

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ**ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ
КРАЙНЕНИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА И ПРОБЛЕМА
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО
ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ***Л. В. Грунская¹, А. Б. Балакин², З. Г. Мурзаханов²*¹*Владимирский Государственный технический университет*²*Казанский Государственный университет*

Работа связана с выработкой предложений по реализации нетрадиционных способов детектирования периодического гравитационного излучения от двойных пульсаров. Обосновывается идея проведения экспериментов по обнаружению крайненизкочастотных вариаций (КНЧ) электромагнитного поля Земли на частоте гравитационной волны (ГВ) и корреляционной обработки результатов экспериментов.

С о д е р ж а н и е

| | |
|--|-----|
| 1. Введение | 91 |
| 2. Гравитационно-волновой отклик в КНЧ-вариациях электромагнитного поля Земли | 92 |
| 3. Возбуждение резонатора Земля — ионосфера из космоса | 93 |
| 4. Приемный комплекс КНЧ радиоволн | 94 |
| 5. Корреляционный квадратурный обнаружитель периодического сигнала КНЧ диапазона | 95 |
| 6. Результаты корреляционной обработки флуктуаций электромагнитного поля КНЧ диапазона | 97 |
| Литература | 100 |

1. Введение

Накопленная в исследованиях электромагнитных колебаний КНЧ диапазона информация, полученная в результате длительных регистраций на экспериментальной базе кафедры общей и прикладной физики Владимирского Государственного Технического Университета, может внести существенный вклад в исследование периодического гравитационного излучения от двойных релятивистских объектов, частота которых лежит именно в этом диапазоне. Обнаружение электромагнитных полей, изменяющихся с частотой ГВ сигналов от релятивистских двойных систем, может стать косвенным подтверждением существования гравитационного излучения.

Если регистрируемое явление связано с полем ГВ, то обязаны проявиться следующие детали данного периодического процесса: процесс должен быть периодиче-

ским и стационарным; процесс должен выявить суточную и годичную модуляцию со специфической амплитудой, которая диктуется периодическим изменением взаимного расположения магнитных силовых линий в точке наблюдения и направления на источник ГВ. Для выяснения этих обстоятельств совместными усилиями кафедры физики ВлГУ и Лаборатории Гравитационно-волновой астрономии Казанского университета планируется серия экспериментов.

Сформулирована и решена задача построения оптимального квадратурного корреляционного обнаружителя электромагнитного сигнала известной частоты с неизвестной фазой, сопутствующего гравитационному излучению двойной звездной системы. Разработана программа и проведена компьютерная обработка имеющихся непрерывных регистрации КНЧ электромагнитных полей на предмет выделения полезного сигнала.

2. Гравитационно-волновой отклик в КНЧ-вариациях электромагнитного поля Земли

Электромагнитные колебания КНЧ — диапазона (ниже 30 Гц) стали предметом пристального внимания как объекты, интересные для целей радионавигации, изучения ионосферы и магнитосферы, подземной и подводной радиосвязи, геофизики, геомагнетизма. Накопленная в этих исследованиях информация может внести существенный вклад в исследование периодического гравитационного излучения от двойных релятивистских объектов, частота которых лежит именно в этом интервале.

Основа теории взаимодействия ГВ с квазистатическими электромагнитными полями была заложена в статье [1]. В ней и в многочисленных последующих работах других авторов было показано, что периодическое гравитационное излучение приводит к формированию в такой физической системе переменного электромагнитного поля, изменяющегося с частотой ГВ. Полученные результаты допускают интересную интерпретацию в рамках теории переходного излучения [2] в средах с периодически изменяющимися параметрами. Применение этой теории к естественному электромагнитному полю Земли приводит к выводу, что приходящее на нашу планету гравитационное излучение генерирует электромагнитные колебания в полости Земля — ионосфера. Частота этих колебаний совпадает с частотой ГВ, амплитуда пропорциональна величине электромагнитного поля на амплитуде ГВ. Вопрос о величине коэффициента трансформации — это самый тонкий вопрос теории. По предварительным оценкам он должен быть малым при наличии среды, поскольку в ней нарушается синхронность распространения электромагнитных и гравитационных волн. Однако точные расчеты в рамках ковариантного феноменологического подхода привели к неожиданному результату: в разреженной среде с коэффициентом преломления, близким к единице, электромагнитный отклик пропорционален величине $1/n^2 - 1$ и аномально возрастает при $n \rightarrow 1$ [3]. Существует также и инерционная аномалия в случае, когда источник ГВ и электродинамическая система движутся друг относительно друга с релятивистскими скоростями.

Таким образом, механизм генерации КНЧ — вариаций электромагнитного поля под действием периодического непрерывного гравитационного излучения можно рассматривать как один из источников реально наблюдаемых электромагнитных колебаний этого диапазона.

В работе [4] проводится идея многопараметрической модуляции электромагнитных волн полем периодического гравитационного излучения. В силу универсальности ГВ — воздействие охватывает все энергоинформационные степени свободы детектирующей системы, так что речь идет именно о многопараметрической мо-

дуляции. При анализе модуляции поля ЭМВ полем ГВ имеют ввиду и модуляцию частоты, и амплитудную модуляцию, и модуляцию поляризационных параметров, и модуляцию направления распространения, и модуляцию фазовой скорости и модуляцию групповой скорости.

В статье [5] рассмотрено рождение крайненизкочастотных радиоволн на частоте периодического ГИ за счет индуцированного нелинейного самодействия электромагнитного излучения в окрестности источника ГИ. Нелинейное индуцированное самодействие электромагнитного поля приводит к образованию аддитивной добавки в электромагнитный потенциал.

В работе [6] прослеживается идея рождения электромагнитного излучения на частоте гравитационной волны внутри заряженного конденсатора, помещенного в поле гравитационной волны. Подобным конденсатором может служить конденсатор Земля — ионосфера в поле гравитационных волн, рожденных бинарными звездными системами, излучающими в КНЧ диапазоне. Термином “конденсатор” пользуются обычно при изучении квазистатических явлений, для которых характерная длина волны во много раз превосходит радиус Земли, что соответствует рассматриваемой ситуации.

Подробный сравнительный анализ возможных механизмов генерации КНЧ — вариаций электромагнитного поля Земли под действием гравитационного поля двойных звездных систем будет рассмотрен в последующих работах авторов, в настоящей статье остановимся на условиях регистрации КНЧ электромагнитных полей в резонаторе Земля — ионосфера, на методиках регистрации и выделения полей КНЧ, которые могут явиться откликом на КНЧ гравитационные поля от двойных звездных систем, а также на некоторых экспериментальных результатах и их обработке.

3. Возбуждение резонатора Земля — ионосфера из космоса

Атмосфера — тонкий диэлектрический слой, ограниченный сверху ионосферой, а снизу землей — сравнительно хорошими проводниками. Это сферический волновод. Верхняя граница частот волноводного канала определяется дисперсионными свойствами ионосферы, нижняя граница частот не существует, т.е. в волноводе Земля — ионосфера могут распространяться электромагнитные волны сколь угодно низкой частоты, вплоть до постоянного тока. Затухание в волноводном канале на КНЧ крайне мало. Например, для $f = 10$ Гц и $\lambda = 30000$ км затухание составляет 0,2 дБ/тыс.км.

Электромагнитные поля КНЧ диапазона в полости Земля - ионосфера могут возбуждаться двумя типами естественных источников - земными и космическими.

Основным источником полей КНЧ диапазона является электромагнитное излучение грозových разрядов. Величина спектральной плотности экспериментально наблюдаемых полей хорошо согласуется с данными по глобальной грозовой активности [7, 8, 9, 10]. Источником электромагнитных колебаний в полости Земля — ионосфера могут быть также КНЧ излучения, проникающие в резонатор из космоса. Космическая природа электромагнитных колебаний, наблюдаемых на поверхности Земли в КНЧ диапазоне, установлена с высокой степенью достоверности [11, 12]. Измерения в магнитосфере Земли показали, что уровень спектральной плотности колебаний КНЧ диапазона почти на порядок превышает средний уровень спектральной плотности шумов, наблюдаемых в полости Земля — ионосфера на тех же частотах. Поэтому ожидается, что вклад космических источников в регистрируемый на поверхности Земли сигнал будет сравним с вкладом мировой грозовой активности в этот сигнал. Оценки энергетического коэффициента прозрачно-

сти ионосферы на частотах КНЧ дают величину порядка 0,1–0,3 [13]. Ионосфера наиболее прозрачна для волн КНЧ диапазона в ночное время суток и наименее прозрачна днем [14].

Теория возбуждения резонатора космическими источниками разработана М.В.Блиохом и изложена в [12]. Следует особо отметить специфическую интерференцию волн, связанную с расположением источника вне резонатора. Взаимное запаздывание токов, возбуждаемых космическим источником в Северном и Южном полушариях и приводящее вследствие малого затухания КНЧ полей к интерференции волн, обуславливает наблюдающуюся на эксперименте изрезанность получаемых энергетических спектров. Эта изрезанность спектров не связана с наличием геомагнитного поля и расщеплением собственных частот резонатора Земля — ионосфера. Характер расщепления зависит от величины взаимного запаздывания токов, а также от амплитуды колебаний источника. Экспериментальное обнаружение сильно изрезанных КНЧ спектров может служить косвенным подтверждением космического характера возбуждения зарегистрированных колебаний.

4. Приемный комплекс КНЧ радиоволн

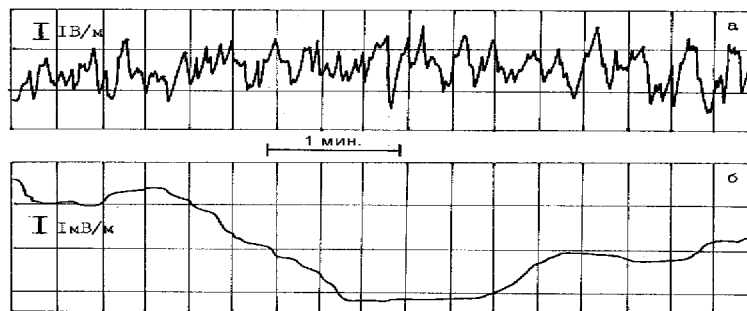
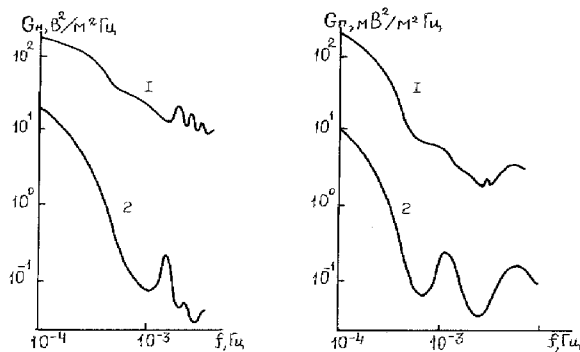
Начиная с 1972 года на экспериментальной базе кафедры физики Владимирского Государственного технического университета проводятся исследования электромагнитных полей крайненизкочастотного диапазона. Предметом исследований было изучение полей сопутствующих землетрясениям, извержениям вулканов, грозам. Построенный специально для этой цели комплекс содержит наземные, подземные и подводные приемные каналы, расположенные на площади в четыре гектара. Комплекс позволяет регистрировать сигналы КНЧ диапазона на фоне разнообразных помех в течение длительных промежутков времени, позволяет проводить долговременную корреляционную обработку сигналов, получение суточных и сезонных флуктуаций, радиуса пространственной корреляции помехи и закона распределения полей КНЧ диапазона [15, 16]. Было доказано, что уникальные возможности возникают при включении в приемный комплекс подземных и подводных приемных каналов совместно с наземными. Зарегистрировано важное свойство природы: помеховый фон над и под землей некоррелирован, что позволяет при синхронном режиме регистраций над и под землей полей КНЧ диапазона с последующей корреляционной обработкой, исключить влияние местных помех при регистрации периодических сигналов КНЧ диапазона и значительно повысить отношение сигнал/шум при выделении полезной информации [16].

С 1993 года проводятся совместные работы кафедрой физики ВлГТУ и Лабораторией гравитационно-волновой астрономии Казанского Государственного университета в плане теоретических и экспериментальных исследований крайненизкочастотных вариаций электромагнитного поля Земли, индуцированных периодическим изменением гравитационного фона. В качестве наиболее вероятных кандидатов в источники низкочастотного излучения взяты двойные пульсары, приведенные в каталоге.

По результатам синхронных регистраций электрической составляющей КНЧ вблизи интересуемых частот [17, 18] была рассчитана спектральная плотность мощности флуктуационной составляющей поля над и под поверхностью земли по зимним и летним регистрациям (рис. 1, 2). Спектральная плотность мощности оценена в абсолютных единицах. Так же рассчитывалась автокорреляционная функция, которая иногда является более эффективным средством при выделении скрытых периодичностей, содержащихся в случайном процессе.

Каталог двойных пульсаров с КНЧ-частотой ГВ-излучений

| № | Наименование источника | Расстояние до источника, кПс | Амплитуда ГВ-сигналов $hE-22$ | Период T , ч | Частота $FE-05$ Гц |
|---|------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 | PSR 0700+6418 | 0,48 | 15,479 | 24,6880728720 | 2,2514407 |
| 2 | PSR 1012+5307 | 0,52 | 20,362 | 14,5121451120 | 3,8301527 |
| 3 | PSR 1537+1155 | 0,68 | 21,436 | 10,0976851952 | 5,504596 |
| 4 | PSR 1959+2048 | 1,53 | 9,4 | 9,1671993336 | 6,0633277 |
| 5 | PSR 1910+0004 | 4,1 | 6,817 | 3,3839040000 | 16,425918 |
| 6 | PSR 0024-7204J | 4,5 | 6,89 | 2,8959600000 | 19,193542 |
| 7 | PSR 1913+16 | 5,2 | 0,696 | 7,74802222 | 7,1702866 |
| 8 | PSR 1748-2426A | 7,1 | 5,962 | 1,8155068080 | 30,616097 |
| 9 | PSR 2127+11C | 9,7 | 0,15 | 8,04287760 | 6,9074203 |

Рис. 1. Копии осциллограмм E_z КНЧ диапазона: а — наземный канал, б — подземный каналРис. 2. Спектральная плотность флуктуаций E_z КНЧ диапазона: а — над землей, б — под землей; 1 — зима, 2 — лето

Предварительный анализ привел к необходимости поиска более оптимального метода выделения периодического сигнала, соответствующего частоте излучения бинарной звездной системы, на фоне всей суммы полей крайненизкочастотного диапазона, регистрируемых приемными каналами комплекса КНЧ.

5. Корреляционный квадратурный обнаружитель периодического сигнала КНЧ диапазона

Задача исследований ставилась таким образом. Пусть в принятом колебании, представляющем собой сумму полезного сигнала $S(t)$ и помехи $n_0(t)$, необходимо установить факт наличия самого сигнала.

Запишем принятое колебание $E(t)$ в виде:

$$E(t) = \Theta \times S(t) + n_0(t); \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

здесь: Θ — случайная величина, которая может принимать лишь два значения $\Theta = 1$ (сигнал есть), $\Theta = 0$ (сигнала нет). Требуется по принятой конкретной реализации $E(t)$ на интервале $(0, T)$ решить оптимальным образом, присутствует или отсутствует сигнал $S(t)$.

Основные уравнения фильтрации в дискретном времени позволяет точно решить задачу обнаружения в случае, когда смесь сигнала с шумом имеет нормальный закон распределения на различных участках записей, полученных на экспериментальной базе [19]. Закон распределения полученных регистраций близок к нормальному. Сформулированная задача обнаружения сигнала на фоне шума является весьма характерной. В результате решения этой задачи должна быть получена структурная схема оптимального обнаружителя.

Рассматриваемый сигнал не детерминированный, т.к. содержит случайные параметры — амплитуду и фазу.

В общем виде модуль такого сигнала можно записать:

$$S(t) = S(t) \cos[2\pi f_0 t + g(t) + \varphi], \quad (2)$$

$S(t)$ — комплексная огибающая сигнала, g — известный закон угловой модуляции, φ — случайная начальная фаза.

В соответствии с [19] оптимальный обнаружитель сигнала со случайной начальной фазой имеет следующее решающее правило:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} \int_0^T Y^*(t) \times S^*(t) dt \right]}{\operatorname{Im} \left[\frac{1}{2} \int_0^T Y^*(t) \times S^*(t) dt \right]} = \int_0^T Y(t) \times S(t) \frac{\cos[2\pi f_0 t + \gamma(t)]}{\sin[2\pi f_0 t + \gamma(t)]} dt \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}, \quad (4)$$

где $Y(t)$ — принятый сигнал, $S(t)$ — выделяемый сигнал, Z — является абсолютным значением корреляции комплексных принятого сигнала и выделяемого.

Гильбертовы сопряженные составляющие:

$$S(t) \cos[2\pi f_0 t + \gamma(t)]; \quad S(t) \sin[2\pi f_0 t + \gamma(t)]. \quad (5)$$

Таким образом, обнаружитель в конкретной ситуации будет корреляционного квадратного типа (рис. 3).

Наличие двух корреляторов и принятие решения по статистике Z , объединяющий выходные эффекты обоих каналов, позволяет обнаружить сигнал с неизвестной фазой. Если бы сигнал со случайной фазой обнаруживался как детерминированный, то при $\varphi = \pm\pi/2$ схема не замечала бы $S(t)$ из-за слабой корреляции последнего с опорным сигналом коррелятора ($\cos \pi/2 = 0$). Благодаря тому, что опорные сигналы корреляторов находятся в квадратуре, статистика Z не зависит от φ , в результате чего устраняется вредное влияние случайной начальной фазы.

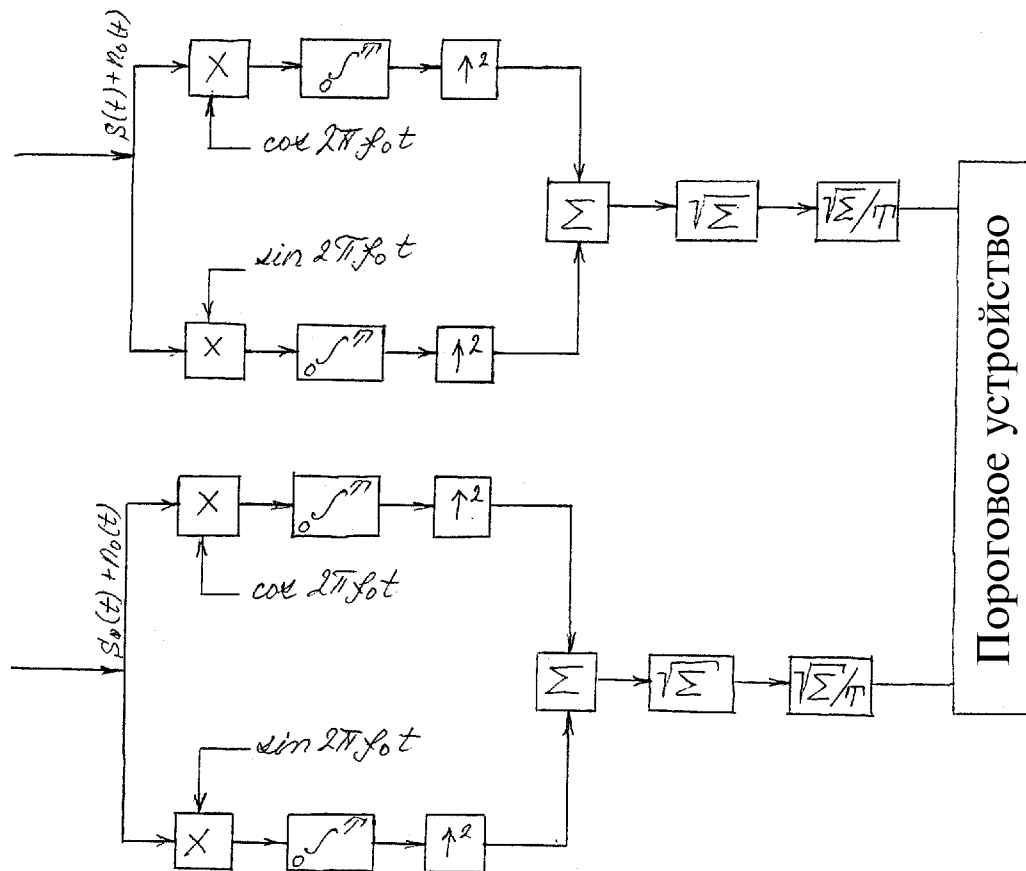


Рис. 3. Структурная схема оптимального корреляционного квадратурного обнаружителя электромагнитного сигнала известной частоты с неизвестной фазой, сопутствующего гравитационному излучению двойной звездной системы

Таким образом, инвариантность Z к начальной фазе сигнала $S(t)$ объясняется тем, что значение φ влияет только на аргумент корреляции комплексных огибающих $Y^*(t)$, $S^*(t)$, тогда как Z есть модуль Z .

6. Результаты корреляционной обработки флуктуаций электромагнитного поля КНЧ диапазона

Обработке были подвергнуты результаты непрерывных суточных регистраций по четырем наземным и подземному каналу, а также десятисуточные регистрации, полученные в результате режима накопления за определенный период регистраций на экспериментальной базе. Полученные результаты корреляционной обработки можно считать предварительными, т.к. достоверная оценка присутствия сигнала от источника в регистрациях может быть проведена при анализе достаточно длительных непрерывных регистраций (месяц, год), что продиктовано частотами источников. В результаты анализа должны обязательно быть включены дальности до источников и теоретически рассчитанный уровень гравитационного излучения каждого из них.

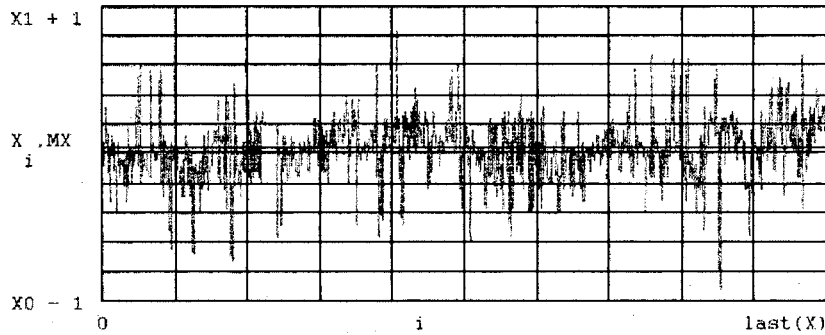
Получено значительное число результатов по корреляционной обработке исходных данных по суточным и десятисуточным непрерывным регистрациям, по всем указанным в приведенном выше каталоге источникам. Приводим некоторые из них. На рис 4, 5 даны примеры корреляционной обработки по двум синхронным регистрациям в частотном диапазоне, охватывающем все источники каталога. Хорошо

просматриваются пики на частотах, близких к источникам № 7, № 6, № 8 по каталогу, по обоим приемным каналам.

Приемный канал № 2

ГРАФИК СИГНАЛА

(десять суток)



РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

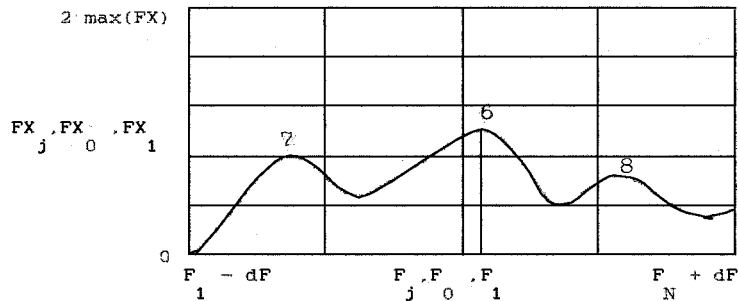


Рис. 4. F6 — 0,000206 Максимум вблизи источника № 6 (Гц); F7 — 0,000073 Максимум вблизи источника № 7 (Гц); F8 — 0,000313 Максимум вблизи источника № 8 (Гц)

На рис. 6, 7, 8 приведены результаты более детального анализа вблизи частоты конкретного источника. Отклонения от истинных частот источников, невозможность разделить источники близкие по частоте (№ 4 и № 9; № 6 и № 5), а также отсутствие возможности выделить частоты самых низкочастотных источников (№ 1, № 2, № 3) связано с недостаточной длительностью времени непрерывных регистраций.

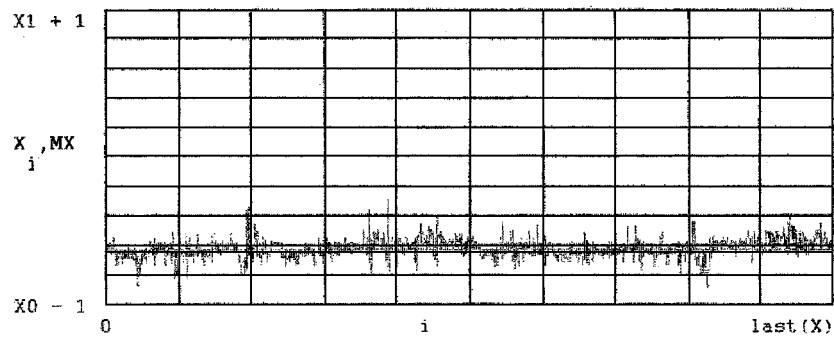
Результаты предварительной корреляционной обработки на предмет выделения сигнала, сопутствующего гравитационному излучению от двойных пульсаров, позволяют сделать следующие выводы:

- методика выделения полезного сигнала с помощью корреляционного квадратного обнаружителя является оптимальной для конкретной решаемой задачи, но для более корректного решения поставленной задачи необходимо увеличить время непрерывных регистраций;
- предварительный анализ результатов наблюдений за последние 10 лет указывает на то, что имеются устойчивые электрические сигналы на частотах, близких к частотам излучения анализируемой группы двойных пульсаров, не связанные с местным помеховым фоном;
- имеющиеся данные не позволяют пока утверждать, что именно поле ГВ, воздействуя на естественное электрическое поле Земли, является причиной этих колебаний;
- необходимо провести сравнительный анализ возможных механизмов генерации КНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли и оценить их вклад в амплитудночастотный спектр на поверхности Земли;

Приемный канал № 1

ГРАФИК СИГНАЛА

(десять суток)



РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

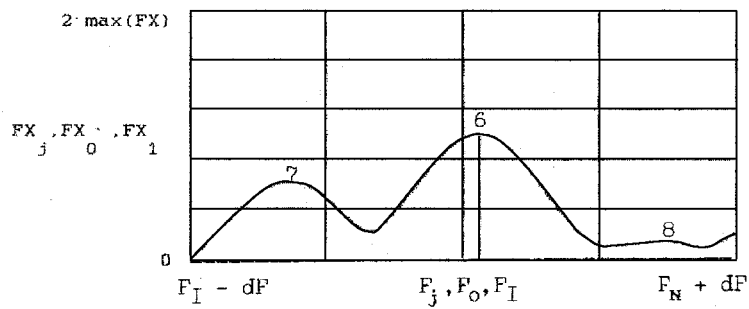


Рис. 5. F6 — 0,000208 Максимум вблизи источника № 6 (Гц); F7 — 0,000072 Максимум вблизи источника № 7 (Гц); F8 — 0,000344 Максимум вблизи источника № 8 (Гц)

РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

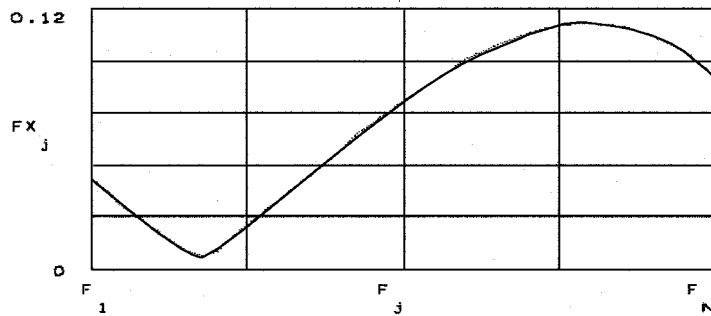


Рис. 6. F7 — 0,000072 Максимум вблизи источника № 7 (Гц)

РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

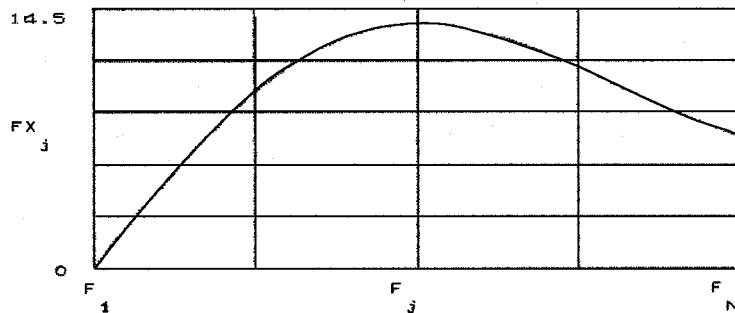


Рис. 7. F8 — 0,000312 Максимум вблизи источника № 8 (Гц)

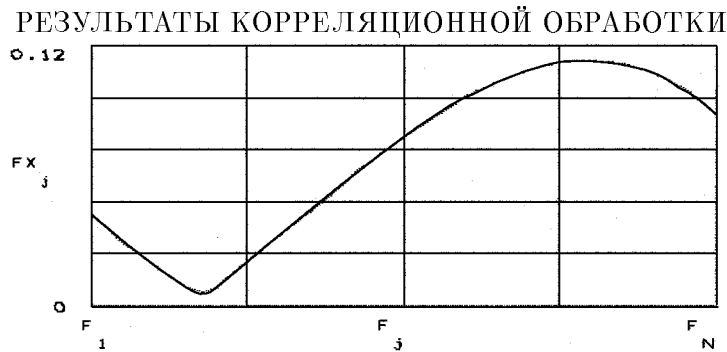


Рис. 8. F_9 — 0,0001959 Максимум вблизи источника № 9 (Гц)

— поскольку в этом диапазоне частот существует мощный помеховый фон электромагнитных колебаний, такие исследования неминуемо должны включать длительное накопление и корреляционную обработку сигнала, а также процедуру аналитического и компьютерного восстановления структуры и параметров гравитационных полей по результатам электромагнитных измерений. Для выяснения указанных выше обстоятельств совместными усилиями кафедры физики ВлГУ и Лаборатории Гравитационно-волновой астрономии Казанского университета разрабатываются тесты, методика измерений и планируется новая серия экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bocchetti D., De Sabatta V., Fortini P., Gualdi C.* // Nuovo Cim., 1970, **V70**, № 2, p.129-146.
2. *Гинзбург В.Л., Цитович В.Н.* Переходное излучение и переходное рассеяние. М., Наука, 1984, 360 с.
3. Гравитация и теория относительности. Издательство Казанского Университета. Вып. 30. 1992.
4. *А.Б.Балакин.* Ковариантная теория многопараметрической модуляции электромагнитных волн полем периодического гравитационного излучения. // Гравитация и теория относительности. Вып. 30, 1992, Казань, с. 31–65.
5. *А.Б.Балакин., Косунько Г.В., Мурзаханов З.Г.* Радиоволновые герольды периодического гравитационного излучения и проблема гравитационно-индуцированной нелинейности в электродинамических системах. Доклады Академика Наук, 1996.
6. *Лупанов Г.А.* Конденсатор в поле гравитационной волны. ЖЭТФ, Т. 52, вып. I, 1967, с. 118–123.
7. *Юман М.* Молния: Пер. с англ. — под ред. Н.В.Красногорской. М.: Мир, 1972, 327 с.
8. *Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потанов А.В., Ремизов Л.Т.* Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. — М.: Наука, 1972. 195 с.
9. *Колоколов В.П.* К происхождению электрического поля Земли. // Труды Главной геофизической обсерватории, 1974, вып. 301. С. 10–47.
10. *Wait A.D.* VLE Radio Engeneeing. // Pergaman Press, 1967, p. 701.
11. *Гульельми А.В., Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М., Наука, 1973. 540 с.
12. *Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф.* Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля — ионосфера. Киев, Наукова думка, 1977. 200 С.
13. *Abbas M.* Hydromagnetic Wava Propogation and Excitation of schuman Resonanses. // Plan Space Sci. 1968, 16.
14. *Мирошниченко Л.И.* Солнечная активность и земля. Наука, Москва, 1981. С. 110.
15. *Куни В.Н., Александров В.С., Конопасов Н.Г., Грунская Л.В.* // Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа, Рязань, 1976, с. 53–62.
16. *Грунская Л.В.* Патент Российской Федерации на изобретение “Способ устранения местных помех при регистрации сверхнизкочастотных сигналов”. 93030230/09/027/537 от 9.01.1996 г.
17. *Грунская Л.В., Майков М.Н.* Корреляционный анализ КНЧ вариаций электромагнитного поля Земли и проблема детектирования периодического гравитационного излучения // Труды VII Семинара “Гравитационная энергия и гравитационные волны”. ОИЯИ. Дубна. 1996.

18. *Грунская Л.В.* Проблема детектирования периодического гравитационного излучения от двойных звездных систем // Теоретическое и экспериментальное исследования в гравитации. Международный семинар. Тезисы докладов. Новгород. 1996.
19. *Казаринов Ю.М., Гришин Ю.П.* Радиотехнические системы. Москва. Высшая школа. 1990.