

УДК 621.391.832.4

*В. М. Агафонов^{1,2}, К. А. Афанасьев¹, А. В. Яшкин¹*¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²ОАО «НПП «Квант»

Определение направления на движущийся объект с использованием сейсмического модуля, содержащего молекулярно-электронные датчики движения

Разработан прототип сейсмического модуля системы безопасности, представляющий собой прибор, содержащий датчик линейных движений и, что является его характерной особенностью, два датчика вращательных движений. Проведена регистрация сейсмических сигналов. Основное внимание уделяется проблеме обнаружения направления на источник сейсмического сигнала. Приведены основные предпосылки и закономерности, на которых основывается анализ полученных сигналов. В результате обработанных данных построена траектория движения экспериментатора. На основании полученных результатов сделаны выводы о возможности создания качественно новых сейсмических систем безопасности и контроля территории на базе молекулярно-электронных датчиков движения.

Ключевые слова: измерительные приборы, сейсмические сенсоры, локация, рэлеевская волна, цифровая обработка сигналов, амплитудно-частотная характеристика.

1. Введение

Задача высокоточного определения положения источника сейсмического сигнала в пространстве является актуальной в области охраны территории от несанкционированного проникновения. В частности, важной задачей остается проблема точного определения направления на «нарушителя».

До последнего времени комплексы охраны отдельного объекта или территории, основанные на сейсмических принципах, использовали в качестве источника первичных данных выходной сигнал вертикального сейсмодатчика. Для определения координат «нарушителя» в этом случае размещают несколько таких датчиков на территории охраняемого объекта. При этом датчики располагаются определённым образом, например в углах прямоугольника, по линии или зигзагом [1]. Алгоритмы определения сектора расположения источника сигнала, как правило, основываются на вычислении разницы времени прихода сейсмической волны на датчики. Для более точного измерения азимутального положения источника приходится увеличивать частоту дискретизации при анализе, что приводит к увеличению энергопотребления и снижению эффективности охранного комплекса в целом [2].

В данной работе показана возможность применения молекулярно-электронных датчиков вращательных движений и линейного вертикального датчика в составе сейсмического модуля системы безопасности. Предложен принципиально отличный от существующих подход в измерении направления на «нарушителя». Отличительной особенностью данного подхода является использование одного многокомпонентного сейсмического модуля, вследствие чего нет необходимости разносить территориально несколько модулей. Определение направления в данном подходе основывается не на измерении разности времен прихода волны на разнесённые датчики, а на сопоставлении амплитуд и фаз сигналов на разных компонентах одного модуля. В таком подходе нет необходимости увеличивать частоту дискретизации сигнала при обработке, и в результате энергопотребление такой системы, а следовательно, и автономность её работы могут оказаться ниже. Кроме того, использование автономных одиночных модулей может оказаться более маскируемым решением, что также является важным фактором в подобных системах.

2. Прибор для определения направления на источник сейсмического сигнала на основе молекулярно-электронной технологии

Для решения поставленной задачи определения направления на источник сейсмического сигнала был разработан макет-прототип сейсмического модуля охранного комплекса быстрого развертывания. Качественной новизной модуля является наличие в его составе высокочувствительных малогабаритных сейсмических датчиков угловых движений, основанных на принципах молекулярно-электронного переноса.

Отличительная особенность датчиков данного типа состоит в практически полной нечувствительности к трансляционным движениям при одновременной возможности регистрировать крайне слабые угловые движения вокруг горизонтальных осей (динамические наклоны), сопровождающие распространение сейсмической волны, создаваемой нарушителем. Принципиально, что датчики данного типа позволяют более точно идентифицировать моменты прихода волн разных типов (продольная волна не содержит угловых движений, в отличие, например, от поперечной или поверхностной рэлеевской [3]).

В состав разработанного прототипа входит выносной сейсмический модуль, изготовленный в пылевлагозащитном исполнении, содержащий три датчика (два ортогонально ориентированных датчика угловых движений и один датчик линейных движений, оси чувствительности датчиков угловых движений образуют плоскость, параллельную плоскости земли, ось чувствительности линейного датчика перпендикулярна плоскости земли) (рис. 1).

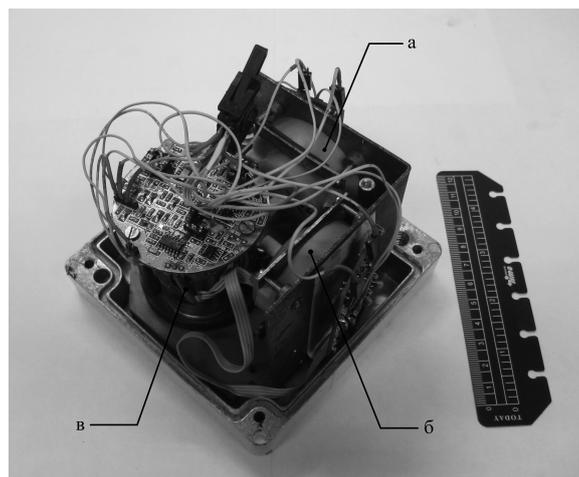


Рис. 1. Выносной сейсмический модуль: а) датчик вращательных движений № 1, б) датчик вращательных движений № 2, в) линейный вертикальный датчик

Важнейшим отличием молекулярно-электронных датчиков от инерционных измерителей параметров движения других типов (магнитно-индуктивный, емкостный, MEMS-технологии и т.д.) является то, что в нем роль инерционной массы играет жидкость — раствор электролита, протекающий через преобразователь. Именно применение жидкостной инерционной массы вместе с соответствующим образом выбранными параметрами преобразующего элемента (электродного узла) определяют высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов приборов такого типа в области низких и сверхнизких частот.

3. Устройство, принцип действия и технические характеристики молекулярно-электронного углового датчика

На рис. 2 показан датчик вращательных движений, который использовался в проведенных экспериментах. В общем случае он представляет собой сетку электродов, погруженную в электролит. Корпус датчика изготавливается из керамики. Заполнение датчика происходит под действием внешнего давления путём предварительной откачки воздуха до вакуума.

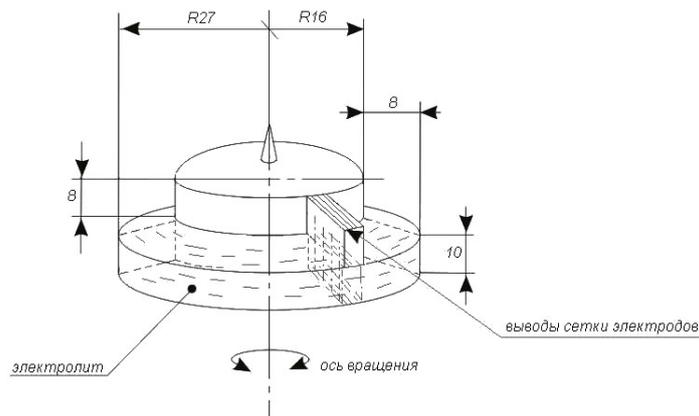
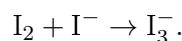


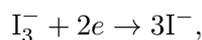
Рис. 2. Схема молекулярно-электронного датчика вращательных движений

Как и было упомянуто выше, в качестве инерционной массы в молекулярно-электронном датчике служит раствор электролита. При этом могут быть использованы различные окислительно-восстановительные реакции, например: йод-йодид, ферро-феррицианид и др. Сами электроды чаще всего изготавливаются из металла, который не участвует в обмене ионами, а осуществляет только электронный обмен. В настоящее время наиболее широкое применение получили йод-йодидные системы с платиновыми электродами. Электролит такой системы состоит из водного раствора йодида калия KI и йода I_2 . В избытке йодида йод переходит в хорошо растворимое комплексное соединение — трийодид — по следующей схеме:

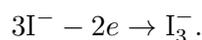


При прохождении тока через такую систему на электродах происходят следующие электрохимические реакции:

восстановление йода на катоде:



окисление йода на аноде:



При этом ионы калия играют роль фонового электролита и не принимают участия в реакциях.

Перенос заряда в жидкости можно разделить на три независимых механизма [4]: миграция, диффузия и конвекция, каждый из них в определенных физико-химических процессах играет главную роль.

Обычно в водных растворах электролитов молекулы растворенного вещества диссоциированы на ионы. При наложении внешнего электрического поля положительные ионы движутся по направлению силовых линий электрического поля (отрицательные ионы движутся в обратном направлении). Такой механизм движения называется *миграцией* или *дрейфом* ионов во внешнем электрическом поле с напряженностью E . При этом скорость движения ионов определяется их подвижностью: $V = \mu E$, что соответствует плотности электрического тока $j = ne\mu E$, где μ — подвижность, e — заряд ионов, n — их концентрация.

Избыток же фонового электролита уменьшает роль миграционного механизма в переносе заряда. Для систем с большим избытком фонового электролита основными механизмами движения ионов являются диффузия и конвекция. Диффузия ионов возникает благодаря их непрерывному восстановлению и окислению на электродах, что поддерживает постоянный градиент концентрации раствора.

Если жидкость в канале приходит в движение под действием каких-либо внешних сил, то наряду с диффузионным появляется также конвективный ток, обусловленный увлечением ионов движущейся жидкости. В линейном приближении конвективный ток пропорционален скорости движущейся жидкости V и определяется соотношением

$$I_k = eSnV,$$

где S — активная площадь электрода при окислительно-восстановительной реакции.

Конвективная диффузия может быть вызвана как действием на систему разности давлений, так и гравитационным полем. В последнем случае она называется *естественной конвекцией*. Ее появление обусловлено тем, что увеличение концентрации ионов у анода приводит к локальному изменению плотности раствора, что во внешнем гравитационном поле или поле центробежных сил может привести к возникновению естественного конвективного движения. Уравнение конвективной диффузии является исходным для описания работы молекулярно-электронного преобразователя.

4. Описание эксперимента

На рис. 3 показана условная схема проделанного эксперимента. Экспериментатор совершает обход вокруг выносного модуля, содержащего два датчика крутильных колебаний и один вертикальный датчик. В начале движения (от пункта сбора данных) и каждый раз в точке 1 на прибор подается контрольный сигнал. Продолжительность эксперимента составила 72,3 с. Продолжительность эксперимента определяется по контрольным сигналам. Выносной модуль установлен таким образом, что оси чувствительности датчиков крутильных колебаний образуют плоскость, параллельную плоскости земли, а ось чувствительности вертикального датчика перпендикулярна плоскости земли.



Рис. 3. Условная схема эксперимента. Вид сверху

Оси чувствительности датчиков угловых ускорений направлены вдоль вектора $\vec{\omega}$. Датчики угловых движений были откалиброваны на полосу частот от 0,01 до 60 Гц с коэффициентом усиления в полосе пропускания порядка 5 дБ относительно уровня в $50 \frac{\text{В}}{\text{рад/с}}$ (датчик калибровался в единицах скорости). При этом неравномерность полосы пропускания составляет ± 1 дБ. АЧХ вращательных датчиков максимально совпадают. Информация с датчика считывается 24-битным АЦП. Диапазон входного напряжения, используемого АЦП, составлял примерно ± 9 В. Частота дискретизации каждого канала 1000 Гц.

5. Анализ и обработка данных

В ходе эксперимента получены три серии данных — записи сигналов с крутильных и вертикального датчиков. Характерной чертой сигналов является наличие всплесковых им-

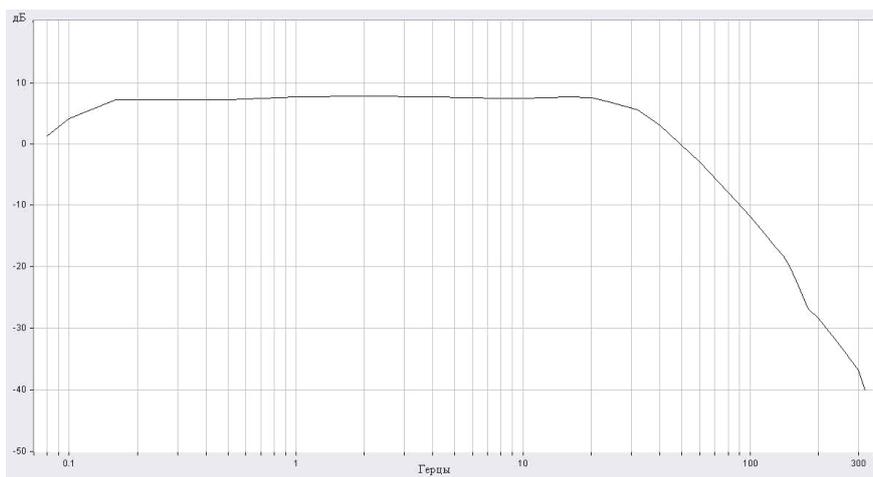


Рис. 4. АЧХ датчика

пульсов. Всплески интерпретируются как шаги человека. Поскольку все три датчика вмонтированы в один корпус, то на каждое возмущение они реагируют одновременно с незначительным расхождением по времени. Вследствие этого мы имеем возможность сравнивать между собой реакцию датчиков на возмущение, в зависимости от положения источника возмущения относительно прибора.

Важной особенностью датчиков, работающих на принципах молекулярной электроники, при использовании в системах сейсмолокации является возможность регистрировать изменение фазы и амплитуды анализируемых сигналов в зависимости от положения сейсмоисточника.

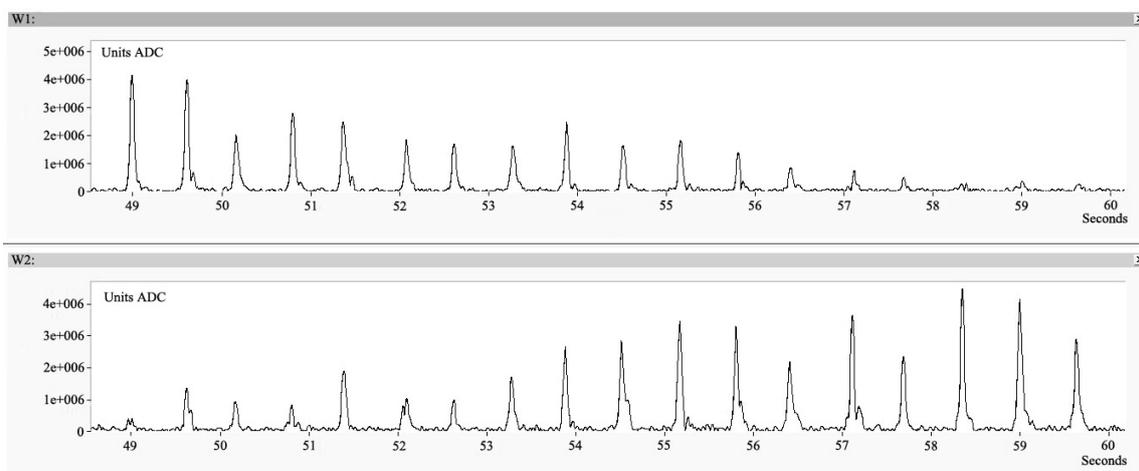


Рис. 5. Изменение модуля аналитического сигнала датчиков вращательного движения по мере движения экспериментатора. Для одного датчика модуль сигнала уменьшается (верхний график), а для другого увеличивается (нижний график)

Для иллюстрации способности датчиков регистрировать изменение амплитуды возьмем данные записи крутильных датчиков и построим модуль аналитического сигнала [5] (комплексный сигнал, действительная часть которого есть сам сигнал, а мнимая — преобразование Гильберта (ПГ) исходного сигнала). На рис. 5 видно, как меняется модуль аналитического сигнала в зависимости от положения источника сигнала. Для одного крутильного датчика модуль увеличивается, а для другого уменьшается по мере движения экспериментатора.

Для иллюстрации способности датчиков регистрировать изменение разности фаз проанализируем записи сигналов с вертикального и одного из крутильных датчиков. Выберем

два всплеска (шага) таких, что один записан в произвольной точке траектории экспериментатора, а другой записан в точке, симметрично отображенной относительно прибора. Наложим сигнал крутильного датчика (пунктирная линия) на сигнал вертикального датчика (сплошная линия). На рис. 6 хорошо видно изменение разности фаз сигналов крутильного и вертикального датчиков в двух диаметрально противоположных точках траектории.

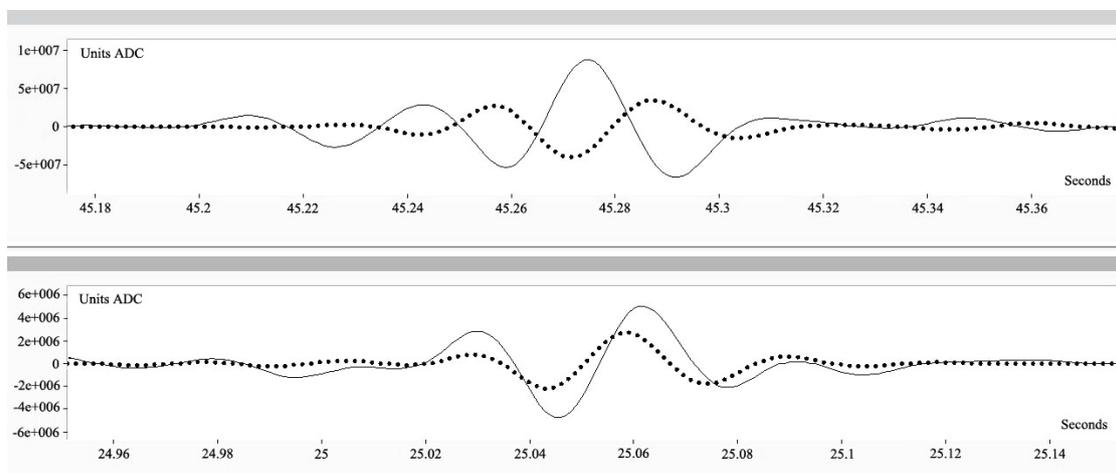


Рис. 6. Сравнение записей сигналов углового (пунктирная линия) и вертикального (сплошная линия) датчиков в моменты времени (нижний и верхний графики), когда источник находится в диаметрально противоположных точках траектории

Способность датчиков регистрировать изменение амплитуды и разности фаз положена в основу алгоритма по определению положения источника сейсмического сигнала, результат работы которого показан на рис. 7.

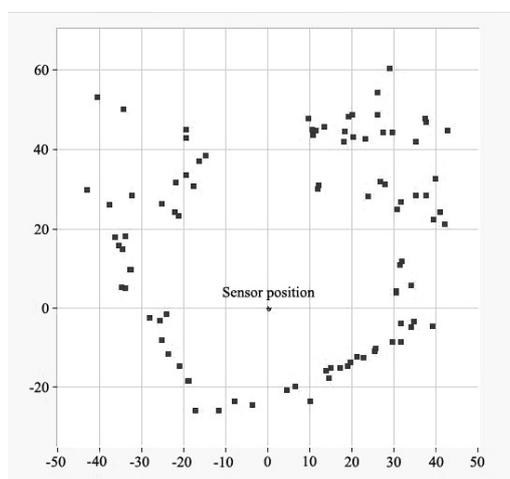


Рис. 7. Траектория движения нарушителя, построенная по сейсмическим данным, полученным с использованием датчиков угловых колебаний

6. Вывод

В данной работе были произведены измерения и последующий анализ записей сигналов от макета-прототипа системы безопасности, содержащего трёхкомпонентный прибор (два датчика крутильных колебаний и один датчик линейных колебаний). В рамках работы был проведён эксперимент, в котором «нарушитель» передвигался по кругу вокруг прибора. Запись сигналов осуществлялась внешним многоканальным АЦП, построенным на базе микросхемы 24-битного сигма-дельта АЦП фирмы Analog Devices.

По результатам эксперимента в работе были проанализированы записи сигналов, представляющие собой три серии данных — две записи с крутильных и одна запись с вертикального датчика. Особенностью каждой серии было наличие всплесковых импульсов, характерных для сигналов от шагов «нарушителя». Сравнение всплесков с крутильных датчиков показало зависимость амплитуды всплесков от азимута на источник сигнала. Таким образом, применяя два датчика вращения, оси чувствительности которых перпендикулярны, мы можем измерять угол на источник в пределах одной четверти. Кроме того, сравнение сигнала от шага «нарушителя» на вертикальном датчике с сигналами от того же шага «нарушителя» на крутильных датчиках показало, что для каждого всплеска сигнала с вертикального датчика характерно либо совпадение по фазе с всплеском сигнала крутильного датчика, либо запаздывание или опережение по фазе в зависимости от четверти расположения «нарушителя». В случае наложения всплеска крутильного датчика на всплеск вертикального шагу «возвращали» знак плюс «+», в случае опережения или запаздывания «возвращался» знак минус «-». Поскольку датчиков крутильных колебаний два, то каждому шагу соответствуют два знака. Оказалось, что пока источник находится в одной из четвертей, образованных осями крутильных датчиков, знаки шагов не менялись. Это позволило провести аналогию между осями крутильных датчиков и осями координат (рис. 8).

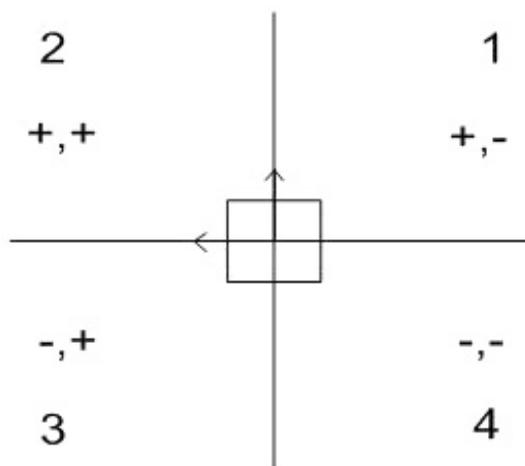


Рис. 8. Аналогия осей крутильных датчиков с осями декартовой системы координат: каждому шагу, зафиксированному в одной из четвертей, образованной осями крутильных датчиков, соответствует одна и та же пара знаков

Кроме того, датчик крутильных колебаний не реагирует на источник, если сигнал от него распространяется вдоль оси чувствительности датчика (направление вектора угловой скорости), и дает максимальный отклик, если сигнал от источника распространяется перпендикулярно оси чувствительности.

Выявленные закономерности позволили разрешить проблему определения направления на источник сейсмического сигнала и при этом перейти от разброса датчиков, входящих в состав охранного комплекса, по периметру охраняемой территории к точечному позиционированию системы охраны территории.

Литература

1. Шевченко Д. В., Шевченко В. П. Выбор и оптимизация структуры построения автономных сейсмических средств обнаружения рубежного типа // Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». — 2010. — С. 128–133.

2. *Вольсков А. А.* Выбор частоты дискретизации сигнала для решения задачи пассивной сейсмической пеленгации // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». — 2010. — С. 128–133.
3. *Diallo M. S., Kulesh M., Holschneider M., Sherbaum F., Adler F.* Characterization of polarization attributes of seismic waves using continuous wavelet transforms // Geophysics. — 2006. — V. 71, N 3. — P. V67–V77.
4. *Криштон В. Г.* Нестационарная конвективная диффузия в микромасштабных молекулярно-электронных структурах: дис... канд. физ.-мат. наук. — М., 2004. — С. 17–22.
5. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. — М.: Бином, 2006. — С. 361–369.

Поступила в редакцию 27.10.2010.