

УДК 623.482, 681.892

Э. Г. Гашимов,*кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела адъюнктуры и науки
Военной Академии Вооруженных Сил
Азербайджанской Республики*

Алгоритм идентификации и определения курса движущейся ненаблюдаемой бронетехники

В статье рассматривается математическая формализация задачи идентификации тяжелой бронетехники, скрытно передвигающейся в горной местности. Выполнен анализ сейсмоакустических сигналов, образованных в твердом грунте при движении машин, полете вертолетов и самолетов. Разработан алгоритм определения курса и координат движения бронетехники.

Ключевые слова: идентификация, ненаблюдаемая бронетехника, алгоритм, сейсмоакустические волны, курс движения.

© Э. Г. Гашимов, 2017

Обнаружение, локализация и идентификация наземными средствами удаленной на несколько километров движущейся в горной местности ненаблюдаемой тяжелой бронетехники является одной из актуальных задач военной науки. Решению этих вопросов посвящено много работ [1–7].

Одним из перспективных направлений решения этой задачи является изучение «искусственных» сейсмоакустических волн, которые образуются в приповерхностном слое на глубине 15–40 см при движении какого-либо объекта (человека, животного, легкой и тяжелой техники) по поверхности грунта. Частотные характеристики этих волн зависят от многих факторов: от состава грунта, типа движущегося объекта, климатических условий, степени пересеченности местности. Помимо этого, задача усложняется тем, что происходит суперпозиция «искусственных» сейсмоакустических волн и сейсмических волн Земного происхождения. Следует учесть также влияние сейсмических волн, возникающих на поверхности грунта под действием фронта акустической волны, исходящей от летательных аппаратов: самолета, вертолета и т. п. В ряде работ предлагают учитывать также климатические факторы (дождь, снег, ветер и т. п.) [7], однако в нашем случае они не будут играть существенной роли из-за различия частотного диапазона.

В данной работе рассмотрены проблемы идентификации скрытно передвигающейся бронетехники с использованием сейсмоакустической станции, описанной в предыдущих работах (см. [1]). Рассмотрен также алгоритм определения курса и координат движения бронетехники.

Основная цель работы: разработать алгоритм идентификации и определения курса движущейся в горной местности ненаблюдаемой тяжелой бронетехники на удалении до 3 км. В предыдущих работах [1–5] было отмечено, что такая дальность обеспечивается следующими преимуществами сейсмоакустической станции: 1) чувствительными пьезосенсорами в сейсмодатчиках, 2) настройкой электронного триггера на антисовпадение, учитывающего фоновые сейсмоакустические волны от воздушных целей, 3) специальными конструктивными особенностями сейсмологической станции, 4) специальным программным обеспечением с заложенной в нем базой эталонных частотных характеристик различных движущихся машин в различных условиях.

Анализ частотных характеристик сейсмоакустических волн движущихся наземных машин

В работе [6] были исследованы частотные характеристики сейсмоакустических волн, образующихся при движении со скоростью ~30 км/час легких (весом 1–10 тонн), средних (весом 10–20 тонн) и тяжелых (весом >20 тонн) машин. Было установлено, что дистанция обнаружения скрытого движения техники сильно зависит (прямо пропорционально) от шероховатости грунта, скорости и веса

машин и может достигать до 1000 метров и более. Причем при увеличении скорости машин и шероховатости грунта возрастает и дистанция вероятного детектирования движения техники.

Для примера на *рисунке 1* представлены результаты анализа данных для тяжелых машин (>20 тонн), взятых из работы [6].

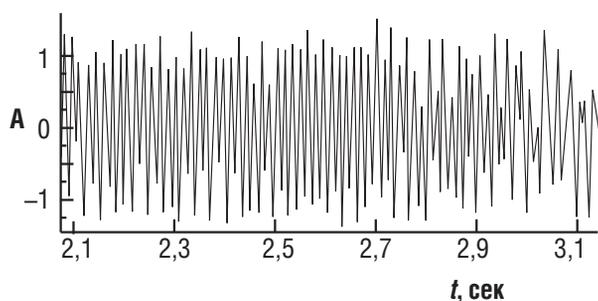


Рис. 1. Частотная характеристика сейсмоакустических волн, образующихся при движении тяжелых машин (>20 тонн)

Из анализа данных работы [6] можно заключить, что с увеличением веса машин увеличивается частота сейсмоакустических сигналов и во всех случаях >100 Гц. Таким образом, в сейсмологической станции электронный триггер выборки сигналов можно настроить на частоту (100–1000) Гц, и тогда влияние сигналов сейсмических волн, приходящих из недр Земли, можно будет существенно уменьшить. Ограничение на верхнюю границу (1000 Гц) связано с диапазоном стабильности акустических характеристик пьезоэлектрических сенсоров, составляющих основу сейсмоакустических датчиков [1].

Анализируя характеристики бронемашин, приведенные в [8], и учитывая, что частотные характеристики сейсмограмм прямо пропорционально зависят от веса машин [6], можно с большой долей вероятности допустить, что тяжелые бронемашин будут иметь такие же частотные характеристики, что и на *рисунке 1*.

Учет влияния сейсмоакустических волн Земли

Сейсмические волны – колебания, распространяющиеся в Земле от природных (землетрясений, извержений вулканов, обвалов в карстовых полостях, горных ударов и др.) или искусственных (взрывов, вибраторов, пневматических, газодинамических, электроискровых, гидравлических) источников [9].

Различают две группы сейсмических волн – объёмные и поверхностные. Здесь будут рассматриваться только поверхностные продольные волны. Скорость этих сейсмических волн в твердом грунте (горных породах) колеблется в пределах 1,5–8 км/сек., частотный диапазон волн – в основном от 0,0001 Гц до 100 Гц [10]. Поэтому, настроив сейсмолокационную станцию на диапазон частот 100–1000 Гц, можно будет в значительной степени ослабить влияния сейсмических волн Земли.

Учет влияния воздушных целей

В предыдущей работе [1] было отмечено, что настройкой электронного триггера на антисовпадение можно добиться исключения влияния воздушных целей. Кроме этого, исследования, выполненные в работе [6], показывают, что частотные характеристики сейсмоакустических волн, возникающих при полете вертолетов, существенно отличаются от частотных характеристик сейсмоакустических волн, возникающих при передвижении наземных машин.

Из анализа результатов исследований, представленных в работе [6] можно заключить, что сейсмоакустические сигналы, возникающие в результате полета вертолета, имеют стабильные и узкие линии в пределах 20–120 Гц и их можно легко отличить от частотных линий сейсмоакустических сигналов от наземных движущихся машин. Можно предположить, что сейсмоакустические сигналы, возникающие от самолетов с винтовыми двигателями, будут иметь такой же характер, поскольку процессы образования воздушных потоков при полете вертолета и винтового самолета подобны.

Сейсмоакустические сигналы, возникающие в результате полета реактивного самолета, вероятно, будут иметь более плавный характер в области частот до 1000 Гц. Это связано с режимом работы реактивного двигателя и процессом образования воздушных потоков: в этом случае скорость выхлопных воздушных потоков намного выше, и ударная воздушная волна, падающая на землю, имеет более плавную частоту без резких всплесков. Поэтому и сейсмоакустическая волна, образованная при поверхностном грунте, будет иметь плавный характер.

Алгоритм программы анализа сигналов

С целью наибольшего увеличения точности измерения координат, скорости, траектории и идентификации мишени был разработан следующий алгоритм программы анализа сигналов (*рис. 2*).

Электрические сигналы, возникающие под действием сейсмоакустических волн и регистрируемые чувствительными пьезоэлектрическими сенсорами PD, суммируются

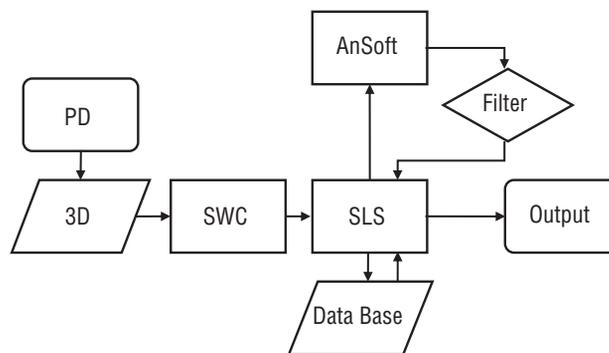


Рис. 2. Алгоритм программы определения параметров скрытого перемещения тяжелой военной техники

в 3-координатном сейсмическом датчике **3D** кубической формы. Такая форма датчика позволяет определить направление падения сейсмоакустических волн. Далее сигналы поступают в ячейку сейсмоакустических волн **SWC**. Эта ячейка состоит из трех **3D** датчиков, расположенных в вершинах треугольника со сторонами длиной 7–9 метров. В **SWC** сигналы анализируются, и происходит уточнение координат мишени. Число ячеек **SWC** в сейсмолокационной станции **SLS** может быть 10–15. Станция **SLS** имеет специальную форму, которая позволяет максимально точно определить расстояние и направление на мишень. Информация в **SLS** сравнивается с данными эталонных сейсмоакустических сейсмограмм, хранящимися в базе данных. Далее программа **AnSoft** обрабатывает и с помощью **Filter** отбрасывает ложные сигналы. На конечной стадии определяются тип мишени, его координаты, направление движения и скорость.

Алгоритм анализа курса и координат движения мишени, заложенный в компьютере управления сейсмолокационной станции, показан на *рисунке 3*.

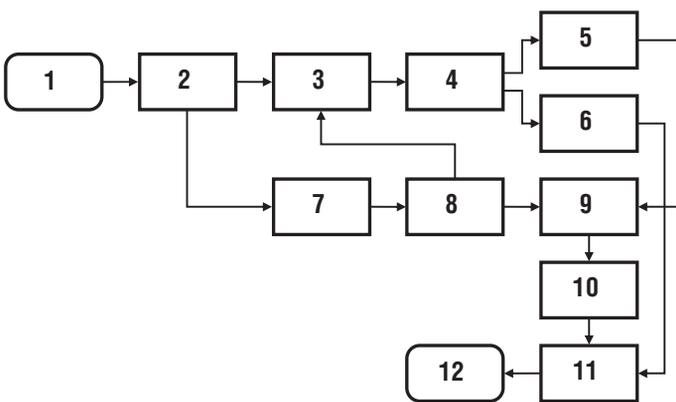


Рис. 3. Алгоритм анализа курса и координат движения мишени

Сигналы от сейсмоакустических волн (1) принимаются антенной (2). Из блока (2) сигналы поступают в блок обработки сигналов (7) и одновременно в блок формирования характеристик системных директив (3). Далее в блоке (4) происходит обработка сигналов от мишени. В блоке (5) определяется дистанция до мишени, а в блоке (6) – радиальная составляющая скорости мишени. Данные из блока (6) поступают в блок (11), где происходит определение курса движения мишени, и далее в блок формирования выходных данных (12). Данные из блока (5) поступают в блок измерения тангенциальной составляющей скорости мишени (9) и далее в блок определения скорости мишени (10). Отсюда информация поступает в блок определения курса и координат мишени (11) и далее в блок формирования выходных данных (12). Из блока обработки сигналов (7) информация поступает в блок измерения азимута мишени (8). Далее эта информация поступает в блок (3) и в блок (9).

Как можно видеть, в конечном итоге вся информация поступает в блок определения курса и координат мишени (11) и формирует выходные данные в блоке (12).

Постановка задачи идентификации объекта

Предполагается, что идентификация скрытого передвижения техники будет основываться на данных сейсмолокационной станции. В соответствии с описанной в [1] схемой, эта станция позволяет с некоторой точностью определить направление на цель и расстояние до нее. Однако сейсмоакустический сигнал, очевидно, несет больше информации об объекте идентификации, а именно, в зависимости от расстояния до объекта, скорости передвижения, направления движения относительно станций наблюдения и конструктивно-технических особенностей самого объекта (мощности двигателя, веса бронемашины – легкого, среднего или тяжелого), частотные характеристики сейсмоакустического сигнала будут варьироваться. Можно предположить, что путем сравнения сигналов, полученных от сейсмолокационной станции, с эталонными сигналами, которые можно записать на учебном полигоне для различных бронемашин и разных вариантов передвижения, можно идентифицировать ненаблюдаемый объект, отнеся его к той или иной бронетехнике.

Таким образом, задача идентификации сводится к созданию базы эталонных сигналов и разработке алгоритма сравнения полученного сейсмоакустического сигнала с эталонными сигналами. Поскольку основной характеристикой сигналов является распределение мощности по базовым частотам, то фактически вопрос сводится к разработке методики сравнения частотных характеристик сигналов.

Учитывая большое количество проведенных полевых экспериментов для различных комбинаций условий, в которых полученные сейсмические сигналы подвергались Фурье-анализу, а результаты записывались в базу данных, сосредоточимся на вопросе сравнения сигналов и идентификации источника с помощью указанной базы данных

Отметим, что спектральный анализ является одним из самых мощных инструментов обработки эксперимента. В частности, он используется для анализа данных, выявления характерных частот, в целях подавления шума и т. д.

Спектром совокупности данных $y(x)$ называют некоторую функцию другой координаты (или координат, если речь идет о многомерном спектре) $F(\omega)$, полученную в соответствии с определенным алгоритмом. Примерами спектров являются преобразование Фурье, спектр мощности, вейвлет-преобразование [11, 12].

Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала $y(x)$ в виде бесконечной суммы синусоид вида $F(\omega) \cdot \sin(\omega \cdot x)$. Функция $F(\omega)$ называется *преобразованием Фурье*, или *интегралом Фурье*, или *Фурье-спектром* сигнала:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \cdot \exp(-i\omega x) dx \quad (1)$$

Ее аргумент имеет смысл частоты соответствующей составляющей сигнала. Обратное преобразование Фурье переводит спектр $F(\omega)$ в исходный сигнал $y(x)$ [12].

Дальнейшие эксперименты предполагается провести на полигонах с твердой каменной почвой в следующих исполнениях:

- движение бронетехники разной категории тяжести (легкие, средние и тяжелые бронемашин) в соответствии с [8];
- различные удаления от сейсмолокационной станции в пределах от 400 м до 3000 м с дискретностью измерения 200 м;
- различные направления движения относительно сейсмолокационной станции (приближение к станции, удаление от станции или параллельное движение к позиции войск);
- различные скорости движения в пределах от 10 км/час до 70 км/час, с дискретностью изменения 10 км/час;
- специальная акустическая установка для обнаружения воздушных целей включена в режиме антисовпадения, поэтому сигналы от этих целей будут исключены электронными фильтрами.

Математическая формализация задачи идентификации

Предположим, что каждый сейсмоакустический сигнал после Фурье-анализа представляется в виде некоторой последовательности чисел (коэффициентов Фурье) – спектральной последовательности:

$$\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}, \quad (2)$$

где N – количество чисел-коэффициентов, которое одинаково для всех эталонных данных.

Для определенности рассматриваемую спектральную последовательность снабдим индексами $\Lambda^{i,j,k,l} = \{\lambda_1^{i,j,k,l}, \lambda_2^{i,j,k,l}, \dots, \lambda_N^{i,j,k,l}\}$, относя их к различным эталонам, где $i = 1, 2, 3$ указывает на то, к какой категории бронетехники она относится; $j = 1, 2, \dots, 14$ – порядковый номер средней дистанции до объекта, дистанция до объекта вычисляется по формуле $d = 200 \times (j + 1)$; $k = 1, 2, \dots, 7$ – порядковый номер средней скорости объекта, средняя скорость объекта вычисляется по формуле $v = 10 \times k$; индекс $l = 1, 2, 3$ указывает на условие направления движения относительно станций наблюдения ($l = 1$ – приближение к позициям войск, $l = 2$ – удаление от линии фронта и $l = 3$ – движение параллельно расположению войск).

Обозначим через $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ спектр сейсмоакустического сигнала исследуемого источника. Очевидно, этот элемент должен определяться таким же механизмом

(методом) обработки, как были определены эталонные данные.

Теперь сформулируем задачу идентификации: найти такой элемент $\Lambda' \in \{\Lambda^{i,j,k,l}\}_{i,j,k,l}$, который был бы наиболее близок к заданному элементу Λ .

Для математической формализации введем понятие наибольшей близости элементов вида $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, а именно, в качестве расстояния между двумя элементами $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ и $\Lambda' \in \{\Lambda^{i,j,k,l}\}_{i,j,k,l}$ примем Евклидову метрику

$$\rho(\Lambda, \Lambda') = \sqrt{\sum_{s=1}^N (\lambda_s - \lambda'_s)^2}. \quad (3)$$

Очевидно, чем ближе «располагаются» элементы Λ и Λ' , тем меньше значение функционала (3). Таким образом, задачу идентификации можно формально написать следующем виде:

для заданного элемента Λ найти такой элемент $\Lambda' \in \{\Lambda^{i,j,k,l}\}_{i,j,k,l}$, чтобы функционал (3) достигал своего минимума, то есть

$$\rho(\Lambda, \Lambda') \rightarrow \min. \quad (4)$$

Следует заметить, что множество $\{\Lambda^{i,j,k,l}\}_{i,j,k,l}$ достаточно ограниченное, следовательно, минимум функционала (4) может быть найден простым перебором возможных вариантов.

Задача не сильно усложняется, если имеется несколько целей, поскольку сейсмоакустические ячейки треугольной формы в сейсмолокационной станции могут определять с достаточной точностью координаты одновременно нескольких целей, поэтому и сейсмоакустические спектры этих целей будут достаточно ясно выделяться.

Выводы

Таким образом, на основе выполненных исследований получены следующие результаты:

- разработан алгоритм идентификации, определения курса и координат движущейся ненаблюдаемой бронетехники путем анализа акустических сейсмограмм;
- анализ сейсмоакустических частотных характеристик показал, что чем выше вес движущихся по поверхности земли машин, тем выше частота сейсмоакустических сигналов;
- разработано программное обеспечение с базой данных об эталонных сейсмоакустических частотных характеристиках бронемашин весом от 2 до 46 тонн;
- влияние сейсмоакустических сигналов, возникающих в результате полета вертолета или самолета, будет сказываться только в диапазоне частот 20–120 Гц, поэтому настроив сейсмолокационную станцию на частоту 100–1000 Гц можно будет эффективно идентифицировать скрытно передвигающиеся наземные машины;

- предложена математическая формализация задачи идентификации скрытно движущейся мишени.

Список литературы

1. Hashimov E. G., Bayramov A. A. Seismic Location Station for Detection of Unobserved Moving Military Machineries / E. G. Hashimov, A. A. Bayramov // Turkish Journal of Military and Information Science. – 2016. – Vol. 4 (2). – P. 61–66.
2. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А., Сабзиев Э. Н. Сейсмолокационная станция / Э. Г. Гашимов, А. А. Байрамов, Э. Н. Сабзиев // Военное обозрение. – Баку, 2016. – № 1 (01). – С. 30–41.
3. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Метод детектирования скрытного перемещения бронетехники противника / Э. Г. Гашимов, А. А. Байрамов // Военное знание. – Баку, 2015. – № 3. – С. 30–41.
4. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Обнаружение передвижения ненаблюдаемой бронетехники противника сейсмолокационным методом / Э. Г. Гашимов, А. А. Байрамов // Национальная безопасность и военные науки. – Баку, 2015. – № 1 (1). – С. 128–132.
5. Гашимов Э. Г., Байрамов А. А. Пьезоэлектрические композиты для разработки на их основе приемно-передающих акустических антенн / Э. Г. Гашимов, А. А. Байрамов // Евразийский Союз Ученых. – Москва, 2015. – № 5 (14). – С. 38–39.
6. Pakliomov A., Goldbiut T. Field Testing of New Unattended Small Size Seismic Module for Various Target Detection / A. Pakliomov, T. Goldbiut // Unattended Sensors and Sensor Networks III / edited by Edward M. Carapezza. – Proc. of SPIE. – Vol. 6394, 63940D, (2006). – doi: 10.1117/12.71430. 63940D-1 – 63940D-10.
7. Xin Jin, Sarkar S., Ray A., Gupta Sh., Damarla Th. Target Detection and Classification Using Seismic and PIR Sensors / Xin Jin, Soumalya Sarkar, Asok Ray, Shalabh Gupta, Thyagaraju Damarla // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Vol. 12. – N 6. – P. 1709–1718.
8. Зарицкий В. Н., Харкевич Л. А. Общая тактика / В. Н. Зарицкий, Л. А. Харкевич. – Тамбов : ТГТУ, 2007. – 94 с.
9. Павленко О. В. Квазистационарный вид спектра интенсивных сейсмических волн на поверхности грунта / О. В. Павленко // Доклады Российской АН. – 2007. – Т. 417 (1). – С. 1–5.
10. Сейсмические волны <https://ru.wikipedia.org/Geowiki/>
11. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2006. – 751 с.
12. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2009. – 248 с.