

Идентификация некоррелированных компонент электрического поля Земли на частотах гравитационных волн релятивистских двойных звездных систем

В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич, Л. В. Грунская

Общество с ограниченной ответственностью «БизнесСофтСервис», E-mail: businesssoftservice@yandex.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет», E-mail: grunsk@vlsu.ru

С использованием айгеноскопии выявлено влияние гравитационных волн релятивистских двойных звездных систем на вертикальную составляющую электрического поля Земли. Показано, что айгеноскопы являются эффективными анализаторами спектрально локализованных компонент, позволяющих решить проблему идентификации воздействия релятивистских двойных звездных систем на вертикальную составляющую электрического поля Земли.

The eigenoscopy is used to discover the gravitational wave influence of relativistic star binary systems to the Earth's electric field vertical projection. The eigenoscope is used to be an effective analyser of spectrally localized components enabling the solution of such an influence identification problem.

Выявление значимых отличий компонент напряженности электрического поля Земли на частотах гравитационных волн релятивистских двойных звездных систем (РДЗС) эквивалентно экспериментальному обнаружению воздействия гравитационных волн от РДЗС на глобальную электрическую цепь Земли. Возможность использования Земли и ее оболочек в качестве «датчика» гравитационных волн декларировалась в [1, 2]. Использование классического спектрального анализа не позволяет подтвердить воздействие гравитационных волн от РДЗС на вертикальную составляющую напряженности электрического поля Земли.

На рис. 1 приведена типичная зависимость оценки амплитудного спектра многолетнего временного ряда вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли E_z на одной из станций наблюдения (Воейково). По оси абсцисс приведена величина интервала спектрального анализа, а по оси ординат — оценка действующего значения E_z на выходе классического спектроанализатора, настроенного на удвоенную частоту обращения РДЗС J1537+1155 (на которой должна излучаться гравитационная волна от РДЗС).

Как видно из графика, оценка монотонно уменьшается с ростом интервала спектрального анализа и стремится к нулю, что свидетельствует о том, что классический спектроанализатор воспринимает временной ряд вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли на анализируемой частоте как шум. Приведенный график типичный: ни на одной удвоенной частоте обращения рассмотренных двойных звездных систем с малым эксцентриситетом не удалось обнаружить иного поведения спектральных оценок.

Таким образом, перед нами проблема идентификации воздействия гравитационных волн, излучаемых РДЗС, на глобальную электрическую цепь Земли, которая характеризуется тем, что: классический метод спектрального анализа дает отрицательный результат на массиве многолетних наблюдений E_z в нескольких точках наблюдения для множества РДЗС, которые представляют собой достаточно распространенный объект видимой Вселенной — с известными частотами гравитационно-волнового излучения.

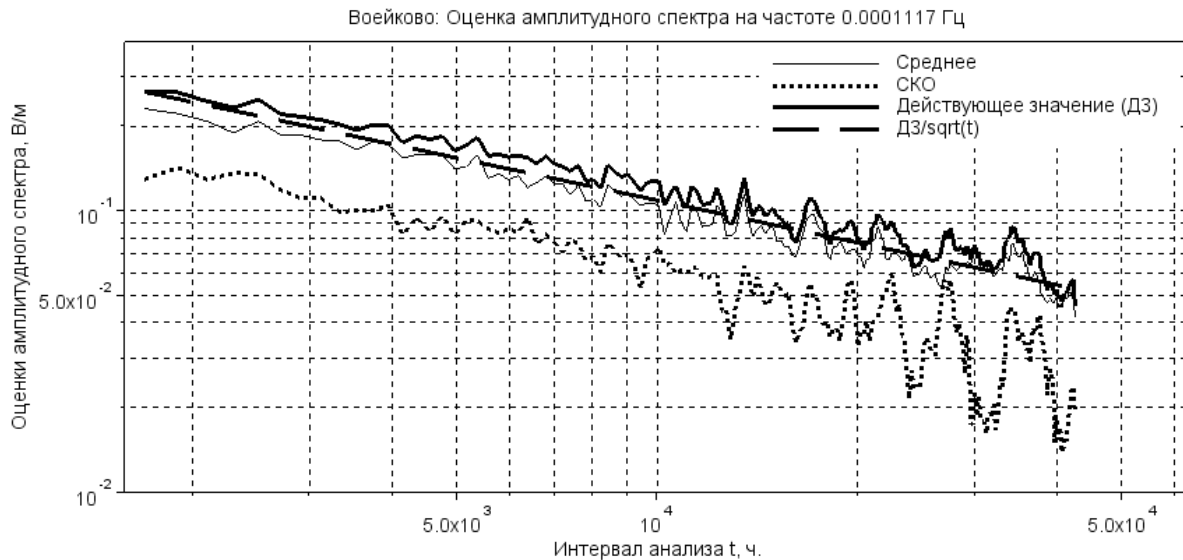


Рис. 1. Зависимость от величины интервала спектрального анализа (ось абсцисс) оценки амплитудного спектра (ось ординат) вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли. Станция наблюдения Воейково. Использована классическая схема анализатора амплитудного спектра, настроенного на удвоенную частоту обращения РДЗС J1537+1155

Разбор проблемы и вариантов ее решения, осуществленный авторами, сводится к следующему:

1. РДЗС — достаточно типичный объект видимой Вселенной. Известны и каталогизированы многие десятки РДЗС. Среди них достаточное число тех, которые имеют частоту обращения, лежащую в диапазоне инфранизких частот, что соответствует диапазону наблюдаемых изменений E_z . Многие из таких РДЗС вращаются почти по круговой орбите, то есть имеют малый эксцентриситет. Они должны излучать гравитационные волны на удвоенных частотах обращения. Часть РДЗС имеет высокий эксцентриситет, поэтому они должны излучать гравитационные волны на других (более высоких) гармониках частот обращения. Частоты обращения известны достаточно точно, однако эти величины получены на основании средних периодов обращения. Трудно ожидать, что достаточно точные значения этих «средних» частот гарантируют монохроматичность гравитационной волны от РДЗС. Поэтому, скорее всего, следует ожидать, что гравитационная волна, взаимодействующая с оболочками Земли, будет не монохроматической, а (в той или иной мере) спектрально локализованной вблизи удвоенной частоты обращения, а при высоком эксцентриситете — вблизи других (более высоких) гармоник частоты обращения. И, наконец, еще два обстоятельства. Первое — очевидное допущение о том, что РДЗС излучают гравитационные волны независимо друг от друга. Второе — слабое воздействие гравитационных волн на E_z .

2. Глобальная электрическая цепь — действительно глобальна. Это означает, что в каждой точке регистрации E_z воздействия гравитационных волн РДЗС в определенном смысле должны быть идентичны, что, естественно, не исключает некоторой индивидуальности этих точек приема (здесь пара терминов «идентичный — индивидуальный» рассматривается как производная от пары «идентификация — индивидуализация»).

3. Следует ожидать, что, несмотря на индивидуальность каждой точки приема, каждый индивидуальный отклик E_z на частоту гравитационной волны определенной

РДЗС спектрально локализован вблизи этой частоты (или частот — в случае высокого эксцентриситета).

4. Геосферы, непосредственно участвующие в формировании наблюдений E_z , подвержены влияниям Солнца, Луны, планет солнечной системы, процессам в ядре Земли, мантии, потокам космических лучей, формирующих ливни высокоэнергетических частиц — то есть большому числу периодических и не периодических во времени факторов. Поэтому возможны сложные модуляции и параметрические воздействия — в ходе формирования отклика E_z на гравитационные волны от РДЗС. Все эти вариации можно считать независимыми и некоррелированными с РДЗС.

5. Кажется целесообразным вариант разделения E_z в каждой из точек приема на отдельные аддитивные компоненты, поведение которых можно исследовать отдельно, в том числе идентифицировать их с воздействием гравитационной волны от конкретной РДЗС на конкретной частоте. Таким образом, в разрешение решаемой проблемы «вписывается» задача аддитивного представления E_z в виде некоррелированных компонент, допускающих индивидуальное поведение в точке приема.

6. С точки зрения решаемой проблемы ни у одной из точек наблюдения E_z и ни у одной из РДЗС нет преимуществ — с точки зрения окончательного решения о влиянии гравитационных волн от РДЗС на E_z все они идентичны. Удовлетворяющее решение — на основании множества наблюдений в различных точках и на частотах излучения гравитационных волн многих РДЗС с приемлемой для большинства экспертов вероятностью ошибки принять (или отвергнуть) решение о том, что воздействие гравитационных волн от РДЗС на E_z доказано.

7. Неудачи, возникшие при использовании классического анализатора спектра в контексте вышеприведенного разбора проблемы, вполне объяснимы, как вероятное следствие того, что ни гравитационная волна от РДЗС, ни ее отклик не являются монохроматическими. Возможно необходимо искать варианты, которые базируются на представлении временных рядов E_z на конечном интервале анализа, на котором еще может наблюдаться когерентность.

Примером удовлетворяющего решения может служить решение, описанное в статье [3], которая посвящена доказательству того, что известные релятивистские двойные звездные системы (собранные из разных каталогов и систематизированные Джонстоном в [4]), частота обращения которых лежит в инфранизкочастотном диапазоне, оказывают воздействие на вертикальную составляющую электрического поля Земли на удвоенных частотах обращения. В качестве анализатора использовался анализатор собственных векторов и компонент сигнала (айгеноскоп), который производит анализ временных рядов в точках приема на конечном интервале анализа. В данной работе были использованы ретроспективные многолетние временные ряды (30 лет) вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы, по данным трех станций Росгидромета — Воейково, Верхнее Дуброво, Душети, а также физического полигона кафедры общей и прикладной физики Владимирского государственного университета. У всех временных рядов время дискретизации составляло 1 час. Анализ велся на конечном интервале анализа 1000 часов на удвоенных частотах обращения РДЗС с малым эксцентриситетом: J1614-2230; J1518+4904; J0621+1002; J1022+1001; J1518+0204B; J2145-0750; J2129-5721; J1603-7202; J0437-4715; J1732-5049; J1745-0952; J1045-4509; J1701-3006A; J1157-5112; J1614-2318; J1911-1114; J1804-0735; J2317+1439; J0024-7204H; J0024-7204E; J0218+4232; J1232-6501; J1834+0010; J0034-0534; J1909-3744; J1342+2822B; J1435-6100; J1740-5340;

J1641+3627B; J1518+0204D; J0024-7204S; J0613-0200; J0024-7204Q; J1829+2456; J0024-7204T; J1701-3006D; J1518+0204E; J0700+6418; J1911-5958A; J2140-2310B; J1012+5307; J1641+3627D; J0024-7204Y. Подробное описание параметров этих РДЗС можно найти как в самой статье, так и в списке Джонстона [4].

Удовлетворяющее решение проблемы было достигнуто с использованием перспективного анализатора, получившего название «Анализатор собственных векторов и компонент сигнала» (краткое наименование «айгеноскоп»). В соответствии с описанием патента РФ № 116242 айгеноскоп (анализатор собственных векторов и компонент сигнала) — это измерительный и исследовательский прибор (устройство), отдельный или встраиваемый, общего и специального назначения (подобно осциллографу), предназначение которого — визуальный и (или) автоматизированный, в т.ч. автоматический, анализ исследуемых сигналов и принятие решений с использованием базиса собственных векторов матриц смешанных моментов сигналов, безотносительно к их физической природе. В состав айгеноскопа (наряду с другими) обязательно блок вычисления матрицы смешанных моментов для заданного интервала анализа сигнала, блок вычисления собственных векторов и собственных значений, а также блок вычисления скалярных произведений и анализа признаков.

Структурная схема айгеноскопа [5, 6] может быть представлена с разным уровнем детализации, в том числе и достаточно подробной. На рис. 2 представлена детальная схема, использованная при получении результата в статье [3], а в таблице 1 приведено подробное описание функций, выполняемых блоками, входящими в состав спектрального канала айгеноскопа, приведенной на рис. 3, достаточное для ее воспроизведения. Нумерация в первом столбце таблицы соответствует нумерации блоков, приведенных на рис. 2 и 3.

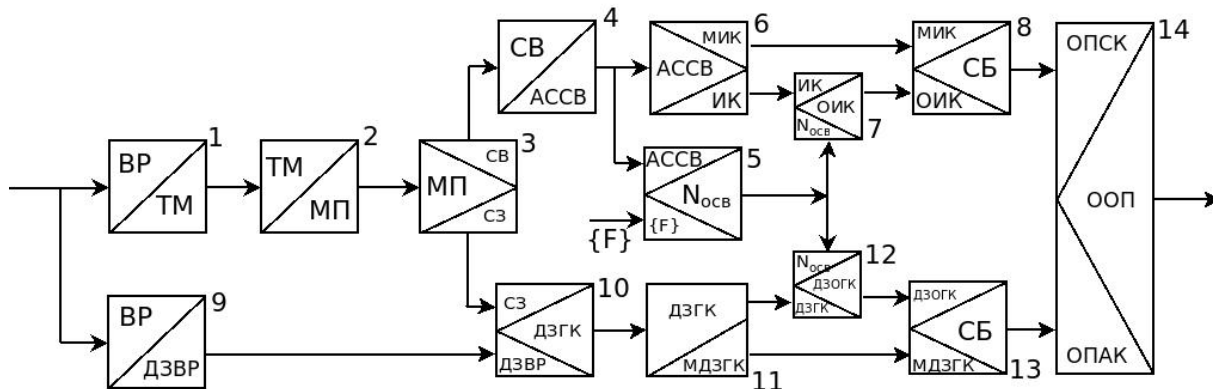


Рис. 2. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала — айгеноскоп (патент РФ № 116242): VR — временной ряд; TM — траекторная матрица; MP — матрица плотности; СВ — собственный вектор; СЗ — собственное значение; ACCV — амплитудный спектр СВ; ИК — индекс когерентности; МИК — медиана индекса когерентности; ОИК — ИК отобранных СВ; СБ — схема Бернулли; ОПСК — отношение правдоподобия спектрального канала; ДЗВР — действующее значение VR; ДЗГК — действующие значения главных компонент; МДЗГК — медиана ДЗГК; ДЗОГК — действующие значения отобранных компонент; ОПАК — отношение правдоподобия амплитудного канала; ООП — обобщенное отношение правдоподобия; {F} – список частот

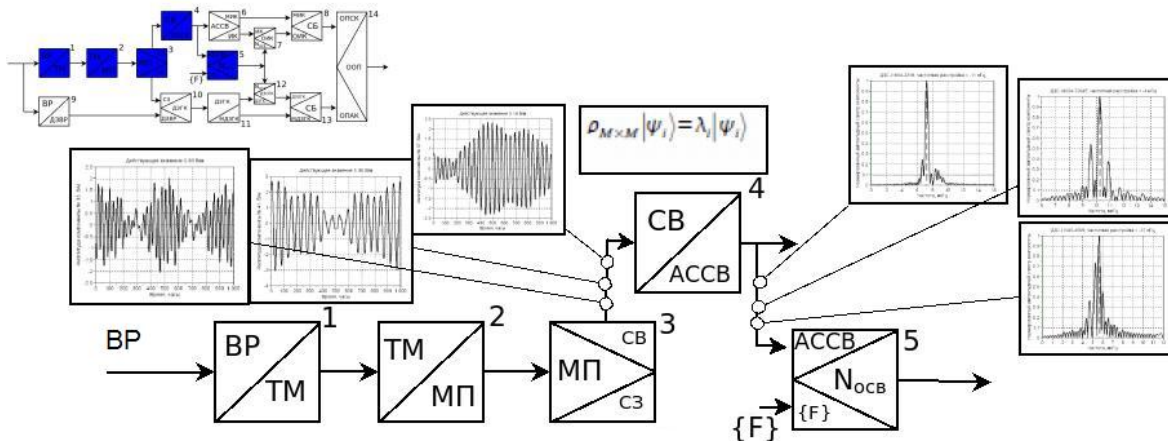


Рис. 3. Спектральный канал айгеноскопа. В блоке 3 вычисляются собственные векторы и собственные значения матрицы плотности собственных векторов, которые поступают в блок 5, в котором осуществляется отбор собственных векторов; на выходе блока 5 формируется последовательность

Для каждого отобранного в спектральном канале айгеноскопа собственного вектора, спектрально локализованного вблизи гравитационной волны РДЗС, определялся критерий степени его спектральной локализации. В качестве такого критерия использовался критерий названный авторами индексом когерентности и равный отношению максимального значения амплитудного спектра собственного вектора к его (амплитудного спектра собственного вектора) среднему значению. Чем выше значение индекса когерентности, тем выше степень его спектральной локализации вблизи частоты гравитационной волны РДЗС.

С использованием стандартных статистических процедур было показано, что некоррелированные составляющие, спектрально локализованные вблизи частот гравитационных волн, излучаемых РДЗС, отличны от всех остальных. Для этого была использована схема Бернулли, в которой в качестве успеха рассматривалось превышение индексом когерентности собственного вектора, спектрально локализованного на частоте гравитационной волны, медианного значения индекса когерентности, вычисленного для всех собственных векторов данного временного ряда. Общее число испытаний принималось равным числу отобранных собственных векторов, амплитудные спектры которых локализованы на частотах гравитационных волн РДЗС из списка Джонстона. В качестве итогового критерия рассматривалось отношение вероятности случайного возникновения наблюдаемого числа успехов к максимальной вероятности, рассчитанной по биномиальному закону, для заданного числа испытаний (отношение правдоподобия). В таблице 2 приведены результаты расчетов с использованием схемы Бернулли. Значения полученные для отношения правдоподобия приведены в предпоследнем столбце таблицы 2. В последнем столбце, для сравнения приведены отношения правдоподобия, полученные по той же методике в спектральном канале айгеноскопа, но не для частот гравитационных волн РДЗС из списка Джонстона, а для того же числа случайно выбранных частот из диапазона частот, в котором спектрально локализованы собственные векторы анализируемых временных рядов.

На рис. 4 в качестве примера показаны конкретный собственный вектор и его амплитудный спектр, получаемые при обработке в спектральном канале айгеноскопа.

Таблица 1. Описание работы блоков айгеноскопа

№ блока	Описание работы блока
1	Преобразует временной ряд $ s\rangle = s_1; s_2; \dots; s_L\rangle$, имеющий длину L , в траекторную матрицу $T_{M \times (L-M+1)} = \langle S_1\rangle, S_2\rangle, \dots, S_{L-M+1}\rangle $, где $ S_i\rangle$ — i -ый сегмент длины M исходного временного ряда (всего $L - M + 1$ сегментов).
2	Преобразует траекторную матрицу в матрицу плотности $\rho_{M \times M} = \left(\sum_{i=1}^{L-M+1} S_i\rangle \cdot \langle S_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{L-M+1} \langle S_i S_i \rangle \right)^{-1}.$
3	Вычисляет собственные пары (собственные векторы и собственные значения) матрицы плотности, определяемые соотношениями: $\langle \psi_i \rho_{M \times M} = \lambda_i \langle \psi_i $, $i = 1, \dots, M$ — форма «бра», $\rho_{M \times M} \psi_i \rangle = \lambda_i \psi_i \rangle$, $i = 1, \dots, M$ — форма «кет».
4	Вычисляет амплитудные спектры собственных векторов. Для повышения спектрального разрешения собственные векторы дополняются нулевыми векторами длины $M \cdot U$, затем для полученных таким образом векторов вычисляются модули быстрого преобразования Фурье $ \text{БПФ}(\psi_i \rangle; 0_i \rangle_{M \cdot U}) = a_{1i}; a_{2i}; \dots; a_{M \cdot (U+1), i} $, первые M значений которых, нормированные к своим максимальным значениям, используются в качестве оценок нормированных амплитудных спектров собственных векторов: $ \tilde{A}_i \rangle = \frac{ a_{1i}; a_{2i}; \dots; a_{Hi} }{\max_j (a_{ji})} = \tilde{a}_{1i}; \tilde{a}_{2i}; \dots; \tilde{a}_{Hi} \rangle$, где $H = \lfloor M \cdot (U + 1) / 2 \rfloor$ — целая часть числа, стоящего в скобках.
5	Список $N_{\text{ОСВ}}$ номеров собственных векторов, спектрально локализованных вблизи частот F_j , $j = 1, \dots, Q$, формируется следующим образом. Для каждого нормированного амплитудного спектра $ \tilde{A}_i \rangle$ определяется множество дискретных частот (множество номеров отсчетов) $f_i^{(W)} = \cup_k (\tilde{a}_{ki} > W)$, $k = 1, \dots, H$, $i = 1, \dots, M$, на которых $ \tilde{A}_i \rangle$ превышает некоторый заданный уровень W (обычно $W = 1/\sqrt{2}$). Далее определяются границы $f_i^{(\min)} = \min(f_i^{(W)})$ и $f_i^{(\max)} = \max(f_i^{(W)})$ множества $(f_i^{(W)})$, которые сопоставляются — для каждого конкретного собственного вектора — с дискретными частотами из списка F_j , $j = 1, \dots, Q$. При попадании частоты в границы области $f_i^{(W)}$ номер собственного значения включается в список. Таким образом $N_{\text{ОСВ}} = \cup_{i,j} (f_i^{(\min)} < F_j < f_i^{(\max)})$, $j = 1, \dots, Q$, $i = 1, \dots, M$, $n(N_{\text{ОСВ}})$ — размер списка номеров.

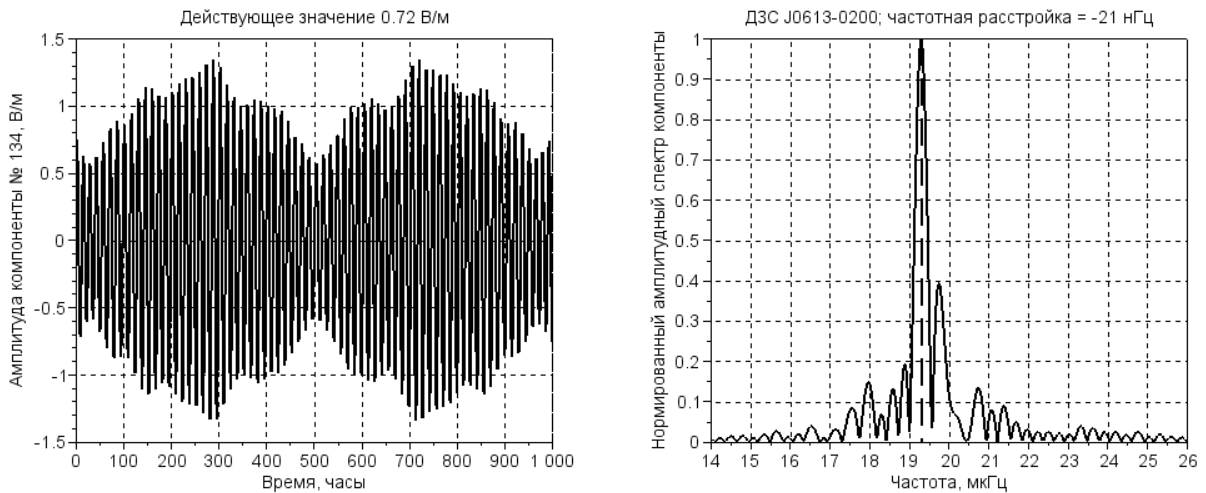


Рис. 4. Слева — проекция на СВ № 134 временного ряда станции Воейково на интервале анализа 1000 часов с действующим значением 0.72 В/м. Справа — нормированный к своему максимальному значению амплитудный спектр проекции, представленной на левом графике. Амплитудный спектр компоненты локализован вблизи удвоенной частоты обращения РДЗС J0613-0200 (частота обращения 0.9657032E-5Гц) с расстройкой -21 нГц (вертикальный пунктир — удвоенная частота обращения РДЗС)

Таблица 2. Сравнение итоговых результатов (последняя строка таблицы) убедительно говорит, о том, что случайно наблюдаемое нами при айгеноскопии число успехов может возникнуть с вероятностью, порядок которой 10^{-11}

Станция	Число испытаний $N_{И}$	Число успехов $N_{У}$	Число неудач $N_{НУ}$	$L_{КР}(N_{У} / N_{И})$	$L_{КР}(N_{СЛ} / N_{И})$
Воейково	125	81	44	$4 \cdot 10^{-3}$	1
Душети	123	76	47	$3 \cdot 10^{-2}$	0.7
Верхнее Дуброво	125	83	42	$1 \cdot 10^{-3}$	0.7
Полигон ВЛГУ	122	84	38	$1 \cdot 10^{-4}$	1
Всего	495	324	171	$4 \cdot 10^{-11}$	0.7

Таким образом, использование айгеноскопии позволяет говорить о наличие влияния гравитационных волн РДЗС на вертикальную составляющую электрического поля Земли. Объяснение открытого эффекта является предметом отдельного рассмотрения, выходящего за рамки данного доклада.

На настоящий момент времени можно говорить об открытии с помощью айгеноскопии «эффекта аномального поведения спектрально локализованных некоррелированных компонент электромагнитного поля Земли на частотах гравитационно-волнового излучения релятивистских двойных звездных систем», который (по сравнению с тестовыми выборками частот) проявляется — как для РДЗС с низким эксцентриситетом, так и для РДЗС с высоким эксцентриситетом в статистически значимом:

1. Превышении индекса когерентности и действующими значениями их медианных значений.

2. Увеличении нижней и верхней границ для пространственного коэффициента корреляции некоррелированных компонент — для всех станций (пар станций) наблюдений.

Открытый эффект теперь не является трудно выявляемым; компоненты вертикальной составляющей электрического поля Земли, идентифицированные как следствие результата действия релятивистских двойных звездных систем на глобальную электрическую цепь Земли, имеют напряженности от долей до двух вольт на метр. Решение проблемы их идентификации упиралось не в их малость, а неадекватные решаемой проблеме способы идентификации.

Таким образом, айгеноскопы являются эффективными анализаторами некоррелированных спектрально локализованных компонент, позволяющими решить проблему идентификации воздействия гравитационных волн РДЗС на вертикальную составляющую электрического поля Земли. Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти в [7-12].

Семантическая модель, положенная в основу решения поставленной проблемы идентификации состоит в том, что ищутся не чисто гармонический отклик вертикальной составляющей электрического поля Земли на гравитационные волны, продуцируемые РДЗС, а спектрально локализованные (вблизи частот гравитационно-волнового воздействия) некоррелированные компоненты. В связи с тем, что для решения проблемы необходимо идентифицировать сам факт такого воздействия, все известные РДЗС, гравитационные волны которых лежат в области инфранизких частот считаются идентичными.

Литература

1. Гусев А.В., Руденко В.Н. // Экспериментальные тесты теории гравитации. М.: Изд-во МГУ, 1989. – С. 94–101.
2. Балакин А.Б., Грунская Л.В. Аксионная электродинамика и гравитационные явления в земной атмосфере. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2014 № 2, с. 31, ISBN 2226-8812.
3. Anomalous Behavior of the Terrestrial Electric Field Intensity at Multiple Frequencies of Relativistic Binary Star Systems. L.V. Grunskaya, V.V. Isakevich, D.V. Isakevich. Gravitation and Cosmology. 2018. No.4, Vol.24. pp.384-392.
4. Johnston Wm. R. List of pulsars in binary systems, URL: www.johnstonsarchive.net/relativity/binpulstable
5. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Полезная модель РФ № 116242RU. Приоритет от 30 сентября 2011 года. Правообладатели: ООО «БизнесСофтСервис», Исакевич В.В., Исакевич Д.В.
6. Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Анализатор спектра собственных векторов и компонент сигнала. Полезная модель РФ № 178399RU. Приоритет от 28 июня 2017 года. Правообладатели: ООО «Собственный вектор», Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Балакирев А.Н., Черникова В.Н.
7. Исакевич Д.В. Основы анализа собственных векторов и компонент регулярных колебаний. [Электронный ресурс] — М. Издательство Перо, 2015. – 140 с. ISBN 978-5-00086-934-5.
8. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Лукьянов В.Е. / Гравитационно-волновой след в электромагнитном поле земли инфранизкочастотного диапазона // Известия высших учебных заведений. Физика, ISSN:0021-3411. - том 59, №9, 2016. с.41-47.
9. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V., Rubay D.V. / Electromagnetic field of Earth as a tool for astrophysical processes investigations // Proceedings of the Twelfth Asia-

Pacific International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology. Published by World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., ISBN 978-981-4759-80-9. 2016, p.352-354.

10. L. V. Grunskaya, V. V. Isakevich, D. V. Isakevich, V. E. Luk'yanov, I. A. Leshchev. / Infra-Low-Frequency Gravitational Wave Signals in the Electric and Magnetic Fields of the Earth // Astronomy Reports, Pleiades Publishing, 2017, ISSN 1063-7729, Vol. 61, No. 4, pp. 368–375.

11. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Лукьянов В.Е. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. - №9.- С.41-47.

12. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. О корреляции компонент электрического поля Земли по разнесенным в пространстве станциям на гармониках частот обращения релятивистских двойных звездных систем // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. - №1.- С.32-39.