

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2011

№ 11 ноябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издается
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандар-
метрологии и оценке сос

Метрологическая академ

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- В. Н. Горобей, Ю. А. Киселев, О. С. Витковский, М. Ю. Леонтьев.** Государственный первичный эталон единицы давления — паскаля 3
- П. В. Базылев, А. В. Изотов, А. И. Кондратьев, В. А. Луговой, В. П. Нугай, К. Н. Окишев.** Государственный первичный эталон единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах 7

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

- З. Г. Мурзаханов, С. Ф. Левин, И. Ю. Белов, М. А. Кривилев, Л. М. Шарнин.** Измерительная задача обнаружения гравитационных волн от двойных пульсаров 11

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. М. Домрачев, Е. В. Ипполитова.** Двухотсчетные амплитудные цифровые преобразователи угла на базе гибридных микросборок серии 2602 16
- А. В. Шкуратов, С. П. Скворнюк.** Многоступенчатые датчики углов 20

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Н. Шулюпин, Б. Е. Паршин, И. И. Чернеев.** Измерение расходных параметров скважин при разработке геотермальных месторождений с двухфазной транспортировкой теплоносителя 22
- В. Ф. Шаякберов.** Установки для измерений количества нефти и нефтяного газа для скважин и их кустов 26

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Г. Чуйко.** Прослеживаемость измерений температуры в аэрологических наблюдениях радиозондированием 30
- А. А. Липаев.** Метод периодического нагрева в системе контактирующих тел 36
- Д. Я. Свет, С. С. Сергеев.** Трехволновый пирометр, измеряющий истинную температуру 41
- А. В. Шарков, В. А. Коралеев, А. С. Некрасов, Д. А. Минкин, С. В. Фадеева.** Радиометр для измерения плотности высокоинтенсивных тепловых потоков и метод его калибровки 43

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. К. Качанов, И. В. Соколов, Р. В. Концов, Л. В. Воронкова.** Повышение точности измерения скорости акустических колебаний при ультразвуковой структуроскопии изделий из чугуна 45
- В. Г. Карташев, Л. В. Воронкова, Е. В. Шалимова, А. А. Синицын.** Выбор оптимального шага перемещения преобразователя при ультразвуковом контроле сложноструктурных изделий 48

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- О. В. Карпов, А. А. Уколов, А. Р. Гарафутдинов.** Особенности методов измерения и проблемы воспроизведения единицы массовой концентрации общего и свободного хлора в природных и технологических водных средах 51
- Л. А. Конопелько, О. В. Фатина.** Метрологическое обеспечение анализаторов паров этанола в выдыхаемом воздухе 56
- Н. П. Муравская, Я. И. Ермакова, А. В. Иванов.** Определение концентрации примесей в кремнии методом атомной абсорбции 60

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

- А. М. Еняков, А. Е. Исаяев, А. Н. Матвеев, Ван Юэбинг, Чэн И, Фэй Тэн.** Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот 250 Гц — 200 кГц 66
- А. С. Катков, С. Солев.** Ключевые сличения эталонов вольта ВНИИМ и МБМВ 70

Главный редактор

В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

В. С. Александров,

В. И. Белоцерковский,

Ю. А. Богомолов,

Ю. И. Брегадзе,

В. А. Вышлов, В. С. Иванов,

Л. К. Исаев, Г. И. Кавалеров,

А. Д. Козлов, С. А. Кононогов,

А. Ф. Котюк, П. А. Красовский,

А. Ю. Кузин,

В. М. Лахов,

(зам. гл. редактора);

В. В. Леонов, В. Ф. Матвейчук,

А. И. Механников,

В. В. Окрепилов, Ю. В. Тарбеев,

О. Е. Фомкина,

(зам. гл. редактора);

Н. И. Ханов, В. Н. Храменков,

И. А. Шайко

**Журнал переводится
на английский язык
под названием
«MEASUREMENT TECHNIQUES»
издательством Springer
www.springer.com/11018**

Технический редактор *Г. А. Терebinкина*

Корректор *В. Е. Нестерова*

Компьютерная верстка *А. П. Финогеновой*

Сдано в набор 05.10.2011. Подписано
в печать 09.11.2011. Формат 60×90^{1/8}. Бумага
офсетная. Печать офсетная. Усл. п. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 10,85. Тир. 506 экз. Зак. 1188.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-21572
от 15.07.2005

Адрес редакции: 117418 Москва, Нахимовский проспект,
д. 31, к. 2, тел. 531-26-21;

Почтовый адрес: 117418 Москва, Нахимовский проспект,
д. 31, к. 2,

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»

e-mail: izmt@gostinfo.ru; izmt@yandex.ru; www.gostinfo.ru

Калужская типография стандартов,
248021 Калуга, ул. Московская, 256

© Измерительная техника, 2011

STATE STANDARDS

- V. N. Gorobey, Yu. A. Kiselev, O. S. Vitkovskiy, M. Yu. Leontiev. The National primary pressure unit standard — the pascal 3
- P. V. Bazylev, A. V. Izotov, A. I. Kondratiev, V. A. Lugovoy, V. P. Nigay, K. N. Okishev. The National primary standard of longitudinal ultrasonic waves propagation in solids velocity unit 7

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF METROLOGY

- Z. G. Murzakhanov, S. F. Levin, I. Yu. Belov, M. A. Krivilyov, L. M. Sharnin. The measurement problem of gravitational waves from double pulsars detection 11

LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

- V. M. Domrachev, E. V. Ippolitova. Dual reading amplitude angle digitizers based on hybrid micro assemblies of series 2602 16
- A. V. Shkuratov, S. P. Skvornyyuk. Multistage angle sensors 20

MECHANICAL MEASUREMENTS

- A. N. Shulyupin, B. E. Parshin, I. I. Chernev. The measurement of wells discharge parameters at mining of geothermal deposits with two-phase heat carrier transportation 22
- V. F. Shayakberov. The devices for measurements of oil and casing-head gas quantity in wells and well clusters 26

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- V. G. Chuiko. The temperature measurements traceability in aerological observations by radiosensing 30
- A. A. Lipaev. The periodic heating method in contacting bodies system 36
- D. Ya. Svet, S. S. Sergeev. Spectral ratio pyrometer of true temperature 41
- A. V. Sharkov, V. A. Korablev, D. A. Minkin, A. S. Nekrasov, S. V. Fadeeva. Radiometer for measuring of high intensive density heat fluxes and method for calibration 43

ACOUSTIC MEASUREMENTS

- V. K. Kachanov, I. V. Sokolov, R. V. Kontsov, L. V. Voronkova. The increase of acoustic vibrations velocity measurement accuracy at ultrasonic structural analysis of cast iron items 45
- V. G. Kartashev, L. V. Voronkova, E. V. Shalimova, A. A. Sinitsyn. The selection of transducer optimal shifting step at ultrasonic testing of complex structural products 48

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- O. V. Karpov, A. A. Ukolov, A. R. Garafutdinov. The features of measurement methods and problems of reproduction of mass concentration unit of total and free chlorine in natural and technological aquatic environment 51
- L. A. Konopelko, O. V. Fatina. Metrological assurance of breath alcohol analyzers 56
- N. P. Muravskaya, Ya. I. Ermakova, A. V. Ivanov. The determination of impurities concentration in silicon by atomic absorption method 60

INTERNATIONAL COLABORATION

- A. M. Enyakov, A. E. Isaev, A. N. Matveev, Wang Yuebing, Chen Yi, Fei Teng. The Russian-Chinese pilot comparisons of hydrophones calibrations results at frequencies from 250 Hz to 200 kHz 66
- A. S. Katkov, S. Solve. Key comparisons of the VNIIM and BIPM voltage standards 70

Измерительная задача обнаружения гравитационных волн от двойных пульсаров

З. Г. МУРЗАХАНОВ*, С. Ф. ЛЕВИН, И. Ю. БЕЛОВ***, М. А. КРИВИЛЕВ****, Л. М. ШАРНИН******

* Научный центр гравитационно-волновых исследований «ДУЛКЫН» АН РТ, Казань, Россия, e-mail: dulkyn@mail.ru

** Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия, e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

*** Казанский государственный университет, Казань, Россия,

**** Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева Казань, Россия, e-mail: shamin@asu.kstu-kai.ru

Предложен и исследован новый метод обработки выходного сигнала гравитационно-волнового пеленгатора в измерительной задаче обнаружения и идентификации гравитационных волн от двойных релятивистских астрофизических объектов.

Ключевые слова: гравитационные волны, гравитационно-волновой пеленгатор.

The new method of processing of target signal of gravitational-wave direction-finder in measuring problem of detection and identification of gravitational waves from double relativistic astrophysical objects is proposed and studied.

Key words: gravitational waves, gravitational-wave direction-finder.

Интерпретация векового уменьшения орбитального периода двойного пульсара PSR 1913+16 в рамках общей теории относительности как следствия излучения гравитационных волн (ГВ) рассматривается в [1] как «первое экспериментальное подтверждение их существования». Однако попытки обнаружения ГВ методом прямого измерения в проектах LIGO (США), VIRGO (Франция, Италия), GEO-600 (Германия, Великобритания), TAMA-300 (Япония), LISA (Международный спутниковый проект), NAUTILUS (Италия) и EXPLORER (Швейцария) пока безуспешны.

В теории измерительных задач [2] результат [1] рассматривается как полученный методом косвенного измерения, а проблема ГВ в целом характеризуется рядом неопределенностей. Первая из них связана с оценками точности посткеплеровских тестов [1] в виде неопределенностей измерения с уровнями доверия (confidence level — CL) 68, 95 и 99 % с коэффициентами охвата соответственно 1, 2 и 3. Согласно [3] — это точечные оценки стандартного отклонения свертки распределений гауссовой случайной и суммы равномерно распределенных неисключенных систематических составляющих результатов измерений. В [3] отмечено, что определение CL не соответствует определению уровня доверия, принятому в математической статистике.

Другая неопределенность связана с существенными погрешностями формулы Тейлора в случае дробно-рациональных соотношений при ее использовании в методе косвенного измерения [4]. Так, в [5] указано, что оценка неопределенности наиболее точного из пяти посткеплеровских тестов [1] — s-теста — для пульсара PSR B 1534+12 равна 0,05 % [6], тогда как неопределенности оценок его параметров составляют не менее 0,7 %.

Еще одна неопределенность порождена тем, что «реалистические» оценки неопределенности [3] релятивистских тестов по двойным пульсарам [5] не соответствуют приня-

тым в метрологии «безопасным» в терминах [3] интервальным оценкам в виде доверительных границ погрешностей. Нормы их доверительных вероятностей установлены в государственных поверочных схемах [7]. Такими оценками являются границы толерантных (P , γ)-интервалов [8, 9].

Дело в том, что любые оценки неопределенности [3] остаются точечными, а не интервальными, даже при умножении на так называемый коэффициент охвата. Понимание причин этой распространяемой нормативным путем грубой статистической ошибки дает стандарт [10]. Так, для обеспечения доверительной вероятности $P = 0,95$ в математической модели с четырьмя оцениваемыми параметрами для их оценок необходимо устанавливать доверительные границы, соответствующие доверительным вероятностям $P_x = 0,95^{1/4} < 0,9873$. В то же время для определения предикционных интервалов для 90, 95 и 99 %-х долей распределений [7] при тех же значениях доверительной вероятности P потребуется соответственно не менее 38, 93 и 662 отсчетов. Но с ростом числа отсчетов вероятность согласия [2, 11], как правило, уменьшается и достигает уровня значимости практически при любом его наперед заданном значении, хотя и при достаточно большом объеме выборки [12].

Также заметим, что термин «неопределенность измерения» согласно [3] следует сопровождать указанием ее типа (стандартная, суммарная, расширенная или типа А, типа В) и помнить о двусмысленности его определения. Если неопределенность измерения в узком смысле — это стандартное отклонение или параметр рассеяния распределения вероятностей, объективно приписанного оцениваемой величине на основе используемых данных, то неопределенность измерения в широком смысле — собственно распределение вероятностей, параметром рассеяния которого и является неопределенность измерения в узком смысле [3, 13, 14]. И именно по распределению вероятностей искомой

величины, а не по параметру его рассеяния, следует оценивать точность результатов решения измерительных задач.

Поэтому постановка в [5, 15] вопросов о подтверждении существования ГВ методом прямого измерения и более строгом экспериментальном подтверждении общей теории относительности в сильном гравитационном поле остается актуальной. Его вариантом может быть задача идентификации ГВ от двойных пульсаров методом многократных измерений.

Измерительная задача идентификации гравитационных волн. От двойных пульсаров ГВ должны вызывать гармонические эластичные и электродинамические отклики лазерных интерферометров с упруго связанными зеркалами и приводить к низкочастотному сдвигу частоты лазерного излучения вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости [16]. Этот эффект положен в основу принципа действия гравитационно-волнового пеленгатора (ГВП) [17, 18], который можно рассматривать как средство измерений диэлектрической проницаемости среды.

Принцип измерения, на котором основан ГВП, заключается в том, что плоскость его основания располагается горизонтально, а зеркала резонаторов закрепляются перпендикулярно. Параллельно размещенные зеркала в сигнальном резонаторе устанавливаются относительно местного меридиана так, чтобы в момент пересечения источником ГВ плоскости математического горизонта в процессе вращения Земли плоскости зеркал были перпендикулярны вектору направления на источник, и тогда вектор горизонтальной поляризации ГВ будет параллелен зеркалам. Отклик ГВП определяется набегом фаз оптического излучения относительно опорного резонатора в силу изменения преломления вдоль оптического пути между параллельно размещенными зеркалами благодаря анизотропному изменению диэлектрической проницаемости [19].

Такое средство измерений может реализовать метод как прямого измерения, так и многократных измерений. В последнем случае основная часть решения измерительной задачи идентификации ГВ приходится на обработку получаемого измерительного сигнала.

Математическая модель измерительного сигнала на выходе ГВП после демодуляции на несущей частоте опорного резонатора имеет вид

$$h(t) + Z(t) = K [h_g \sin(\Omega_g t + \varphi_g) \cos \theta \cos \alpha \cos \beta] + Z(t); \quad (1)$$

$$h_g = (16\pi)^{2/3} \frac{(GM_S)^{5/3}}{c^4} \frac{m_1 m_2}{r(1-e^2)(m_1 + m_2)^{1/3} T^{2/3}} \quad (2)$$

Параметры системы PSR J0737-3039A/B (68 % CL)

Параметры	PSR J0737-3039A	PSR J0737-3039B
Прямое восхождение α	07 ^h 37 ^m 51 ^s , 24927(3)	—
Склонение δ	-30° 39' 40", 7195(5)	—
Период обращения T , сут	0,10225156248(5)	—
Производная периода обращения dT/dt	-1,252(17) · 10 ⁻¹²	—
Эксцентриситет e	0,0877775(9)	—
Расстояние d_{DM} , пс	~ 500	~ 500
Параллакс π (10 ⁻³ угл. сек)	3(2)	—
Расстояние d_π , пс	200—1000	200—1000
Масса (в единицах M_S)	1,3381(7)	1,2489(7)
Общая масса (в единицах M_S)	2,58708(16)	2,58708(16)

где K — коэффициент преобразования ГВП; h_g , $\Omega_g = 4\pi/T$, φ_g — амплитуда, частота и начальная фаза ГВ; θ — угол отклонения фронта ГВ от плоскости зеркал; α — угол падения оптического излучения на зеркала ГВП; β — угол между вектором вертикальной поляризации ГВ и плоскостью зеркал; G — гравитационная постоянная; c — скорость света; r — расстояние до источника ГВ; m_1, m_2 — массы пульсаров в массах Солнца M_S ; e — эксцентриситет орбиты; T — период обращения; $Z(t)$ — шумовая составляющая [15, 17, 18, 20—22].

Длительное время существования двойных пульсаров в принципе позволяет обеспечить согласованную фильтрацию измерительного сигнала ГВ с требуемым отношением сигнал—шум классическими методами когерентного внутри- и межпериодного накопления [23]. Объектом измерений в рассматриваемой задаче является принятая для тестов теории гравитации [24] система PSR J0737-3039A/B. Ее параметры определены с высокой точностью (таблица) [15]. При когерентном внутри- и межпериодном накоплении определяющей характеристикой решения задачи становится время накопления [23]:

$$T = (q_0/q_s)^2 N \tau,$$

где q_0 — отношение сигнал—шум после обработки; q_s — отношение амплитуды ГВ к порогу стабилизации, при котором система автоматической подстройки частоты не компенсирует полезный сигнал; N — число отсчетов за период ГВ; τ — длительность отсчета.

Для PSR J0737-3039 A/B при $q_0 = 5$, $q_s = 10^{-2}$, $N = 2460$ и $\Delta t = 0,05$ с время накопления составляет 8540 дней, что явно неприемлемо.

Сокращение времени обнаружения ГВ дает двухрезонаторный ГВП, структурная схема и состав которого приведены на рисунке [17, 25, 26]. Первый и второй резонаторы заключены между глухими зеркалами 1, 9 и 1, 6, соответственно. Общими оптическими элементами резонаторов являются глухое зеркало 1, активная среда 2 (газоразрядная He—Ne-трубка без окон Брюстера) и полупрозрачное разделительное зеркало 3. В 1-м резонаторе плоскости зеркал 3 и 8 размещены параллельно и под углом α к направлению лазерного излучения. Зеркало 3 образует в лазерной измерительной системе два канала: ТМ-поляризатор 4 обеспечивает генерацию необыкновенного луча в 1-м резонаторе, а ТЕ-поляризатор 5 — генерации обыкновенного луча во 2-м резонаторе. Излучения резонаторов, проходящие через общее зеркало 3 и линейный поляризатор 10, ось пропускания которого образует угол 45° с плоскостью рисунка, формируют интерференционное поле, регистрируемое фотоприемником 11. Расстояние L_1 между зеркалами 3, 6 равно расстоянию L_2 между зеркалами 8, 9. Параллельность зеркал 3, 8 обеспечивает параллельность соответствующих оптических путей L_1 и L_2 , а общее расстояние L между зеркалами 1, 3 без учета расстояния между зеркалами 3, 8 обеспечивает геометрическую эквивалентность 1-го и 2-го резонаторов. Поэтому диэлектрические проницаемости на оптических отрезках излучения 1-го резонатора $L + L_2$ и 2-го резонатора

$L + L_1$ в результате электродинамического (и, возможно, эластодинамического) отклика на ГВ с любого пространственного направления равны и имеют одинаковый знак. Это приводит к равенству $\Delta v_1(t) = \Delta v_2(t)$ сдвигов частот 1-го и 2-го резонаторов, т. е. к нулевому эффекту на выходе фотоприемника 11.

При указанном выше выборе источника плоскость фронта ГВ будет параллельна плоскостям зеркал 3, 8. Тогда вертикальный вектор поляризации ГВ будет всегда параллелен этим зеркалам, а горизонтальный вектор поляризации при вращении Земли будет меняться пропорционально косинусу угла θ его отклонения от плоскости фронта ГВ. В итоге электродинамический отклик ГВП на участке длиной L между зеркалами 3, 8 в виде изменения показателя преломления вдоль оптического пути приведет к фазовой модуляции оптического излучения в 1-м резонаторе с собственной частотой $\Omega_1 \approx 10^{14}$ Гц и к амплитудной модуляции выходного сигнала с фотоприемника 11 по закону вращения Земли. Максимум выходного сигнала соответствует угловому положению источника ГВ.

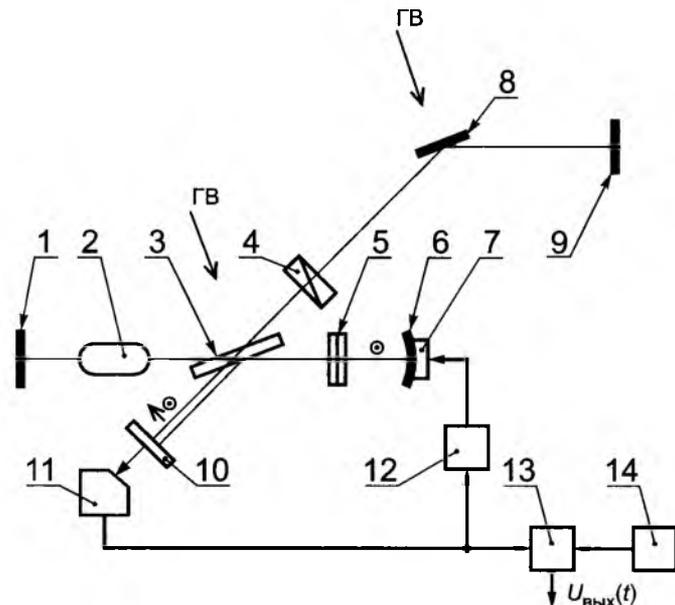
При измерении необходимо, чтобы направление на объект совпадало с нормалью к плоскости зеркал оптической схемы, т. е. ГВП должен быть сориентирован нормалью к зеркалам в точку восхода или захода объекта.

Для ГВП в точке с координатами $55^{\circ}47'$ с.ш. и $49^{\circ}07'$ в.д. азимут восхода $A = 155^{\circ}$ (звездное время $2^{\text{h}}24^{\text{m}}09^{\text{s}}$) и азимут захода $A = 205^{\circ}$ (звездное время $6^{\text{h}}18^{\text{m}}36^{\text{s}}$) пульсара PSR J0737—3039 при изменении направления визирования с угловой скоростью порядка 13° в час. При периоде ГВ $T_g = T/2 = 1,227$ ч измерения должны соответствовать середине интервала регистрации, и при ее длительности T_g расхождение между направлением на источник и нормалью к зеркалам ГВП будет менее 8° , а изменение T_g к 2011 г. — менее 100 мкс [22]. Поэтому еще одной целью измерительной задачи идентификации ГВ является сокращение времени обнаружения.

Нулевой гипотезе $H_0 = \{h_g = 0\}$ в задаче соответствует только шумовая составляющая $Z(t)$ — помеха. Для альтернативных гипотез H_{1k} амплитуда ГВ системы PSR J0737-3039A/B должна составлять $h_g \approx 7 \cdot 10^{-22}$ и менее.

Так как углы θ , α и β доступны измерению с высокой точностью, а собственная частота 1-го резонатора Ω_1 известна, измерительная задача сводится к параметрической идентификации модели по амплитуде h_g и фазе φ_g при предварительном оценивании характеристик шума $Z(t)$ на выходе фотоприемника. Этот шум содержит три составляющие: $Z_1(t)$ — широкополосный шум; $Z_2(t)$ — низкочастотный шум, обусловленный нестабильностью источника питания лазера и флуктуациями в плазме газового разряда; $Z_3(t)$ — некоррелированный низкочастотный шум из-за температурных изменений размеров резонаторов с периодом порядка T_g .

Экспериментальные исследования ГВП в течение полугодия в Казанском государственном институте прикладной оптики показали, что выходное напряжение фотоприемника изменяется хаотически в пределах ± 10 мВ ($+0,1$ в единицах амплитуды ГВ) и для обработки преобразуется в последовательность отсчетов с периодом 50 мс [27]. Возникающую при этом техническую проблему иллюстрирует процедура сличения эталонной меры напряжения Fluke 732В с группой нормальных элементов при помощи нановольтметра типа Keithley 2182, который обеспечивает разрешение до 1 нВ при нестабильности опорного напряжения менее 90 нВ за 6 мес. и уровне собственного шума 6 нВ. Процедура такого



Структурная схема гравитационно-волнового пеленгатора:

- 1, 8, 9 — зеркала 1-го резонатора; 2 — активная среда; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — ТМ-поляризатор 1-го резонатора; 5, 6 — ТЕ-поляризатор и зеркало 2-го резонатора; 7 — пьезоэлемент; 10 — линейный поляризатор; 11 — фотодетектор; 12 — блок автоматической подстройки частоты; 13 — блок обработки; 14 — блок моделирования; \uparrow — вектор электрического поля в плоскости рисунка; \odot — перпендикулярный вектор

сличения предусматривает измерения в течение 10 сут по 2—3 цикла с интервалом 2—3 ч ежедневно при 20 отсчетах в каждом цикле. Уменьшение нестабильности опорного напряжения может быть достигнуто более частыми сличениями с эталонной мерой напряжения.

Другими словами, имеющиеся в настоящее время средства измерений напряжения обеспечивают полноту представления данных измерений в указанном выше динамическом диапазоне при отношении амплитуды ГВ к шуму более 10^{-7} , и его понижение связано с ведущимися в настоящее время исследованиями в области прецизионных методов поразрядного уравнивания с большим числом десятичных разрядов. Поэтому решение задачи статистической обработки данных ГВП анализировалось методом тематического моделирования, исходными данными для которого служили экспериментальные данные, представленные необходимым числом десятичных разрядов.

Метод обработки измерительного сигнала. Исходные данные в рассматриваемой задаче представляют собой последовательность отсчетов амплитудно-цифрового преобразования (АЦП) низкочастотного выходного сигнала ГВП (1) в диапазоне 10^{-3} — 10^{-5} Гц на интервале наблюдения с известным числом периодов ГВ при неизвестной начальной фазе. Предлагаемый в статье метод решения задачи предполагает обработку каждого отсчета с повышением амплитуды сигнала без длительного периодического накопления до выделения его на фоне помех, а именно: статистическую проверку гипотез в схеме перекрестного наблюдения погрешности неадекватности [9] с учетом вращения Земли при соответствии гипотезам H_{1k} множества моделируемых сигналов с амплитудами и фазами в предполагаемых диапазонах существования. При этом выходной сигнал подвергается АЦП

с таким количеством десятичных разрядов, которое двумя младшими разрядами соответствует нижней границе расчетных значений безразмерной амплитуды ГВ.

Таким образом, на множестве гипотез H_{1k} , $k = 1, 2, \dots, K$ и нулевой гипотезы H_0 искомым результатом является гипотеза, наиболее правдоподобная по критерию минимума погрешности неадекватности модели [2]:

$$h_m(t) = A_{gm} \sin(2\pi t / T_g + \varphi_m). \quad (3)$$

При двух искомым параметрах схема перекрестного наблюдения требует деления статистического ряда на три блока данных [2, 27].

Кодовый сигнал $V(t)$ в виде отсчетов, поступающих в процессор с периодом 50 мс, образует статистический ряд для обработки. Затем с учетом того, что шумовая составляющая $Z(t) \gg h(t)$, отрицательные члены ряда суммируются с единицей старшего разряда АЦП, и полученный таким способом статистический ряд $V^+(t)$ будет содержать только положительные числа.

Тогда моделируемый сигнал с параметрами, отвечающими проверяемой гипотезе, в виде трех последовательностей чисел, которые формируются из исходной моделируемой последовательности $h_m(t)$ путем сохранения и инвертирования знака и вычитания единицы старшего разряда АЦП, соответственно суммируются и вычитаются, а затем вычитаются из ряда $V^+(t)$. Тем самым формируются три последовательности

$$[V^+(t) + h_m(t)]; [V^+(t) - h_m(t)] \text{ и } [V^+(t) + h_m(t) - 1],$$

которые нормализуются единицей старшего разряда АЦП.

Из нормализованных таким образом числовых последовательностей вычитается амплитуда моделируемого сигнала, смещенная по разрядной сетке на два разряда в сторону увеличения значений. Такое преобразование позволяет исключить округление разрядной сеткой процессора значений, содержащих только девятки.

Далее совокупности чисел, соответствующие полупериодам моделируемого сигнала, в каждом из трех рядов попарно суммируются по номерам полупериодов: 1+2, 2+3, 4+5, 5+6; 7+8, 8+9, 10+11, 11+12; ...

Особенность алгоритма состоит в использовании дифференциального метода путем приведения каждого отсчета к уровню $0,9U_{max}$ соответствующего разряда моделируемого сигнала $\mathbf{M}[h_m(t)] = 0,00..99..99$ согласно позиции цифры девять после запятой.

Кодовый сигнал АЦП $V(t)$ подвергается обработке по девяти позициям:

$$V_1(t) = h(t) + Z(t); V_2(t) = h(t + T/2) + Z(t + T/2); V_3(t) = (-1) \cdot V_2(t);$$

$$V_4(t) = V_1(t) + V_3(t) = h(t) - h(t + T/2) + Z(t) - Z(t + T/2);$$

$$V_4(t) = h_{12}(t) + Z_{12}(t); V_5(t) = V_4(t) + \mathbf{M}_1[h_m(t)] =$$

$$= Z(t) - Z(t + T/2) + \mathbf{M}[h_m(t)];$$

$$V_6(t) = V_5(t)/\mathbf{M}[h_m(t)] = \{Z(t) - Z(t + T/2)\}/\mathbf{M}[h_m(t)] + 1;$$

$$V_7(t) = V_6(t) - V_8(t) = \{Z(t) - Z(t + T/2)\}/\mathbf{M}[h_m(t)] + 1 - V_8(t);$$

$$V_9(t) = V_7(t) \cdot 10^b = 10^b \cdot \{Z(t) - Z(t + T/2)\}/\mathbf{M}[h_m(t)] +$$

$$+ 10^b - 10^b \cdot V_8(t),$$

где $V_8(t)$ — отсчет с числом цифр b от запятой до значащей цифры $h_m(t)$ со смещением на два разряда, что дает порог компенсации помехи на уровне $\mathbf{M}[h_m(t)]; h_{12}(t) = h(t) - h(t + T/2); Z_{12}(t) = Z(t) - Z(t + T/2)$. При этом проверяемой гипотезе соответствует $\mathbf{M}_1[h_m(t)] = \mathbf{M}[h_m(t)] - h_{12}(t)$. Далее формируется ряд $V_{10}(t) = V_9(t) \rightarrow V_9(t + T/2) \rightarrow \dots \rightarrow V_9(t + kT/2)$, подвергаемый на полупериоде $T/2$ скользящему интегрированию для получения контрольных статистик критерия обнаружения.

Идентификации ГВ в общем случае соответствует перебор возможных сочетаний значений амплитуды, периода и фазы $h_m(t)$ моделируемого сигнала (сканирование) с последующей обработкой ряда отсчетов. Эффективность алгоритма обработки была оценена на модельном примере обнаружения и идентификации имитируемой ГВ $h_i(t)$ с параметрами, соответствующими расчетным значениям согласно таблице, и $T = 1$ ч 14 мин с использованием записи выходного сигнала фотодетектора ГВП [17]. Для проверки параметрических гипотез моделировались сигналы $h_m(t)$ в диапазоне амплитуд $10^{-6} - 10^{-14}$ при переборе фаз ГВ с шагом 30° и межпериодном накоплении пять суток. После обработки сигнала функционал критерия обнаружения $\Delta(t) = h_i(t) - h_m(t)$ на интервалах 0 — 4; 5 — 8 и 9 — 12 ч принимал вид прямоугольного импульса на втором участке. При $h_m(t) \neq h_i(t)$ импульс оставался положительным, при $h_m(t) = h_i(t) \neq 0$ — становился отрицательным.

Для оценивания точности идентификации было проведено дополнительное сканирование по периоду и амплитуде с меньшим шагом. Оказалось, что гипотеза H_1 отклоняется при выходе моделируемого периода относительно имитируемого за пределы $[1^h 05^m, 1^h 38^m]$, а по моделируемой амплитуде — на один десятичный разряд ниже 10^{-13} .

Заключение. Исследование программного обеспечения гравитационного волнового пеленгатора методом имитационного моделирования показало, что решение измерительной задачи обнаружения гравитационных волн от двойных пульсаров типа PSR J0747-3039 может быть получено при достижении точности измерений уровня эталонов 1-го разряда, приближающейся к характеристикам государственного первичного эталона единицы напряжения при 16-разрядном представлении отсчетов.

В связи с тем, что возможен и отрицательный результат решения задачи обнаружения, что потребует пересмотра многих положений теории гравитации, гравитационный волновой пеленгатор может быть использован в качестве специального эталона для средств измерений относительной диэлектрической проницаемости жидких, твердых и газообразных диэлектриков в диапазоне частот выше 10 ГГц.

Литература

1. **Тейлор Дж. Х. (мл.)** Двойные пульсары и релятивистская гравитация // УФН. 1994. Т. 164. № 7. С. 757—764.
2. **Р 50.2.004—2000.** ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

3. **Руководство** по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.
4. **Левин С. Ф.** Схема приведения в методе косвенного измерения // Измерительная техника. 2004. № 3. С. 5—9; **Levin S. F.** Reduction Scheme in the Method of Indirect Measurement // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 3. P. 216—223.
5. **Kramer M. e. a.** Tests of general relativity from timing the double pulsar [Электрон. ресурс]. <http://ArXiv:astro-ph/0609417v1> (дата обращения: 14.09.2006).
6. **РМГ 29—99.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
7. **ГОСТ 8.061—80.** ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.
8. **ГОСТ Р ИСО 16269-6—2005.** Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов.
9. **МИ 2916—2005.** ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач.
10. **ГОСТ Р ИСО 16269-8—2005.** Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение предикционных интервалов.
11. **Левин С. Ф.** Идентификация распределений вероятностей // Измерительная техника. 2005. № 2. С. 3—9; **Levin S. F.** The identification of probability distribution // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 2. P. 101—111.
12. **Эльясберг П. Е.** Измерительная информация: сколько ее нужно. Как ее обрабатывать. М.: Наука, 1983.
13. **Левин С. Ф.** Нерешенные проблемы неопределенности // Главный метролог. 2009. № 4. С. 13—24.
14. **Левин С. Ф.** Проблема доверительной вероятности // Измерительная техника. 2008. № 9. С. 33—39; **Levin S. F.** The problem of confidence probability // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 9. P. 967—975.
15. **Kramer M. e. a.** Testing GR with the Double Pulsar: Recent Results // Proc. the 22nd Texas Symp. on Relativistic Astrophysics. Stanford Univ., 2004 [Электрон. ресурс]. <http://ArXiv:astro-ph/0503386v1> (дата обращения 17.03.2005).
16. **Балакин А. Б., Кисунько Г. В., Мурзаханов З. Г.** // ДАН СССР. 1992. Т. 325. № 3. С. 493—497.
17. **Левин С. Ф., Мурзаханов З. Г.** Измерительная задача обнаружения и идентификации гравитационных волн двойных астрофизических источников // Тез. докл. 14-й Рос. гравитационной конф. — Междунар. науч. конф. по гравитации, космологии и астрофизике. Ульяновск, 2011. С. 177.
18. **Мурзаханов З. Г.** Гравитационно-волновой детектор низкочастотного гравитационного излучения от двойных релятивистских астрофизических объектов // Мир измерений. 2010. № 8. С. 36—40.
19. **Левин С. Ф., Мурзаханов З. Г., Скочилов А. Ф.** Двухрезонаторная лазерная измерительная система для обнаружения гравитационных волн // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2005. № 5. С. 36—38.
20. **Вайсберг Дж., Тэйлор Дж., Фаулер Л.** Гравитационные волны от пульсара в двойной системе // УФН. 1982. Т. 137. С. 707—723.
21. **Авакумов О. В., Даишев Р. А.** Прогнозируемость пространственно-частотных характеристик гравитационного излучения релятивистских периодических источников // Гравитация и теория относительности. Казань: КГУ, 1992. Вып. 30. С. 16—30.
22. **Lyne A. G. e. a.** A Double-Pulsar System — A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics [Электрон. ресурс]. <http://Arxiv:astro-ph/0401086v1> (дата обращения 07.01.2004).
23. **Ширман Я. Д., Манжос В. Н.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
24. **Stairs I. H. e. a.** The Formation of the Double Pulsar PSR J0737—3039A/B [Электрон. ресурс]. <http://ArXiv:astro-ph/0609416v2> (дата обращения 15.09.2006).
25. **Пат. 2311666 РФ.** Гравитационно-волновой детектор / З. Г. Мурзаханов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 33.
26. **Пат. 2313807 РФ.** Гравитационно-волновой детектор / З. Г. Мурзаханов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 36.
27. **Левин С. Ф.** Математическая теория измерительных задач. Ч. 4. Измерительные задачи спектрального анализа // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2001. № 3. С. 20—24.

Дата принятия 31.05.2011 г.