11 и 13, L_5 – между зеркалами 10 и 13, причём $L_2=L_5$, $L_3=L_4$. Кроме того, учитывая, что расстояние L_6 между зеркалами 3 и 4, L_7 между зеркалами 4 и 9 и L_8 между зеркалами 9 и 10 являются общими для резонаторов, вытекают равенства и пространственная эквивалентность резонаторов на этих оптических длинах. Поэтому диэлектрические проницаемости на этих оптических отрезках излучения резонаторов в результате электродинамического (возможно, и эластодинамического) отклика на ГВС с любого пространственного направления будут равны, что дает равенство сдвигов частот резонаторов $\Delta \nu_1(t) = \Delta \nu_2(t)$ и нулевой эффект на выходе фотоприёмника 14.

В определённый момент времени за счет вращения Земли плоскость фронта детектируемого ГВС окажется параллельной плоскостям зеркал 2, 7 и 11.

Следует учитывать, что вертикальный вектор поляризации детектируемых ГВС при оптимальном пространственном выборе источника будет всегда параллелен зеркалам 2, 7 и 11, а параллельность горизонтального вектора поляризации ГИ к зеркалам 2, 7 и 11 с учётом вращения Земли будет определяться углом θ , характеризующим отклонение от параллельности плоскости фронта детектируемого ГВС [2]. Электродинамический отклик оптического излучения на участке длиной L между зеркалами 2, 7 и 11 (изменение показателя преломления вдоль оптического пути

между этими зеркалами) на ГВС приводит к фазовой модуляции оптического излучения в первом резонаторе и к амплитудной модуляции выходного сигнала с фотоприёмника 14 по закону вращения Земли. По максимуму выходного сигнала с фотоприёмника 14 и определяется угловое положение источника ГВС относительно зеркал 2, 7 и 11.

Выходной сигнал с фотоприёмника 14 ГВД, обусловленный воздействием ГВС только на оптическое излучение между параллельно расположенными зеркалами, определяется выражением

$$\Delta v(t) = \Omega_1 h \cdot \sin(\Omega_g t + \varphi_g) \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta, \quad (2)$$

где Ω_1 – собственная частота 2-го резонатора в отсутствие ГВС, h – безразмерная амплитуда ГВС, Ω_g и φ_g – частота и начальная фаза ГВС, α – угол падения оптического излучения на параллельно размещённые зеркала, β – угол между вектором вертикальной поляризации ГВС и параллельно размещёнными зеркалами. Тогда, при $h = 10^{-20} \dots 10^{-27}$ и $\Omega_1 = 10^{13} \dots 10^{14}$ Гц выходной сигнал $\Delta v(t)$ будет находиться в пределах $10^{-6} \dots 10^{-14}$ рад.

Выходной сигнал фотоприёмника

$$v(t) = \Delta v(t) + Z_1(t) + Z_2(t) + Z_3(t), \quad (3)$$

где $Z_1(t) + Z_2(t)$ – белый шум с низкочастотной помехой, обусловленной нестабильностью источника питания лазера и флуктуациями в плазме газового разряда, $Z_3(t)$ – некоррелированная низкочастотная помеха, обусловленная изменением размеров резонаторов лазерной системы при изменении температуры, период которой сравним с периодом ГВС.

В ГВД LIGO и VIRGO воздействие помех исключается путём обеспечения работы аппаратуры в условиях низкой температуры и высокого вакуума. Размещение ГВД по проекту LISA на космических спутниках, где автоматически достигается низкая температура и высокий вакуум, также обеспечивает работу в условиях отсутствия всех видов помех.

Как известно, детектируемый ГВС $\Delta v(t)$ будет промоделирован по амплитуде по закону суточного вращения Земли, т.е. по закону $\cos\theta$. Эта амплитудная модуляция позволит при обработке выходного с фото-

приёмника сигнала отличить детектируемый ГВС от низкочастотной помехи, совпадающей по периоду с ГВС, и также выделить ГВС на фоне белого шума.

Из анализа (2) видно, что частота Ω_g и направление θ на источник ГВС (с учётом вращения Земли) известны. Неполнота информации о величине h и отсутствие информации о начальной фазе φ_g ГВС, необходимой для корреляционно-фильтровой обработки в блоке 16 устраняется путём сканирования по амплитуде и фазе моделируемого ГВС в блоке 15.

В рассматриваемой схеме построения ГВД пространственная неэквивалентность резонаторов достигается путём введения во 2-й резонатор трёх параллельно размещённых глухих зеркал.

Без учёта этих зеркал во 2-м резонаторе оптические пути в обоих резонаторах пространственно эквивалентны, и воздействие ГВС приводит к нулевому эффекту на выходе фотоприёмника.

В результате параллельного размещения двух зеркал в 1-м резонаторе при оптимальном пространственном выборе источника вертикальный вектор поляризации детектируемой гравитационной волны всегда будет параллелен этим зеркалам.

Параллельность горизонтального вектора поляризации плоскости фронта гравитационной волны к параллельно расположенным зеркалам во 2-м резонаторе и ее только электродинамическое воздействие на частоту оптического излучения приводят к тому, что амплитуда выходного сигнала фотоприёмника будет меняться не только по закону изменения детектируемого ГВС, но и по закону вращения Земли. Это обстоятельство и априорное знание угловых координат источников ГИ обеспечит высокую вероятность их обнаружения и однозначного отождествления.

Список использованной литературы

1. Гравитационно-волновой детектор ДУЛКЫН первого уровня / Агачев А. Р., Даишев Р. А., Левин С. Ф., Маврин С. В., Мурзаханов З. Г., Павлов Б. П., Скочилов А. Ф., Чугунов Ю. П., Шиндяев О. П. // Измерительная техника. – 2009. – № 6. – С. 34–38.

2. Амальди Э. Поиск гравитационных волн / Э. Амальди, Г. Пицелла. // *Астрофизика, кванты и теория относительности*. – М.: Наука, 1982. – С. 241–397.

3. Балакин А. Б. Проблема фоновой деформации в теории отклика компактного активного оптического рециркулятора на гравитационно-волновой сигнал / А. Б. Балакин, Г. В. Кисунько, З.Г. Мурзаханов // *Доклады Академии наук*. – 1996. – Т. 346. – № 1. – С.39–42.

4. Бичак И., Руденко В.Н. Гравитационные волны в общей теории относительности и проблема их обнаружения / И. Бичак, В. Н. Руденко. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 264 с.

5. Измерительная задача обнаружения гравитационных волн от двойных пульсаров / З. Г. Мурзаханов, С. Ф. Левин, И. Ю. Белов, М. А. Кривилёв, Л. М. Шарнин // *Измерительная техника*. – 2011. – № 11. – С. 11–25.

6. Константинов В. Б. Пути реализации потенциальных возможностей низкочастотного гравитационно-волнового детектора ДУЛКЫН / В. Б. Константинов, З. Г. Мурзаханов // *Измерительная техника*. – 2001. – № 3. – С. 6.

7. Левин С. Ф. Гравитационный волновой детектор на основе двухрезонаторных лазерных измерительных систем / С. Ф. Левин, З. Г. Мурзаханов, А. Ф. Скочилов // *Измерительная техника*. – 2005. – № 9. – С. 13–18.

8. Мурзаханов З. Г. Гравитационно-волновой детектор как пеленгатор источника низкочастотного излучения от двойных релятивистских астрофизических объектов / З. Г. Мурзаханов // *Измерительная техника*. – 2009. – № 10. – С. 4–8.

Получено 17.05.2012

References

1. First-level Dulkyn gravitational wave detector / A. R. Agachev, R. A. Daishev, S. F. Levin, S. V. Mavrin and Z. G. Murzakhanov, et al. // *Measurement Techniques*. – 2009. – V. 52. – N 6. – P. 613–620 [in English].

2. Amaldi E. The Search of gravitational waves // *Astrophysics, quanta and the relativity theory* / E. Amaldi, G. Pizzella – Moscow: Nauka, 1982. – P. 241–397 [in Russian].

3. Balakin A. B. The Problem of background deformation in the theory of the response compact active optical recirculator on a gravita-

tion-wave signal / A. B. Balakin, G. V. Kisunko, Z. G. Murzakhanov // *Reports of Academy of sciences*. – 1996. – V. 346. – N 1. – P. 39–42 [in Russian].

4. Bichak I. Gravitational waves in the general theory of a relativity and a problem of their detection / I. Bichak, V. N. Rudenko. – Moscow: Moscow State University Publishing house, 1987. – 264 p. [in Russian].

5. The measurement problem of detecting gravitational waves from binary pulsars / Z. G. Murzakhanov, S. F. Levin, I. Yu. Belov, M. A. Krivilev, L. M. Sharnin // *Measurement Techniques*. – 2011. – V. 54. – N 11. – P. 1225–1232 [in English].

6. Konstantinov V. B., Murzakhanov Z. G. Method for realizing the possibilities of the Dulkyn low-frequency gravitational-wave detector / V. B. Konstantinov, Z. G. Murzakhanov // *Measurement Techniques*. – 2001. – V. 44. – N 3. – P. 226–233 [in English].

7. Levin S. F. Gravitational wave detector based on a Two-Cavity Laser Measurement System / S. F. Levin, Z. G. Murzakhanov, A. F. Skochilov // *Measurement Techniques*. – 2005. – V. 48. – N 9. – P. 852–858 [in English].

8. Murzakhanov Z. G. Gravitational-wave detector as a direction finder for low-frequency gravitational radiation sources from binary relativistic astrophysical objects / Z. G. Murzakhanov // *Measurement Techniques*. – 2009. – V. 52. – N 10. – P. 1028–1032 [in English].



Левин Сергей Федорович,
д.т.н., проректор по учебной и научной работе Московского ин-та экспертизы и испытаний.

E-mail:
AntoninaEL@rostest.ru.



Мурзаханов
Зуфар Газизович,
директор НЦ гравитационно-волновых исследований «ДУЛКЫН» АН Республики Татарстан
тел. +7 843 272 42 66.