

УДК 550.34.038.8

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Черепанцев А.С.

Южный федеральный университет, г. Таганрог, sb319a@mail.ru

Введение

Интерес к задаче регистрации высокочастотного сейсмического излучения в диапазоне частот десятков Герц имеет свою историю развития, в значительной степени определяемую эволюцией взглядов на природу наблюдаемого геофизического поля.

Начальный подход к высокочастотному излучению основывается на представлении его чисто шумовым процессом, то есть случайным гауссовским полем, не связанным с состоянием среды излучения [15]. Сейсмический шум традиционно рассматривали как помеху при исследовании землетрясений, в работах по глубинному сейсмическому зондированию. При этом основными источниками подобного рода помех считали различного рода распределенные экзогенные источники, действующие в приповерхностном слое. Изучение спектральных закономерностей высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) установило факт спада амплитудных спектров в диапазоне 10-100 Гц, близкий квадратичному и достижения в наиболее тихих местах наблюдения смещений 10^{-11} - 10^{-12} м [12]. Регистрация таких слабых сигнала была недостижима для инструментов классической сейсмологии. Отсутствие интереса и соответственно инструментальной базы объяснялось, прежде всего, концепцией неинформативности ВСШ.

Однако в середине 70-х годов прошлого века возникла новая концепция ВСШ как поля, содержащего в себе компоненты, чувствительные к напряженному состоянию геофизической среды.

В работе [1] на основе анализа особенностей амплитудных спектров Р-волн удаленных землетрясений в области высоких частот ($f > 5$ Гц) сделан вывод об аномальном повышении интенсивности высокочастотной составляющей в спектрах Р-волн от удаленных землетрясений. Авторами делается предположение об активизации местных источников высокочастотного сейсмического излучения (ВСИ), чувствительных к внешним воздействиям.

Также в работе [3] показано, что в определенные моменты времени, после отдельных сильных землетрясений с магнитудой $M=7$, уровень ВСИ возмущался некоторым периодическим процессом. Оценка периодов этого процесса выявила хорошее совпадение с периодами некоторых форм и мод собственных колебаний Земли.

Большое количество публикаций [4] касается возможной связи вариаций излучения с приливными лунно-солнечными воздействиями. На основе спектрального и корреляционного анализа временных рядов, полученных при регистрации огибающей амплитуды высокочастотных сейсмических колебаний в узкой полосе частот сделан вывод о непротиворечивости результатов гипотезе о связи уровня ВСИ и деформирующих процессов, обусловленных воздействием суточной и полусуточной гармоник гравитационного прилива. При этом наряду с периодами, когда амплитудно-модуляционная связь наблюдалась, существуют временные интервалы, когда подобного рода связь незначима.

Непротиворечивость триггерного механизма связи внешних деформирующих процессов с модуляционным откликом ВСИ четко показана в работе [2]. Но примере приливного воздействия были сравнены удельные мощности диссипации приливного воздействия с удельной мощностью источников ВСИ по обобщенным спектральным закономерностям. Полученная значимая разница в 5-7 порядков превышения мощности ВСИ по сравнению с мощностью диссипации обосновало выработку нового взгляда на общий процесс высокочастотного «шумообразования».

Для выделения информативной компоненты ВСИ было предложено использовать системы с повышенной чувствительностью в области высоких частот. Сейсмометр, представляющий механический резонатор с высокой добротностью, позволяет повысить примерно на два порядка (в Q раз, где Q - величина механической добротности). Достижимое при этом временное сжатие информации, определяемое характерным временем резонансной системы τ порядка нескольких секунд, не сказывается на возможностях решения задач выделения модуляционных длиннопериодных эффектов в ВСИ. [5, 8].

Дальнейшим шагом в развитии исследований ВСИ как информативного геофизического поля явился переход к системным исследованиям, включающих постановку режимных долговременных наблюдений [6]. Мониторинг ВСИ на Камчатке позволил выявить вариации параметров контролируемой системы. Проведенный анализ данных изменений позволил предложить способ контроля напряженного состояния среды по изменению параметров высокочастотного отклика на приливное воздействие. В качестве информационного параметра рассмотрен фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между приливной волной O_1 в гравитационном потенциале и периодической компонентой в огибающей ВСИ. Выделенный эффект стабилизации фазы приливной компоненты ВСИ при подготовке сильного землетрясения дал возможность разработать новый метод прогноза сильных землетрясений [7].

Этап перехода к режимным наблюдениям ВСИ и анализ вариаций параметров взаимодействия с внешними воздействующими процессами поставил задачу анализа наблюдаемого поля не только в узкополосной проекции, а регистрацию широкополосного сигнала в высокочастотном диапазоне и соответственно получение более полной информации о наблюдаемом объекте. Для решения этой задачи предложен акселерометр, использующий сложную моду изгиба упругой биморфной пьезокерамической пластины [9]. Вместо традиционно используемой модели заделанной пластины с инерционной массой на свободном конце в конструкции резонансного сейсмометра рассмотрена S-мода изгиба пластины. Такая форма изгиба позволяет увеличить чувствительность преобразователя в "дорезонансном" диапазоне частот путем увеличения рабочей области деформаций пьезокерамического преобразователя и использования не одиночного, а набора изгибных преобразователей. Преимуществом использования широкополосной системы регистрации стала возможность выделения частот с наибольшим соотношением сигнал/шум. Использование набора частот позволило существенно уменьшить погрешность получаемых оценок.

В настоящее время внимание к наблюдению сейсмического излучения в диапазоне 2-20 Герц связано с недавним открытием невулканического дрожания в различных сейсмоактивных регионах Земли [14]. Невулканическое дрожание определяется как длительные высокочастотные волновые цуги, в которых, как правило, отсутствуют четко выраженные вступления Р и S волн. Было показано, что они составлены из роев низкочастотных землетрясений. Как показано в работе [13] дрожание возникает, значительно ниже сейсмогенной зона у основания коры. Полунепрерывная активность и низкие амплитуды препятствуют выявлению Р- и S-волн, поэтому повторяющаяся активность из того же самого участка разлома может быть эффективно идентифицирована с использованием взаимной корреляции в многоканальном согласованном фильтре [11]. Невулканическое дрожание коррелирует в пространстве и времени с обнаруженными эпизодами медленного скольжения границ плиты в зоне субдукции разломных дуг. Такие медленные землетрясения интерпретированы как эпизодическое разблокирование и медленное упругое скольжение поверхности разлома с сопутствующим поверхностным движением. При этом подземное дрожание может иметь источником либо прямое выделение жидкости при дегидрации плиты, вызывающей каскадные разрывы на небольших неоднородностях [14], либо сдвиговое проскальзывание на поверхности раздела, обусловленное высоким поровым давлением жидкости.

Модуляция дрожания солнечно-лунными приливными колебаниями наблюдались в Японии, на Северо-Западе Северной Америки, вдоль сегментов Сан-Андреас. Это предполагает, что напряжения необходимые для генерации дрожания гораздо меньше, чем напряжения, связанные с возникновением землетрясения. При этом состояние участвующих в генерации дрожания разломов очень близко к критическому состоянию. Было также отмечено, что невулканическое дрожание были вызваны прохождением сейсмических волн от отдаленных землетрясений [17]. Важным направлением исследований в области невулканического дрожания является его связь с сейсмической опасностью. На основе статистических оценок, показано, что сейсмическая опасность во время невулканического дрожания оказывается выше, чем в периоды состояния покоя [16].

Использование корреляционного анализа при локации пространственного расположения источника невулканического дрожания по данным сети станций наблюдения повышает требования к качеству метрологического обеспечения, включая контроль амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик приемника ВСИ. Данная работа посвящена анализу возможности проведения внутренней калибровки характеристик высокочастотного широкополосного акселерометра без использования дополнительных систем калибровки.

Принципы построения и метрологическое обеспечение акселерометра на основе S-изгиба биморфных преобразователей

Акселерометр выполнен на основе часто применяемой при построении низкочастотных вибродатчиков схемы изгиба нагруженной биморфной пьезокерамической тонкой пластины. В отличие от обычно применяемой модели одиночной пластины с закрепленным одним концом и свободным другим концом, нагруженной инерционной массой, в рассматриваемом акселерометре использована более сложная форма изгиба пластины S-типа [10]. Преимуществом использования такой формы изгиба является увеличение поверхности деформаций при изгибе и соответственно увеличение чувствительности прибора, возможность построения упругого элемента, состоящего из группы пластин, совершающих строго одноосное перемещение. Повышение чувствительности в этом случае достигается суммированием чувствительности отдельных биморфных элементов.

С целью минимизации чувствительности к вращательному и поперечным движениям в акселерометре использована механическая дифференциальная система подвеса инерционной массы на биморфных пружинах. При S-образном изгибе биморфной пластины происходит симметричное сжатие и растяжение частей пластины. Соответственно образуются поверхностные заряды противоположных знаков. Это дает возможность путем соответствующей коммутации электродов осуществить дифференциальное электрическое включение преобразователя. Таким образом, достигается дифференциальный режим как в механической части акселерометра, так и в его электрической части.

Оценку характеристик приемника механических колебаний с нагруженной биморфной пружиной можно получить, рассмотрев эквивалентную механоэлектрическую схему колебательного контура- рис.1. Пружина представляет собой две дифференциально включенные биморфные пружины, с одинаковыми параметрами, имеющими равный по величине и противоположный по знаку коэффициент электромеханической трансформации N .

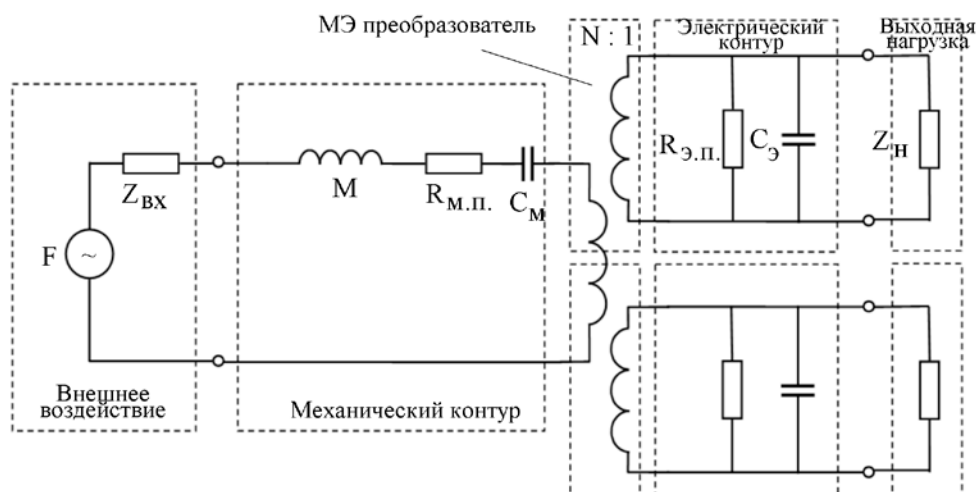


Рис.1. Эквивалентная схема механоэлектрического преобразователя

Передаточная характеристика и соответственно отклика на ускорение колебаний поверхности отдельной биморфной пластины при $|Z_H \omega C_3| \gg 1$ и $|R_{эп} \omega C_3| \gg 1$ определяется выражением:

$$H(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{\xi} = \frac{2M \cdot N}{N^2 + MC_3(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega \frac{\omega_0 MC_3}{Q}}, \quad (1)$$

где: $\omega_0 = 1/\sqrt{MC_M}$, $Q = \omega_0 M / R_{МП}$.

В соотношении (1) M представляет собой сумму масс груза и эквивалентной массы упругих пружин, а C_M - эквивалентная гибкость пружин.

Электрическая коммутация между биморфными пластинами, входящими в упругую пружину может быть выполнена различными способами и определяется решаемой задачей.

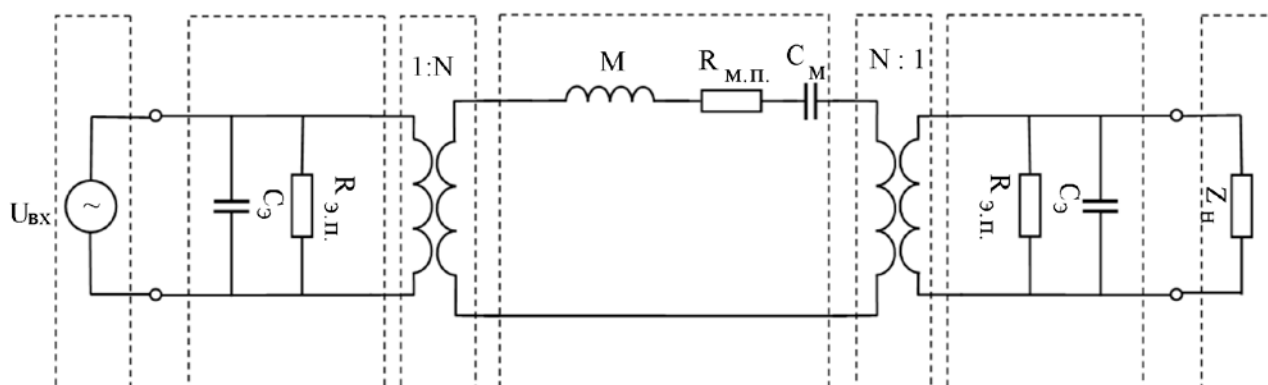


Рис.2. Эквивалентная схема электромеханоэлектрического преобразователя

В разработанном макете акселерометра реализован дифференциальный упругий подвес на биморфных пружинах, состоящий из трех верхних и трех нижних пружин, с точками крепления к инерционной массе расположенными в углах равностороннего треугольника. Такой повес позволяет минимизировать влияние паразитных степеней свободы поступательного и вращательного движений. Регистрируемое движение определяется направлением изгибных колебаний пружин.

При коммутации пружин с дифференциальным выходом появляется возможность оценки чувствительности системы. Для этого используется обратный пьезоэффект, когда верхняя или нижняя группа пружин работает в режиме двигателя, а другая группа - в режиме генератора. Эквивалентная схема такого режима работы представлена на рис. 2.

Для упрощения оценки будем предполагать, что биморфные пружины имеют одинаковые электрические и механические параметры. Исходными данными являются значения напряжения на стороне генератора при подаче напряжения заданной величины и частоты на стороне двигателя $U_r = \Phi(U_d)$.

После приведения механоэлектрической части схемы (рис.2) к электрической стороне:

$$U_r = \frac{Z_э}{Z_{Мэ} + Z_э} \cdot \frac{M \ddot{\xi}}{N} = \frac{Z_э}{Z_{Мэ} + Z_э} \cdot U_d,$$

где: $Z_э$, $Z_{Мэ}$ - электрическое и эквивалентное механическое сопротивления.

Для использования соотношения (1) при оценке чувствительности необходимо оценить величину коэффициента трансформации N . Она может быть выражена из отношения измеренных величин $\delta = U_r/U_d$:

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{1}{N^2} \frac{Z_M}{Z_э}}. \quad (2)$$

Тогда при условии $|R_{эп} \omega C_э| \gg 1$:

$$N^2 = \frac{\delta}{1-\delta} M \left(C_э (\omega_0^2 - \omega^2) + j \omega \omega_0 \frac{C_э}{Q} \right). \quad (3)$$

Оценку величины коэффициента трансформации N (3) удобно получить на резонансной частоте $\omega = \omega_0$ по измеренному значению δ_p :

$$|N| = \omega_0 \sqrt{\frac{\delta_p}{1-\delta_p} \frac{M \cdot C_э}{Q}}. \quad (4)$$

Данное соотношение выражается через измеряемые величины $\delta(\omega_0)$, ω_0 , Q , а также известные параметры системы M , $C_э$. С учетом (1), (4) оценка амплитудно-частотной характеристики акселерометра:

$$|H(\omega)| = 2\omega_0 \sqrt{\frac{\delta_p (1-\delta_p)}{C_э Q}} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega \omega_0}{Q}\right)^2}} \quad (5)$$

Соотношение (5) содержит известные параметры акселерометра- электрическую емкость биморфной пружины C_3 , механическую добротность Q , резонансную частоту ω_0 , а также измеренное значение отношения напряжений на резонансной частоте $\delta(\omega_0) = U_r/U_d$. Все измеряемые параметры могут быть получены на основе перекоммутации одного из плеч дифференциально включенных биморфных пружин из режима генератора в режим двигателя.

Фазовая характеристика также может быть экспериментально оценена в режиме работы электромеханоэлектрического преобразователя (рис.2). Для этого необходимо дополнительно измерить фазовый сдвиг между входным U_d и выходным U_r сигналами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00185-а.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Рыкунов Л.Н. Спектры Р-волн от удаленных землетрясений в области частот 1-10 Гц // Изв. АН СССР. сер. Физ. Земли. 1976. №7. С. 90–92.
2. Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б. Общие особенности сейсмической эмиссии на различных временных масштабах // Изв. АН СССР. сер. Физ. Земли. 1985. №6. С. 83–87.
3. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. сер. Физ. Земли. 1979. №11, С. 72–77.
4. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В. В. Модуляция высокочастотных микросейсм // ДАН СССР. 1978. Т. 283. № 2. С. 303–305.
5. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Аппаратура и методы исследования слабых сейсмических эффектов // М.: Деп. ВИНТИ. 1978. № 2919-78. 48 с.
6. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл.РАН. 1995. Т.341. №3. С. 406–407.
7. Салтыков В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.
8. Смирнов В.Б., Черепанцев А.С., Сергеев В.В. Аппаратурно-методические аспекты регистрации высокочастотного шума // Вулканология - сейсмология. 1990. №2. С. 88–100.
9. Черепанцев А.С. Аппаратурно-методические особенности регистрации сверхмалых сейсмических сигналов в широкой полосе частот // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2014. №1. С.50–577.
10. Черепанцев А.С., Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воронаев П.В. Широкополосная регистрация высокочастотных сейсмических шумов в целях исследования приливных эффектов // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 1. С. 29–43
11. Gibbons, S. J. & Ringdal, F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // Geophys. J. Int. 2006. V. 165. P.149–166.
12. Li M. C., Ferguson I. F., Herrin E., etc High- frequency seismic noise at Lajitas Texas // Bull. Seism. Soc. of America. 1984. V. 74. No. 5. P. 2015–2033.
13. Nadeau, R. M., Dolenc, D. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas fault // Science. 2005. V. 307. P. 389.
14. Obara, K. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan // Science. 2002. V. 296. No. 14. P.1679–1681.
15. Rodgers P.W., etc. System and site noise in the regional seismic test network from 0.1 to 20 Hz //Bull. Seism. Soc. of America. 1987. V. 77. №2. P. 663–678.
16. Rogers, G., Dragert H. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip // Science. 2003. V. 300. P.1942–1943.
17. Rubinstein, J. L., Vidale J.E. Non-volcanic tremor driven by large transient shear stresses // Nature 2007. 448(7153). P. 579–582.