

# Гравитационный шум несимметричен во временной области и существует постоянно.

Александр Крамаренко, Андрей Крамаренко, Оксана Савенко

## Аннотация

При анализе записей гравитационных обсерваторий проекта LIGO [1] нами была обнаружена специфическая, присущая только сигналам их гравитационных детекторов, асимметрия во временной области. Эксперименты с различными периодическими сигналами, гауссовыми и негауссовыми шумами дали возможность сделать предварительный вывод, что шум гравитационных детекторов представляет собой необычную смесь сигналов.

Нами была разработана собственная система фильтрации гравитационных сигналов, которая использует только линейные инвариантные во времени элементы [2], причем вся обработка производится исключительно во временной области. Обнаружение и распознавание сигналов гравитационных волн проводилось с помощью специализированного персонуевского [3] корреляционного анализатора.

Выяснилось, что шумы детекторов включают в себя значительный (– бдБ) компонент, имманентно присущий достоверно обнаруженным гравитационным волнам, и этот результат позволяет аргументированно предположить, что гравитационный шум в значительной степени обусловлен процессами слияния массивных астрономических объектов. Так как специфический шумовой сигнал регистрируется детекторами непрерывно, поле гравитационных колебаний субкилогерцового диапазона можно считать обнаруженным.

Разработан метод анализа, позволяющий оценить вклад компоненты гравитационного шума в общую энергию сигнала. Его преимуществом можно считать низкую требовательность к вычислительной мощности: обработка сигнала обеспечивается в реальном времени при использовании обычного персонального компьютера.

С помощью предлагаемого метода можно будет не только перейти к радиочастотной оценке величины гравитационных возмущений, что следует из последних публикаций [4], но и, возможно, построить карту гравитационного шума неба. К статье прилагаются файлы данных, на которые есть ссылки в работе.

## Введение

Гравитационная волна с мгновенной амплитудой представляет собой импульсный  $h(t)=h_0 \cos \phi(t)=h_0 \cos (2 \pi f t+\pi \dot{f} t^2-\phi_0)$  сигнал с комбинированной частотноамплитудной модуляцией, плавным нарастанием и быстрым спадом (сигналы ЛЧМ радаров [5] имеют сходную асимметрию во времени, которая реализуется только в области мгновенных частот, но амплитуда импульса существенно не изменяется).

Оптимальным обнаружителем сигнала с такой специфической формой будет свертка с его инвертированной во времени копией [6]. При этом свертка с неинвертированной копией будет давать много меньший отклик, который не сосредоточен во времени. Этот феномен обусловлен асимметрией импульсов.

Вопрос о вкладе гравитационных волн, обусловленных слиянием вращающихся масс, в общую структуру шума обсуждался неоднократно. Насколько нам известно [7], обсуждение пока не вышло за рамки гипотез, и получение экспериментальных данных было бы полезным. Отдельно следует упомянуть работу [8], авторы которой предложили метод обнаружения

событий слияния звездных масс, основываясь на малых отличиях наблюдаемого шума от гауссового.

Однако гауссовы критерии шума никак не запрещают ему быть симметричным или асимметричным во времени. В качестве примера возьмем достаточно большую реализацию идеального белого гауссового шума и разобьем ее на множество равных фрагментов. После спектрального анализа вычислим медианную частоту спектра каждого фрагмента. Соберем из фрагментов новую реализацию, где первые фрагменты будут иметь низкие частоты спектра, вторые – средние, третьи – высокие и далее циклически.

Получившаяся реализация будет полностью соответствовать всем критериям БГШ, как и первоначальная. Но спектроанализатор со скользящим окном, равным длине фрагмента, при смещении слева направо по новой реализации будет генерировать уже не случайную, а циклически повторяющуюся последовательность медианных частот. А при обратном проходе последовательность будет повторяться в обратном порядке. То есть сконструированная таким образом реализация БГШ не будет симметрична во времени. Но при этом функция распределения и спектр новой реализации не будут отличаться от исходных.

Именно поэтому поиск асимметрии гравитационного шума представляется нам более перспективным, чем анализ функции распределения и спектров, т.к. сигналы вращения/слияния звездных масс несимметричны во временной области.

### Методы обработки

Для того чтобы ответить на вопрос вклада энергии гравитационных волн в общую энергию шума необходимо проверить: есть ли характерная для гравитационных волн асимметрия в выходном сигнале детектора в период, когда эти события, т.е. волны, не фиксируются. Эту задачу нужно решить только во временной области (без перехода в частотную область), т.е. спектральное отбеливание придется исключить. Более того, фильтрация должна обеспечить линейную фазочастотную характеристику всей системы, т.к. любые «шлейфовые» затухания сигнала, характерные для БИХ фильтров высоких порядков, будут искажать результаты [9].

Необходимые для решения описанной задачи нерекурсивные фильтры удалось построить с применением скользящего окна с весовыми коэффициентами вида:

$$W_i = -\cos \frac{2\pi i}{N-1} \cdot \sin^2 \frac{\pi i}{N-1} \quad (1)$$

где  $i \in [0, N-1]$  — номер отсчёта внутри окна длиной  $N$  отсчётов.

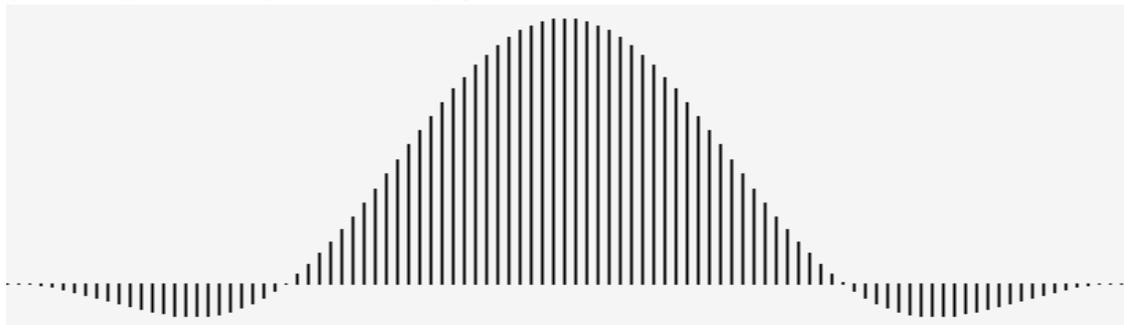


Рис. 1. Используемое для синтеза фильтров окно.

Как видно на следующем рисунке, выделенная таким способом гравитационная волна ограничена по частоте сверху, но имеет минимум внеполосных помех.



Рис. 2. Гравитационная волна, выделенная из исходного сигнала с помощью собственной системы фильтров. Исходный файл [H1.wav](#) из оригинальных данных LIGO [10] содержит событие GW170729 [11]. Файл после фильтрации: [H1\\_filt.wav](#) (прослушивание обеих записей возможно).

Отметим, что исходный материал LIGO имеет спектр сигнала, представленный на рисунке 3.

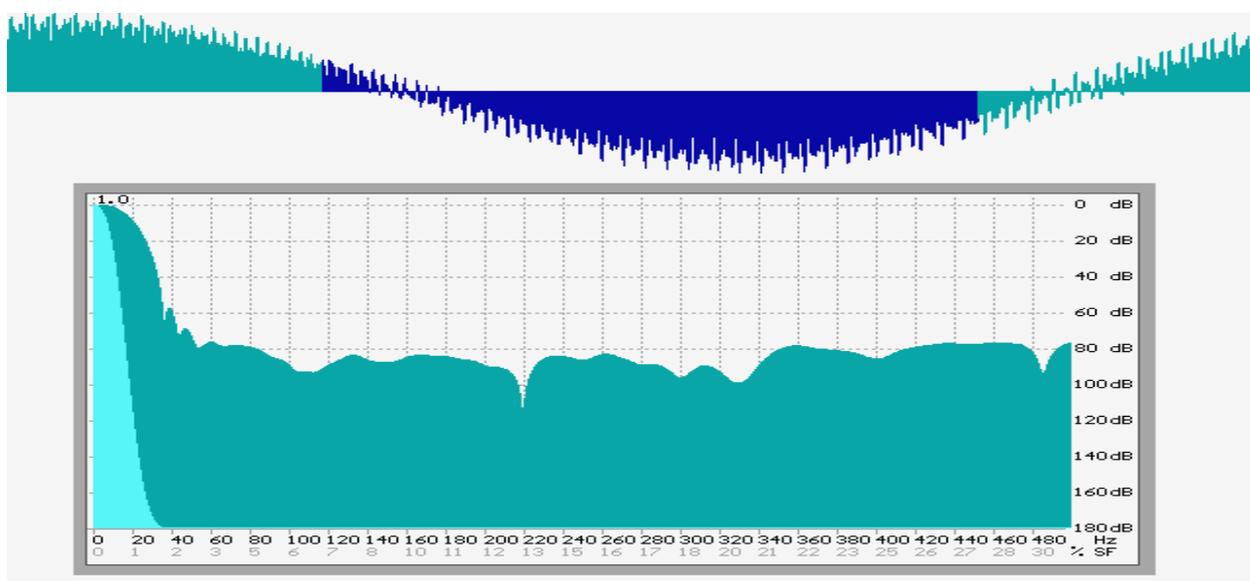


Рис. 3. Спектральное оценивание сигнала LIGO: сверху осциллограмма (синим цветом выделена область, в которой регистрировалась гравитационная волна события GW170729 [11]). Внизу энергетический спектр, шкала по оси X линейная, разрешение 0.5 Гц. Весовое окно Ханна: зеленым цветом по оси ординат показаны логарифмические данные, голубым цветом — линейные.

Разумеется, при таком соотношении сигнал/шум необходимо подавить как доминирующие низкочастотные компоненты, так и высокочастотные гармоники. Неизбежная неравномерность АЧХ в требуемой полосе пропускания будет меньшим ущербом для последующего анализа, чем остаточные внеполосные составляющие.

При фильтрации этого сигнала получены такие результаты:  $-200$  дБ ( $80 + 120$ ) в полосе  $0 \dots 20$  Гц и не менее  $-126$  дБ на частотах выше 470 Гц, что хорошо согласуется с предельно возможным подавлением с учетом остаточной разрядности оцифровки.

Данные контроля показали, что неравномерность АЧХ в диапазоне  $70 \dots 250$  Гц (т.е. в наименее зашумленном ГВ диапазоне) не превысила 6 дБ.

Проверить эффективность выделения гравитационной волны и корректность выбранного метода фильтрации можно с помощью оценки работы сверточного обнаружителя. В нашем случае будем использовать в качестве прототипа выделенный нами инвертированный во времени сигнал гравитационной волны от события GW170729 [11].

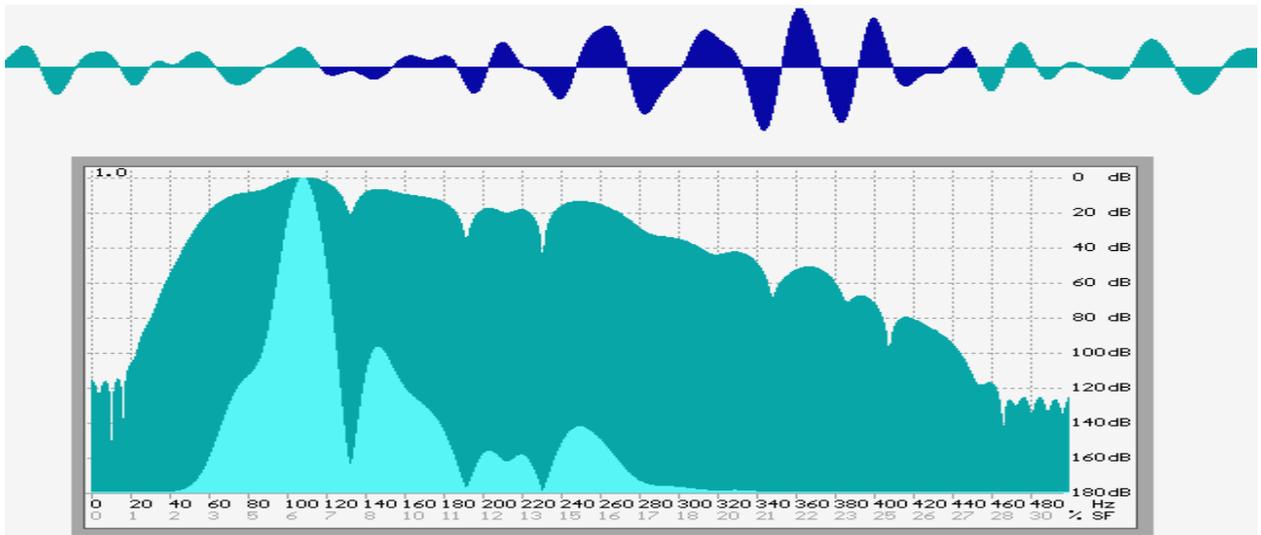


Рис. 4. Спектральное оценивание сигнала LIGO после КИХ фильтрации: сигнал уверенно выделяется из шумов, подавление внеполосных компонентов достаточное.

Для каждого сдвига на один отсчет сигнала исходного файла [H1\\_filt.wav](#) вычислялись два параметра: а) квадрат пирсоновского коэффициента корреляции [3] и б) взвешенный с помощью косинусоидального окна [12]  $\omega_i$  текущий фрагмент свертываемого сигнала.

Произведение этих параметров будем представлять в виде графика, разворачиваемого синхронно с исходным сигналом:

$$V_j = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{X_i \omega_i [\text{cov}(X, Y)]^2}{s^2(X) \cdot s^2(Y)} = \sum_{i=0}^{N-1} \left[ X_i \frac{\left(1 - \cos \frac{2\pi i}{N-1}\right) \times \left(\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y})\right)^2}{\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})^2 \sum_{k=0}^{N-1} (Y_k - \bar{Y})^2} \right] \quad (2)$$

где  $V_j$  – отсчёт выходного сигнала,  $X$  – реализация входного сигнала,  $Y$  – реализация инверсного прототипа,  $n$  – длина реализаций (в количестве отсчетов),  $s^2$  – дисперсии выборок. Значения  $V_j$  всегда положительны и будут тем выше, чем более реализация  $X$  коррелирует с прототипом  $Y$  и чем выше уровень сигнала  $X$ .

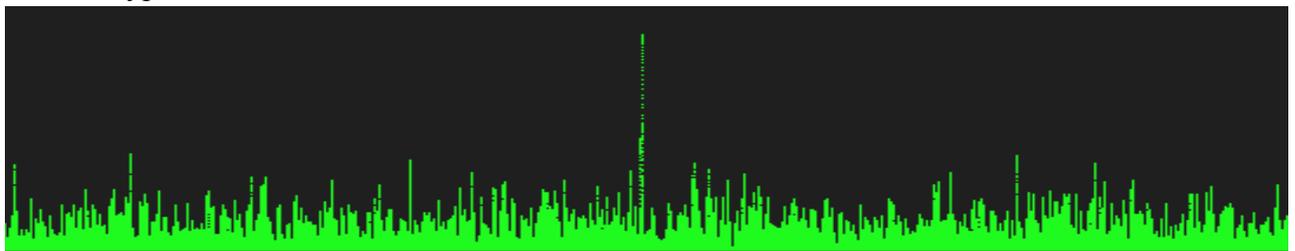


Рис. 5. Временной ряд значений  $V_j$ , вычисленных по формуле (2) для файла [H1\\_filt.wav](#). Длительность фрагмента записи 24 секунды. Посередине графика находится отклик от «официально подтвержденной» волны, еще, по меньшей мере, три всплеска соответствуют фрагментам, по поводу которых была дискуссия о соответствии их формы паттерну гравитационной волны.

Для подтверждения гипотезы об асимметрии гравитационного шума ее необходимо экспериментально зарегистрировать и по возможности измерить.

Наша базовая идея заключается в том, что (для достаточно длительной реализации) статистически накопленные пирсоновские корреляции любого симметричного во времени сигнала (шума) с прямым и инвертированным прототипами будут всегда равны.

Здесь, видимо, следует пояснить идею с помощью простой модели. Итак, пусть есть оцифрованная длинная реализация шума Гаусса, и есть короткий фрагмент несимметричного

во времени сигнала: например оцифрованный звук падающего диска Эйлера [9] или импульс ЛЧМ радара.

Теперь пусть этот фрагмент сигнала скользит вдоль шумовой реализации. Вычисляя пирсоновский коэффициент на каждом шаге, мы можем убедиться, что в любой момент времени значение корреляции процессов будет колебаться пределах  $-1.0 < R < +1.0$ . Накопленная сумма всех коэффициентов будет стремиться к нулю, т. к. шум не коррелирован с сигналом.

Если развернуть любой из сигналов во времени, т.е. «задом наперед», и повторить измерение, то результат будет идентичным: сумма накопленных коэффициентов будет стремиться к нулю, и это ожидаемо, т. к. шум симметричен во временной области – его можно просматривать слева направо или наоборот – ничего не изменится.

Совсем другой результат получится, если сам шум (NB!) состоит из фрагментов несимметричных во времени сигналов. Предположим, мы собрали звуки очень большого количества одновременно вращающихся и падающих дисков Эйлера. Согласно центральной предельной теореме, суммарный сигнал будет представлять собой ограниченный в полосе шум. Его статистические характеристики будут близки к гауссовым (тем ближе, чем больше дисков запущено одновременно).

При вычислении корреляции этого шума с фрагментом порождающего его сигнала должен проявиться такой феномен: накопленная сумма корреляций будет зависеть от направления взаимного смещения сигналов. И если хотя бы один из сигналов симметричен во времени, то асимметрии при накоплении корреляций не будет, а феномен проявится только в случае, если оба (NB!) сигнала асимметричны.

Проведем эксперименты с реальными сигналами. Для исключения влияния амплитуды сигнала на результат будем использовать только нормированную корреляцию с прямым и инверсным прототипом. Разность коэффициентов корреляции для каждого отсчета сигнала будем накапливать, и представлять в виде графика, синхронного с работой обнаружителя, т.е.

$$R_j = R_{j-1} + \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} - \frac{\text{cov}(X, Z)}{\sigma(X)\sigma(Z)} =$$

$$= R_{j-1} + \left[ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (Y_k - \bar{Y})^2}} - \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})(Z_k - \bar{Z})}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (X_k - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (Z_k - \bar{Z})^2}} \right] \quad (3)$$

где  $X$  – массив входного сигнала,  $Y$  – реализация инверсного прототипа,  $Z$  – реализация неинверсного прототипа.

Очевидно, что при статистически симметричных во времени сигналах, кривая временной зависимости  $R$  не будет сколько-нибудь значимо отклоняться ни в положительную, ни в отрицательную области, т. е. накопления не произойдет. В случае если асимметрия у сигнала есть, кривая будет монотонно смещаться вверх или вниз.

### Результаты и обсуждение.

Для контроля сначала исследуем белый нормально распределенный (гауссов) шум, который проходит через нашу систему фильтрации (файл `n_filt.wav`). В начале и в конце реализации заменим шум монохроматическим сигналом для наглядности и удобства оценки результатов (рисунок 6).

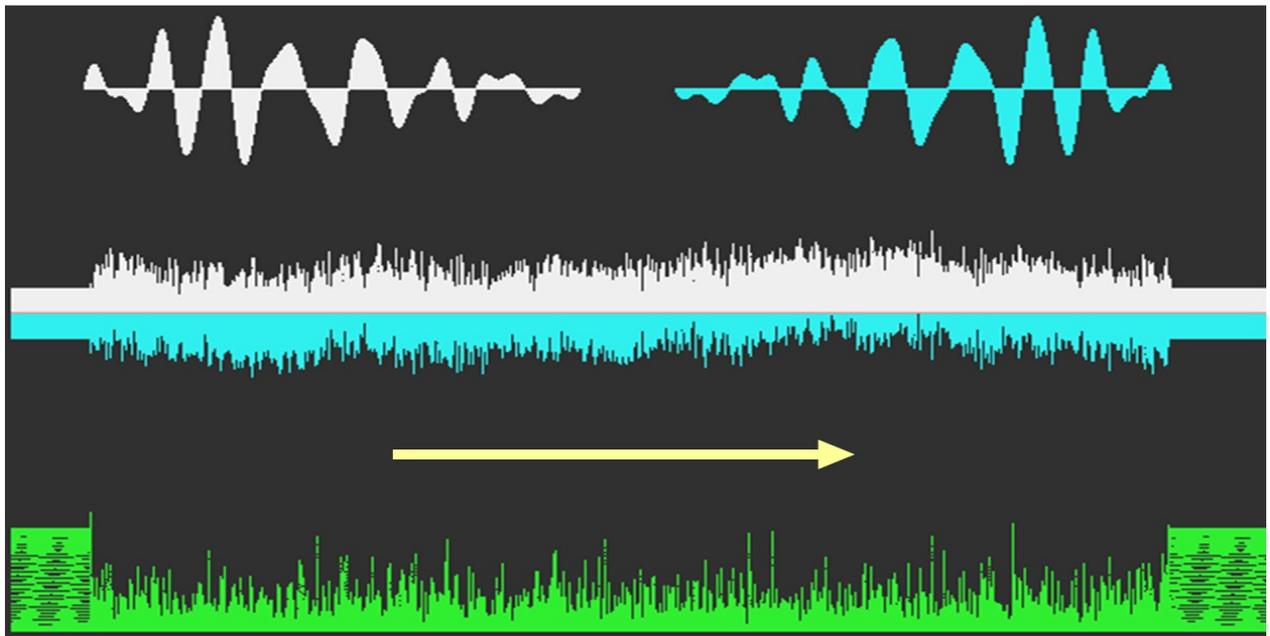


Рис. 6. Оценка асимметрии шумового сигнала. Вверху прототипы, с которыми свертывается сигнал: светло-серым показан инвертированный во времени «прямой» паттерн  $Y$ , голубым цветом обозначен неинвертированный «обратный»  $Z$ . Посередине показан график накопления разности  $R_j$  пирсоновских коэффициентов, т.е. значение асимметрии. Внизу показан временной ряд  $V_j$ . Желтой стрелкой показано направление оси времени.

Обратим внимание, что за время наблюдения (30 с) накопленная асимметрия отсутствует, несмотря на периодические небольшие отклонения в обе стороны. Такие же результаты наблюдались и для всех других шумов, немодулированных гармонических сигналов и любых комбинаций шум/сигнал

В поисках асимметричных процессов использовались и музыкальные произведения, т. к. разнообразие инструментов и мелодий, модуляции по частоте, амплитуде и тембру казалось бы, должны проявиться в асимметрии по шкале времени. Наиболее значительные колебания графика получаются при записях симфонического оркестра с хором, однако накопления асимметрии не происходит (рисунок 7):

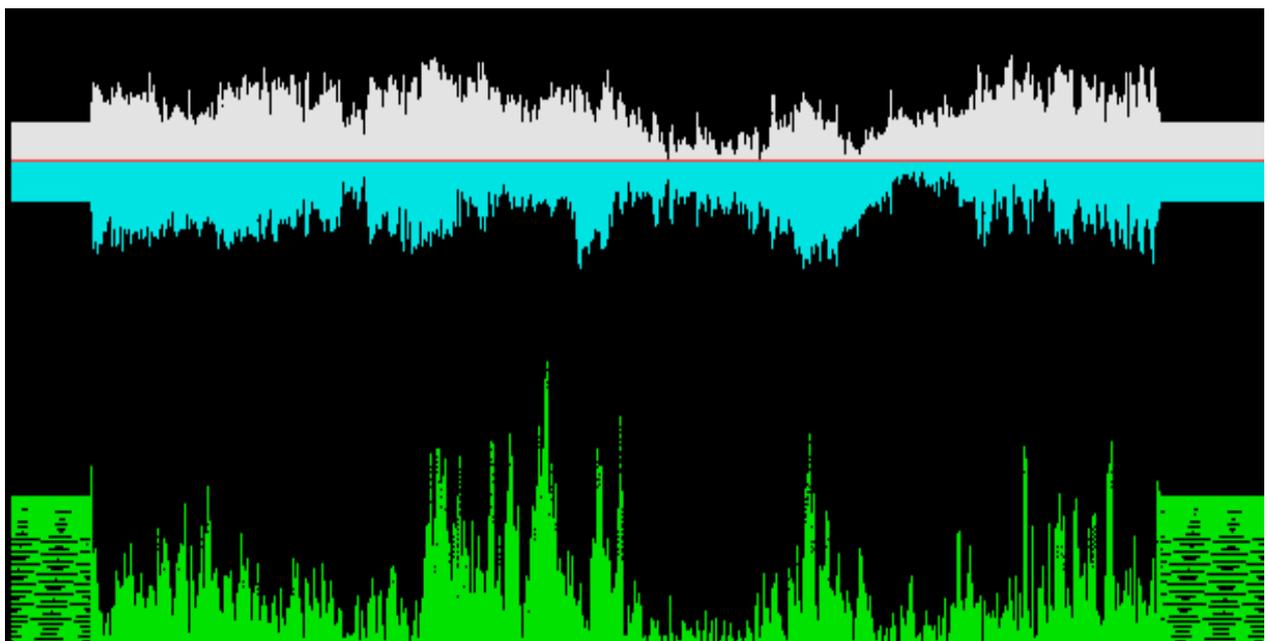


Рис. 7. Анализ музыкального сигнала. Исходный файл *music.wav*, файл после фильтрации *muz\_filt.wav*. Несмотря на колебания графика, накопленная асимметрия равна нулю.

Совершенно другие эффекты наблюдались при анализе реальных гравитационных сигналов. Для обсерватории Hanford смещение корреляционного графика уверенно фиксируется. Если увеличивать время наблюдения, асимметрия будет продолжать монотонно расти. Окрестности самой мощной гравитационной волны интересны какой-то аномалией, продолжающейся единицы секунд (длительность фрагмента записи 30 секунд: начало и конец фрагмента заменены на монохроматический сигнал).

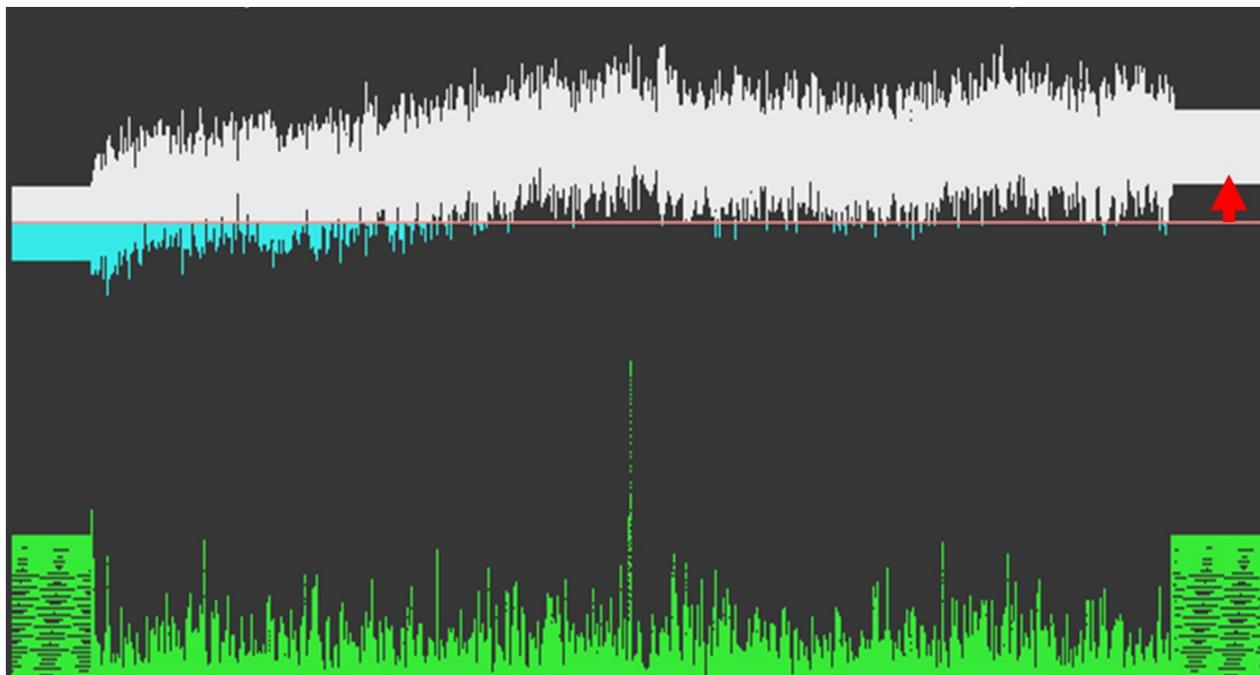


Рис. 8. Обсерватория Hanford. Обработка файла [H1\\_filt.wav](#) (исходный [H1.wav](#)). В отличие от шумовых сигналов накопленная асимметрия не равна нулю. Красной стрелкой показан подъем графика.

Для записей из обсерватории Livingstone асимметрия получается еще больше. К сожалению, обнаружитель (2) не фиксирует явных всплесков, что, вероятно, связано с прототипом, который выделен из записей Hanford – формы сигналов, видимо, несколько отличаются.

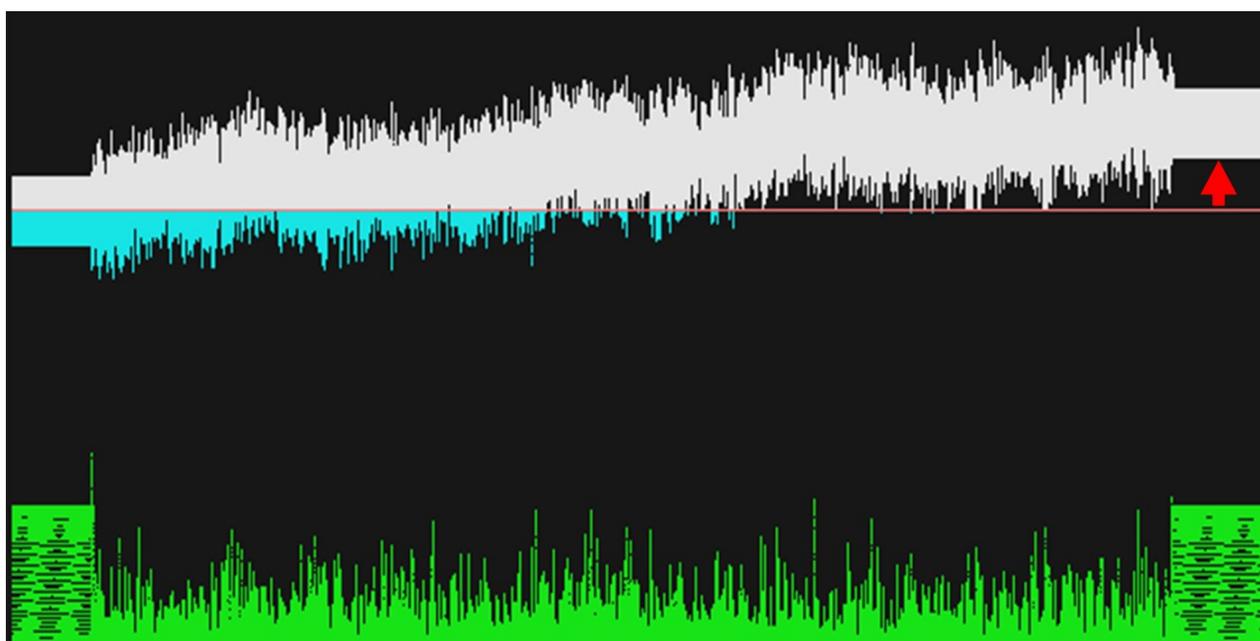
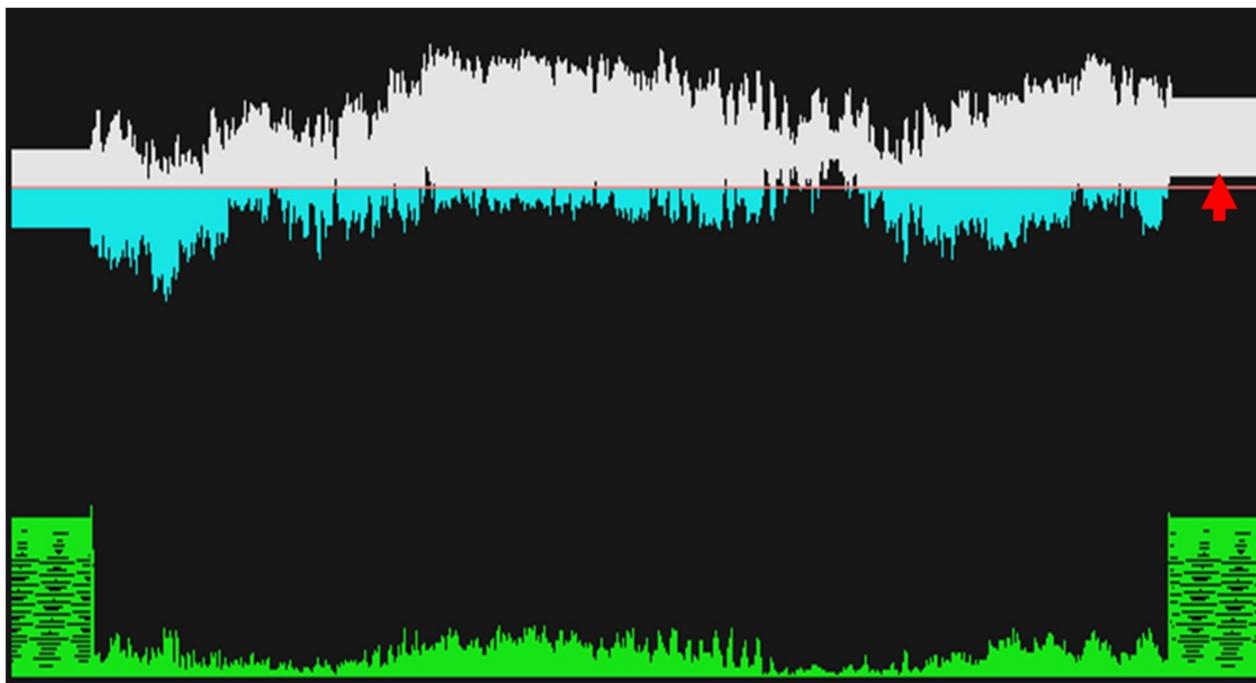


Рис. 9. Обсерватория Livingstone. Обработка файла [L1\\_filt.wav](#) (исходный файл [L-L1\\_GWOSC\\_16KHZ\\_R1-1185389792-32](#)). Асимметрия наблюдается явно.

Наихудшие, но, тем не менее, сопоставимые результаты получаются для записей Virgo. К сожалению, дрейфующий по частоте шум вентиляторов не удастся отфильтровать полностью (данные компенсационных каналов, предоставленные обсерваторией LIGO [14], в нашей работе не использовались, поскольку для события GW170729 они, к сожалению, отсутствуют).



*Рис. 10. Обсерватория Virgo. Файл V1\_filt.wav (исходный V-V1\_GWOSC\_16KHZ\_R1-1185389792-32). Вследствие неподдавленных аппаратных помех плохо работает обнаружитель. Асимметрия сигнала не вызывает сомнений, но она ниже, чем в предыдущих иллюстрациях.*

Следует заметить, что для записей LIGO накопленная асимметрия неодинакова: все регистрации сигналов после модернизации аппаратуры, т.е. снижения собственных шумов и улучшения соотношения сигнал/шум, дают более асимметричный сигнал (чего и следовало ожидать).

Итак, во всех записях гравитационного шума наблюдается асимметрия во времени, т. е. вклад компонентов гравитационных волн стабильно обнаруживается. Но это всего лишь качественная оценка. Для количественных оценок необходимо найти некоторый нетривиальный метод измерения.

Отделить аппаратные, сейсмические, тепловые, ньютоновские шумы от гравитационного шума невозможно в принципе. Базовое положение теории информации утверждает: «Если сигналы существуют одновременно, и их спектры перекрываются, то полное разделение сигналов невозможно».

В нашем случае остается единственный способ решения задачи: моделирование сигналов с известным аддитивным вкладом компонентов гравитационной волны в структуру гауссова шума.

Проведем измерение при заведомо высоком вкладе «гравитационного» компонента: добавим к шуму Гаусса фрагменты официально зарегистрированной гравитационной волны таким образом, чтобы соотношение сигнал/шум составляло 3:1, (при таком соотношении сигнал на фоне шума уже будет наблюдаться визуально).

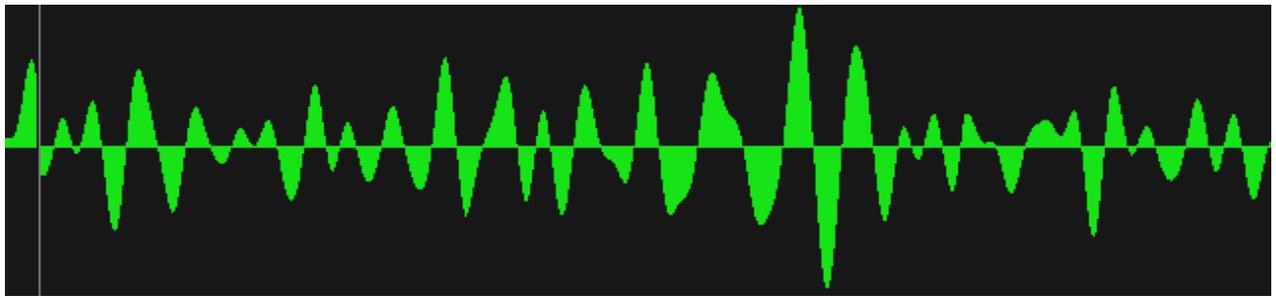


Рис. 11. Аддитивная смесь компонентов гравитационных волн и БГШ в соотношении 3:1. Как и ожидалось, характерные паттерны визуально обнаруживаются.

Оценим накопление асимметрии и будем контролировать работу обнаружителя.

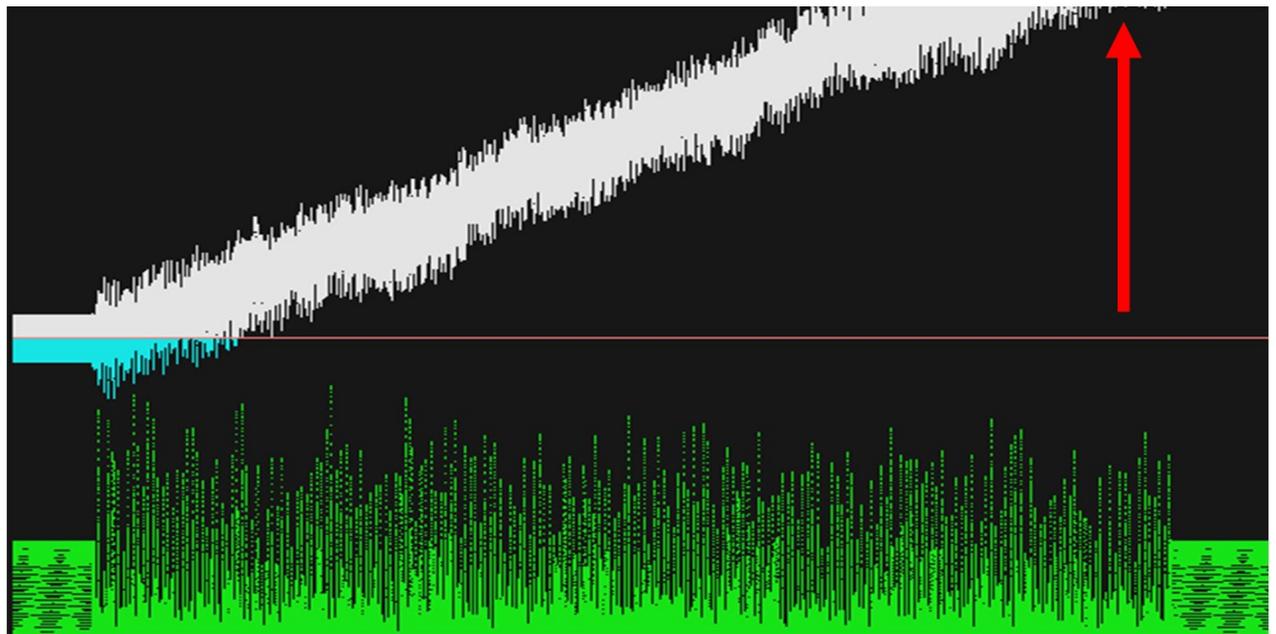


Рис. 12. Работа анализатора при значительном вкладе «гравитационного» компонента. Отношение сигнал/шум 3:1. Обнаруживается множество всплесков  $V_j$ . Асимметрия велика, накопленная разность пирсоновских коэффициентов стремительно растет.

Будем полагать, что измерительный инструмент предварительно проверен, и можно подбирать такое соотношение сигнал/шум, которое позволит выйти на значения подъема кривой как в случаях записей сигналов гравитационных детекторов.

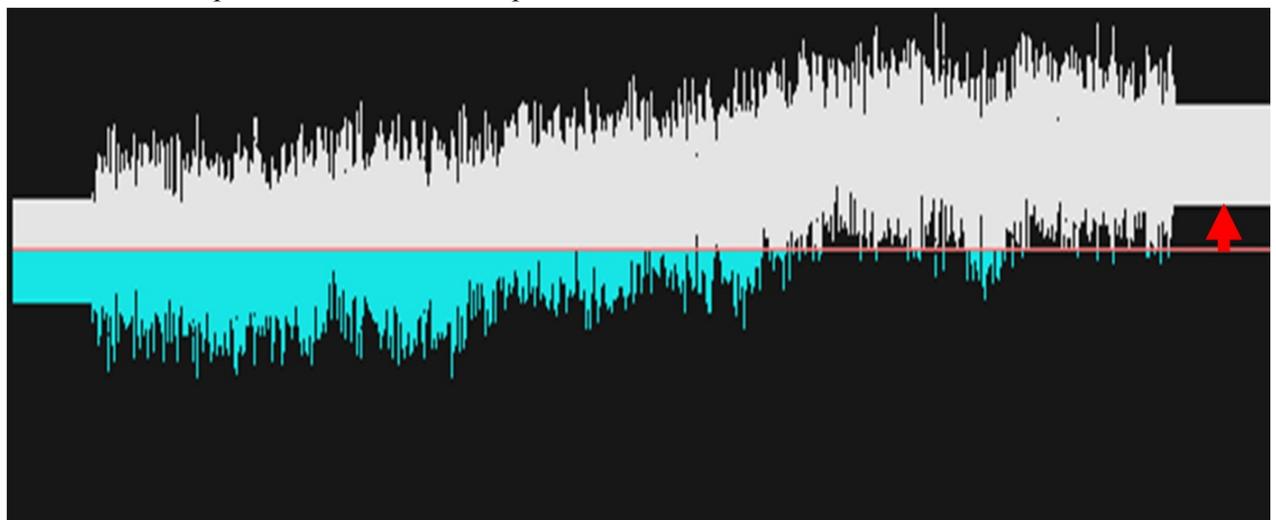


Рис. 13. Соотношение сигнал/шум – 1:2.. Полное соответствие среднему значению величины асимметрии для записей гравитационных детекторов. Оценка, разумеется, предварительная.

Здесь можно добавить, что частичное разделение компонентов шума возможно во временной области, т.е. сигнал корреляционным способом разделяется на два канала: асимметричного (левый канал) и симметричного (правый канал) шумов. Файл stereo2.wav при прослушивании дает представление о том, как отличаются чисто шумовые и «гравитационные» компоненты (мощные импульсы в левом канале на 15-й секунде соответствуют событию GW170729).

### Выводы

Итак, результаты косвенных измерений позволяют оценить, что гравитационный шум на выходе детекторов составляет приблизительно – 6 дБ, и это, вообще-то, неожиданно большая величина. Получается, что следует обратить внимание не только на редко наблюдающиеся высокоамплитудные гравитационные волны, а еще и на постоянный шум, существенная часть которого образована теми же процессами – слиянием массивных астрономических объектов. Само наличие асимметрии принимаемого детекторами сигнала означает, что все пространство заполнено гравитационным шумом субкилогерцового диапазона. И, следовательно, любые оптические и радиочастотные сигналы всегда и везде распространяются в гравитационно-шумовом поле.

Тогда входной сигнал любого радиотелескопа, направленного в любую точку пространства, будет включать в себя рябь, обусловленную гравитационным шумом и проявляющуюся в виде дифференциальной модуляции по азимуту и углу места в картинной плоскости наблюдателя (т. е. изменении эллипса рассеяния и/или поляризации).

Соответственно, на выходе квадратурного поляриметра со временем измерения менее 1 мсек и ограничением полосы пропускания на частотах ниже 70 Гц будет наблюдаться аддитивная смесь собственных шумов и компоненты гравитационного шума, которую теперь можно оценивать (хотя полностью разделить эти шумы по-прежнему невозможно). Вклад гравитационного шума может оказаться мал, но с увеличением реализации, т.е. времени регистрации, точность измерения будет расти. Тогда карты гравитационного шума неба могут быть получены при помощи имеющихся радиотелескопов. Кроме того, реликтовое излучение также должно иметь следы распространения в поле гравитационных шумов.

### Список использованных источников

1. <https://www.nature.com/articles/s42254-021-00303-8>
2. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118032428>
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Корреляция#Линейный\\_коэффициент\\_корреляции](https://ru.wikipedia.org/wiki/Корреляция#Линейный_коэффициент_корреляции)
4. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/835/1/51>
5. "Chirp" A New Radar Technique, January 1965 Electronics World
6. <http://journal.almaz-antey.ru/jour/article/view/160>
7. <https://nplus1.ru/news/2018/04/17/GW-noise>
8. [Optimal Search for an Astrophysical Gravitational-Wave Background](#)
9. [Peter Wilson. Digital Filters - Chapter 9, Newnes, 2016, pp 117-134](#)
10. <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-1-confident/GW170729/v2/>
11. <https://arxiv.org/abs/1811.12907>
12. [Окно Ханна](#)
13. [Euler Disk](#)
14. <https://www.gw-openscience.org/auxiliary/GW170814/>