

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Некоторые аспекты регистрации импульсных низкочастотных сигналов в воздухе при использовании комбинированной приемной системыБ. И. Гончаренко^а, В. А. Гордиенко

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^а gon-boris@yandex.ru*

Статья поступила 21.02.2014, подписана в печать 31.03.2014.

Обсуждаются особенности формирования и распространения акустических и сейсмических импульсных сигналов на относительно небольшие расстояния при различных условиях их возбуждения на основе регистрации совместных данных о поле давления и поле колебательных скоростей. Показано, что «затяжной» характер сигналов (особенно при малых углах вылета снарядов) связан с интенсивным взаимодействием возбужденной выстрелом волны с землей и многократными переотражениями этих сигналов. Использование сигналов, регистрируемых с каналов векторного приемника, позволяет получить информацию о пространственном распределении сигналов. При разрыве снаряда в воздухе от падающей на поверхность земли звуковой волны зарождается сейсмоакустическая волна, которая первой регистрируется каналами комбинированного приемного модуля (КПМ).

Ключевые слова: импульсные источники звука, комбинированный приемный модуль, дульная волна, баллистическая волна, уровень звукового давления, разрыв снаряда, сейсмоакустическая волна, векторный приемник.

УДК: 681.884, 534.88. PACS: 43.68.+z, 43.60.+d.

Введение

Задача регистрации и локализации наземных низкочастотных импульсных источников звука в сильной степени зависит от условия формирования и распространения акустических сигналов в земной атмосфере [1, 2]. При относительно небольших расстояниях до источника, измеряемых километрами или десятками километров, определение акустического пеленга на источник мощных импульсных сигналов, как правило, осуществляется путем измерения разности времен регистрации переднего фронта волны, а для источников непрерывных сигналов — по измерениям разности фаз между сигналами, регистрируемыми различными микрофонами, разнесенными в пространстве [3–7]. Однако особенности рельефа местности и взаимодействие звуковой волны с земной поверхностью, изменение скорости и направления ветра, а также наличие вертикального градиента температуры в атмосфере (и, следовательно, скорости звука), как правило, приводит к достаточно большим флуктуациям как фазы и амплитуды сигнала, так и времен прихода переднего фронта волны [2]. Это приводит к затруднению решения задач прикладного характера, таких как решение задач локализации наземных низкочастотных импульсных источников.

Целью настоящей работы является выяснения особенностей формирования и распространения акустических и сейсмических импульсных сигналов при их распространении на относительно небольшие расстояния (десятки километров) на основе регистрации совместных данных о поле давления и поле колебательных скоростей.

1. Условия проведения эксперимента

В последние десятилетия для пеленгования импульсных источников сигнала в низкочастотном диапазоне все чаще стала использоваться информация, регистрируемая с комбинированного приемного модуля (КПМ) [8, 9], который включает трехкомпонентный векторный приемник (ВП) [10, 11] и приемник звукового давления, для которых эти флуктуации во многих случаях являются несущественными. Анализ литературных источников показывает, что на сегодняшний день целый ряд стран используют звукоприемники колебательной скорости для пеленгования и локализации источников импульсных сигналов [12]. Так, например, голландская компания Microflown Avisa разработала инновационные акустические векторные сенсоры AVS (acoustic vector sensor) для обнаружения и локализации выстрелов стрелкового оружия, огня артиллерии, воздушных судов и транспортных средств [13, 14].

Для ровной местности, покрытой растительностью, и «хороших» погодных условий, таких, например, как описанные нами ранее в работе [15], преимущества КПМ при решении задач локализации положения орудий и места падения снаряда не вызывают сомнений.

Однако в жаркое время года и при наличии холмистой или гористой местности картина распространения звука качественно меняется за счет интенсивного взаимодействия возбужденной выстрелом звуковой волны с землей и многократных переотражений этих сигналов. Часто реализуется «затяжной» характер вступления сигналов (особенно при малых углах вылета снаряда).

С целью выяснения особенностей распространения акустических и сейсмических импульсных сигналов при их распространении на относительно небольшие расстояния и возможности локализации положения орудий и места падения снаряда на основе регистрации совместных данных о поле давления и поле колебательных скоростей был проведен эксперимент в летний период на одном из полигонов европейской части России.

В качестве источников сигналов использовались выстрелы из наземных артиллерийских орудий, а также разрывы снарядов.

Геометрия проведения натурного эксперимента и схема размещения звукоприемников представлены на рис. 1.

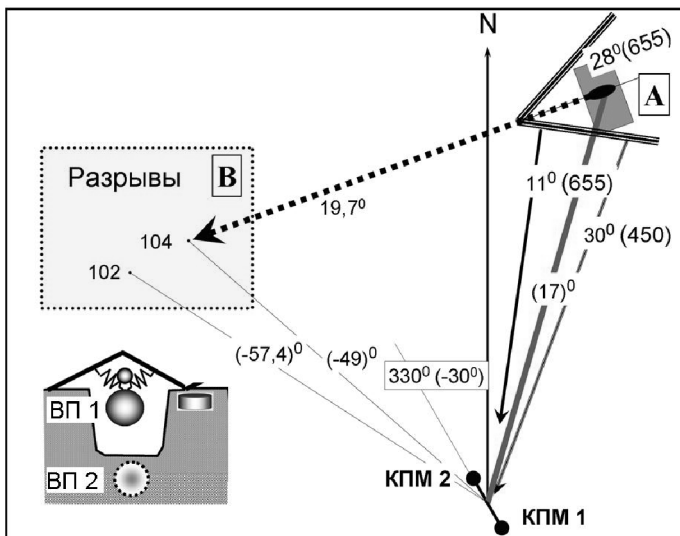


Рис. 1. Геометрия проведения натурного эксперимента и схема размещения звукоприемников

Приемная система (ПС) представляла собой два комбинированных приемных модуля (КПМ), разнесенных между собой на расстояние 300 м.

Позиция артиллерийских орудий (А) располагалась на возвышенности таким образом, что направление на них составляло 17° – 19° относительно направления на север. Область разрывов (В) лежала в пределах углов от -45° до -60° .

Каждый из разнесенных КПМ состоял из двух векторных приемников (ВП) конструкции МГУ [11], микрофона (датчика давления). Кроме того, использовался стандартный приемный модуль «Вектор-2Н», сигнал с которого пропорционален величине звукового давления.

Один из ВП в каждом КПМ размещался в воздухе, второй был присыпан грунтом. Для защиты от ветровой помехи каждый приемный модуль защищался обтекателем.

Запись сигналов осуществлялась одновременно по всем каналам, затем сигналы последовательно считывались в память компьютера.

Одновременная регистрация сигналов при работе с ВП является принципиальной для устранения фазовых задержек между каналами, которые приводят к искаженной интерпретации характера движения частиц

среды в волне и определению направления на источник звука [15].

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

При выстреле из орудий, как известно, возникает ударная волна [16], и в последующем должно регистрироваться три вида сигналов. В момент вылета снаряда из ствола возникает импульсная волна, называемая «дульной», которая распространяется практически изотропно в горизонтальной плоскости. Снаряд, вылетающий из ствола орудия со сверхзвуковой скоростью, порождает «баллистическую» волну. Третий импульсный сигнал возникает спустя достаточно большое время в области разрыва снарядов [17, 18].

В реальном эксперименте из-за многолучевости распространения сигналов, связанной с вертикальной стратификацией атмосферы, наличием ветра, неровностями земной поверхности и другими причинами, количество регистрируемых импульсов оказалось существенно больше.

Особенностью стрельбы в один из дней является низкая высота полета снаряда и как следствие — возможное взаимодействие порождаемых им волн с поверхностью земли и возбуждение сейсмоакустических волн [19, 20]. Скорость ветра в месте расположения КПМ составляла примерно 2.5 м/с, а его направление колебалось в пределах 300° – 330° , температура воздуха в тени была 22°C , влажность воздуха — около 36%.

Проанализируем временную зависимость сигналов, записанных различными каналами КПМ, соответствующих моменту выстрела, которая в укрупненном временном масштабе представлена на рис. 2. Здесь же приведен результат пеленгования направления прихода сигнала в горизонтальной и вертикальной плоскостях и энергия сигнала.

Индекс «в» соответствует воздушному ВП 1. Символом «Р-в» на рисунке обозначен сигнал, снимаемый со стандартного датчика приемного модуля «Вектор-2Н». Если ориентироваться на сигнал, регистрируемый этим датчиком, то можно предположить, что начало выстрела (дульная волна и следующая практически следом за ней баллистика) соответствуют моменту времени, отмеченному вторым справа пунктиром.

Однако анализ с помощью КПМ энергии, распространяющейся в пространстве, показывает, что существует несколько пиков такой энергии.

Первый из них в районе 7.8 с от начала записи (первый слева пунктир на рис. 2), воспринимаемый как локально плоская волна, пеленгуемая с направления 11° – 15° , судя по всему, и соответствует дульной волне, приходящей под углом 35° – 40° к горизонту в вертикальной плоскости. Второй пунктир скорее всего соответствует началу баллистики, приходящей под углом 35° – 40° относительно направления на север, что, по оценкам, соответствует скорости вылета снаряда около 440–450 м/с.

Последующий «хвост» сигнала выстрела в течение последующих 3 с характеризуется периодическим возникновением импульсов, регистрируемых ВП 2 («земляной»), а в вертикальной плоскости — приземным распространением сигнала.

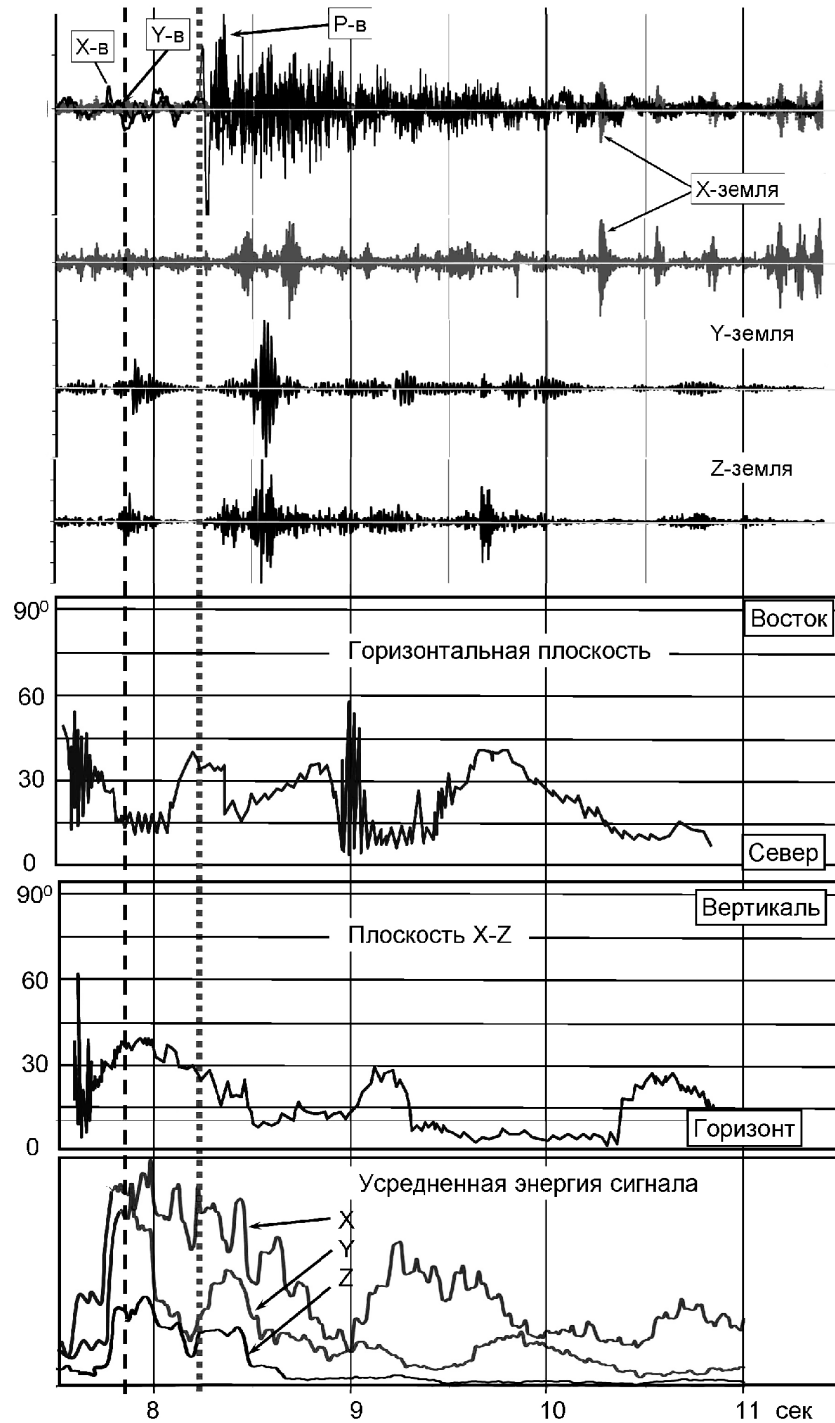


Рис. 2. Анализ сигнала «выстрел»

Полагаем, что длинный «хвост» сигнала выстрела связан с особенностями рельефа местности и интенсивным взаимодействием баллистической волны с землей.

На рис. 3 приведен фрагмент пространственного распределения энергии этого выстрела, соответствующий моменту разрыву снаряда. По каналам ВП 1 импульсный сигнал хорошо пеленгуется под углом $55\text{--}57^\circ$, соответствующим в области разрыва (В) примерно точке 102, приведенной на схеме рис. 1. Сигнал был достаточно сильный, поэтому хорошо пеленговался по каналам отдельного КПМ. Пеленг, определенный на основании регистрации времени задержки вступления

сигнала разрыва на разнесенные КПМ 1 и КПМ 2, составил примерно 59° .

Особенностью следующего анализируемого сигнала является увеличенная примерно в полтора раза мощность снаряда по сравнению с предыдущим случаем, высокая парабола полета снаряда ($H_{\max} \approx 95$ м). Скорость ветра в месте расположения КПМ составляла примерно 3 м/с, направление ветра 300° , температура воздуха 19°C , влажность 32%.

Запись сигнала выстрела для анализируемого импульса имеет более сложную структуру, чем у описанных выше записей сигналов. Сначала идут два-три

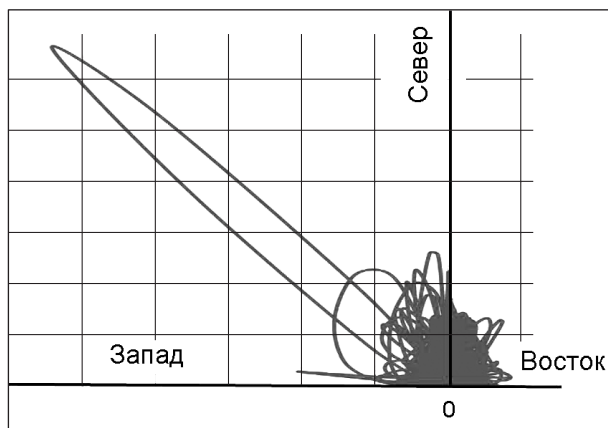


Рис. 3. Пеленг сигнала «разрыв»

«предвестника», хорошо регистрируемые засыпанными песком ВП 2 и слабее — воздушными ВП 1.

Определить точное вступление дульной волны по сигналам, снимаемым с датчиков давления, достаточно проблематично.

Обработка сигналов, регистрируемых каналами ВП 1, позволила частично снять эту проблему. На рис. 4 приведен сигнал, регистрируемый каналами ВП 1, а также в этом же временном масштабе приведены зависимость от времени уровня энергии регистрируемого сигнала и направление ее пространственного распространения в горизонтальной плоскости.

Исходя из известной геометрии взаимного расположения позиции стрельбы и КПМ, следует предположить, что дульной волне соответствует первый из изображенных на рис. 4 «пиков» энергии, пеленгуемый под углом 14–17°. Последующие максимумы энергии, скорее всего, соответствуют баллистической волне,

несколько раз провзаимодействовавшей с поверхностью земли.

Если предположить, что последующие пики действительно связаны с баллистической волной, отраженной в различное время от земных объектов, то первому по времени импульсу соответствует скорость снаряда примерно 467 м/с, второму — 440 м/с, третьему — 433 м/с (рис. 4), т. е. отраженные сигналы формировались не одновременно, а по мере уменьшения скорости полета снаряда.

Была произведена еще одна серия выстрелов. Так же как и в предыдущем случае, была увеличенная мощность снаряда, высокая парабола полета снаряда ($H_{\max} \approx 95$ м). Скорость ветра в месте расположения КПМ составляла примерно 3 м/с, направление ветра 300°, температура воздуха 19°C, влажность 32%.

Особенность этой серии выстрелов состояла в том, что снаряды разрывались в воздухе на некотором расстоянии от земной поверхности.

Запись сигнала выстрела для анализируемого импульса в данном случае не рассматривается, поскольку он по характерным признакам мало отличается от соответствующего сигнала выстрела, рассмотренного выше.

Остановимся на сигнале, соответствующем моменту разрыва. На рис. 5 в качестве примера представлена характерная временная зависимость сигналов, одновременно записанных по каналам ВП 1 и по каналу звукового давления (P), соответствующих моменту разрыва. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной оси — амплитуда в относительных единицах.

Рассмотрим особенности зарегистрированных сигналов в момент разрыва снаряда.

По каналам V_x и V_z ВП наблюдаются два вида импульсов, по каналам V_y и P — одиночные импульсы.

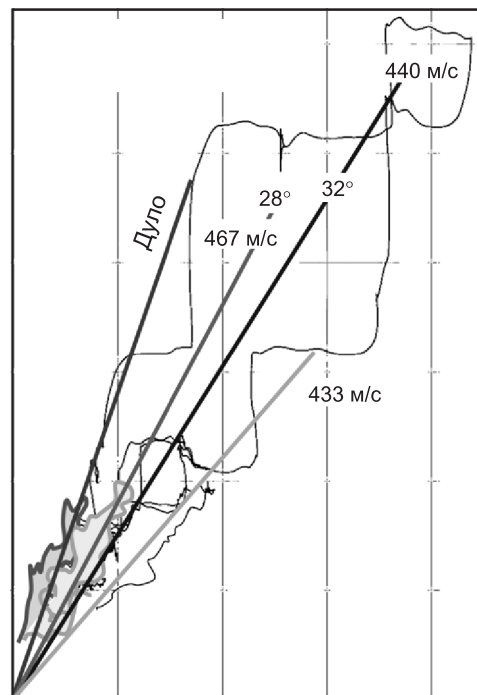
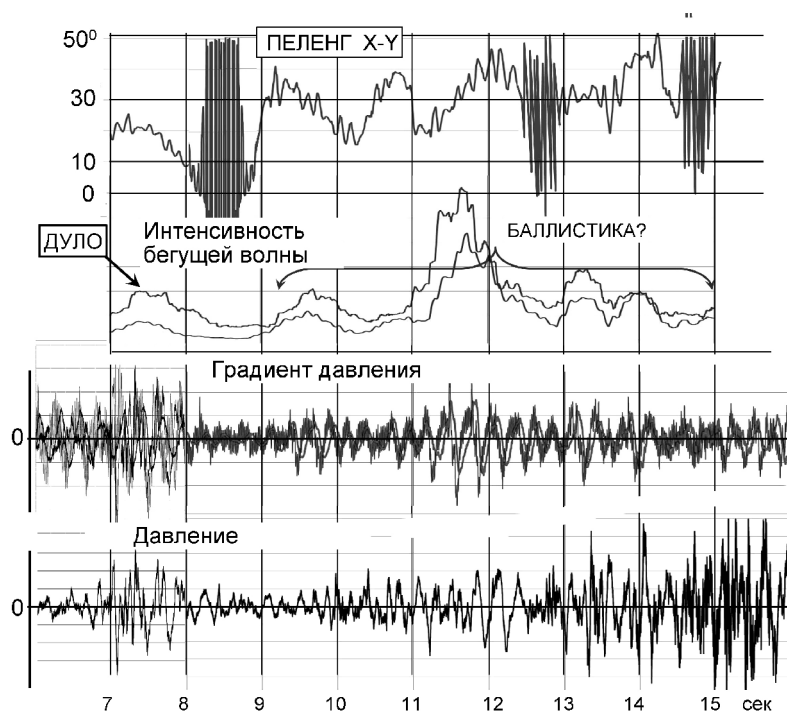


Рис. 4. Анализ сигнала «выстрел». Справа — пространственное распределение направления прихода энергии волн в горизонтальной плоскости и направления, соответствующие их центру тяжести для сигнала «выстрел»

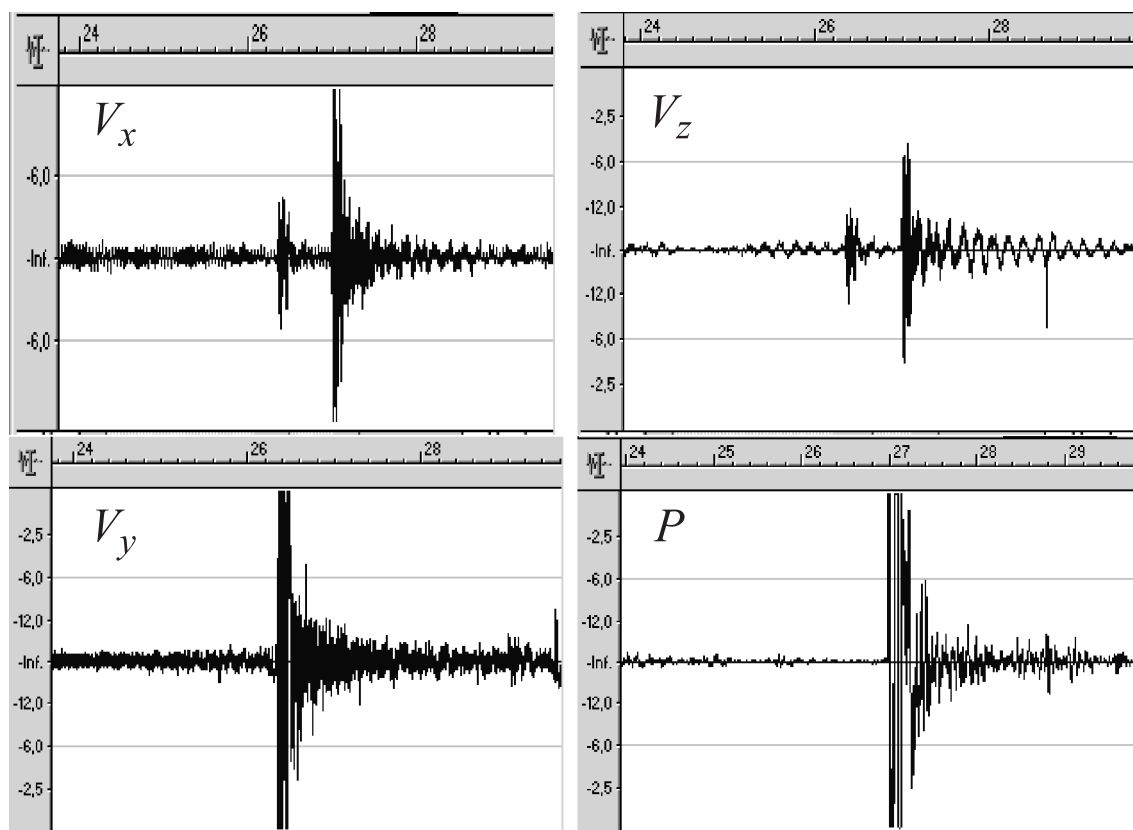


Рис. 5. Временная зависимость сигнала в момент разрыва

По времени регистрации импульс по каналу V_y соответствует первому импульсу по каналам V_x и V_z ВП, а импульс по каналу P — второму импульсу по каналам V_x и V_z ВП.

При разрыве снаряда в воздухе предположим следующее.

Во-первых, от взрыва снаряда в воздухе на относительно небольшой высоте (а эта высота по условиям стрельбы не может превышать 95 м) зародилась звуковая волна, которая распространяется по воздуху.

Во-вторых, от взрыва снаряда в воздухе звуковая волна падает на землю и в ней зарождается сейсмоакустическая волна.

В-третьих, звуковая волна от снаряда, разорвавшегося в воздухе, отражается от поверхности земли и также распространяется по воздуху.

Импульс сигнала, зарегистрированный по каналу P , соответствует звуковой волне, которая зародилась от взрыва снаряда в воздухе, поскольку этот звукоприемник реагирует только на звуковые волны, следовательно, вторые импульсы, зарегистрированные по каналам V_x и V_z ВП и совпадающие по времени с этим импульсом, также соответствуют звуковой волне. Звуковая волна от снаряда, разорвавшегося в воздухе, отраженная от поверхности земли, не зафиксирована ни ВП, ни приемником звукового давления, поэтому она не рассматривается.

Тогда можно предположить, что первые импульсы, зарегистрированные по каналам V_x и V_z , и сигнал импульса по каналу V_y ВП соответствуют сейсмоакустической волне, которая зародилось от падающей на

поверхность земли звуковой волны от снаряда, разорвавшегося в воздухе. Как показала обработка всех сигналов выстрелов, у которых наблюдались двойные разрывы, разница во времени между первым и вторым сигналами импульса составляет примерно 0.68–0.69 с. Это время представляет сумму времени распространения звуковой волны от снаряда, разорвавшегося в воздухе, до поверхности земли и времени прохождения зарождающейся сейсмоакустической волны до приемной системы.

Как следует из параметров полета снаряда, максимальная высота, на которой мог разорваться снаряд в воздухе, составляет примерно 95 м. Следовательно, время распространения звуковой волны от снаряда, разорвавшегося в воздухе, до поверхности земли при скорости ее распространения 330 м/с составляет примерно 0.29 с. Тогда оставшееся время 0.4 с, можно предположить, затрачено на распространение сейсмоакустического сигнала от места падения звуковой волны от снаряда, разорвавшегося в воздухе, до приемной системы. Если учесть, что скорость распространения сейсмоакустического сигнала составляет примерно 2100–2500 м/с, то расстояние от места падения на поверхность земли звуковой волны до приемной системы составит примерно 1000 м.

Можно оценить и направление прихода зарегистрированного сейсмоакустического сигнала. Как показала обработка всех сигналов выстрелов, у которых наблюдались двойные разрывы, зарегистрированный каналами ВП 2 сейсмоакустический сигнал достаточен по амплитуде и хорошо пеленгуется под углом 83–86°.

Следует отметить, что при наличии импульсных сигналов от взрыва снаряда в воздухе по каналам ВП 1 не представляет труда определить его местоположение, которое в существенной степени может отличаться от места падения звуковой волны от снаряда, разорвавшегося в воздухе.

Таким образом, при разрыве снаряда в воздухе наличие двойных импульсов, из которых первый соответствует зарождаемой сейсмоакустической волне, существенным образом усложняет задачу регистрации и локализации места разрыва снаряда.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что сигналы, регистрируемые каналами ВП, помещенного в грунт, содержат больше высокочастотных составляющих, а уровни регистрируемых ими сигналов выстрела и разрыва (особенно в случае «затяжных» во времени сигналов) часто существенно выше по уровню, чем регистрируемые аналогичным ВП, размещенным в воздухе. Последнее свидетельствует о том, что во многих случаях «затяжной» характер сигналов (особенно при малых углах вылета снарядов) связан с интенсивным взаимодействием возбужденной выстрелом волны с землей, многократными переотражениями этих сигналов и возбуждением наведенных сейсмикой акустических волн.

В случае сложных «затяжных» во времени сигналов информация, снимаемая с каналов ВП, позволяет получить информацию о пространственном распределении сигналов. Показана возможность определения местоположения источника сигнала методами триангуляции с помощью сигналов, зарегистрированных разнесенными КПМ.

Отметим также, что при разрыве снаряда в воздухе каналами КПМ регистрируются двойные импульсы, первый из которых соответствует зарождаемой сейсмоакустической волне, а второй — звуковой волне от снаряда, разорвавшегося в воздухе, что усложняет задачу локализации места разрыва снаряда.

Some aspects of the registration of low-frequency impulse signals in air using a complex receiving system

B. I. Goncharenko^a, V. A. Gordienko

*Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^a gon-boris@yandex.ru.*

The specific features of the formation of impulse acoustic and seismic signals, as well as their propagation to relatively short distances under various conditions of their excitation, based on the registration of consistent data on a pressure field and an oscillation speed field are discussed. It is shown that the «delayed» character of the signals, especially at low exit angles of projectiles, is due to the intense interaction of a wave excited by a shot with the ground and to multiple reflections of the signals. The use of signals registered by the channels of a vector receiver makes it possible to obtain information on the spatial distribution of the signals. When a projectile bursts in air, the sound wave that is incident on the land surface induces a seismoacoustic wave that is first registered by channels of a combined receiving unit (CRU).

Keywords: pulse sound sources, combined reception unit, muzzle blast, ballistic wave, sound-pressure level, burst of projectile, seismoacoustic wave, vector receiver.

PACS: 43.68.+z, 43.60.+d.

Received 21 February 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2014).

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: gon-boris@yandex.ru.
2. Гордиенко Валерий Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник.

Список литературы

1. Красильников В.А. // Докл. АН СССР, 1945. **36**. С. 576.
2. Красильников В.А. // Докл. АН СССР, 1947. **38**. С. 985.
3. Таланов А.В. Артиллеристская звуковая разведка. М., 1957.
4. Глухов Е.А. Основы построения артиллерийских звукометрических комплексов. СПб., 2006.
5. Шмелёв В.В. // Оборонная техника. 1996. № 10–11. С. 17.
6. Шмелёв В.В., Корольков С.М. // Оборонная техника. 1998. № 6–7. С. 22.
7. Шмелёв В.В. Акустический локатор. Патент РФ 2374665. 2008.
8. Захаров Л.Н., Ржевкин С.Н. // Акуст. журн. 1974. **20**, № 3. С. 393.
9. Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М., 1989.
10. Гончаренко Б.И., Захаров Л.Н., Иванов В.Е. и др. Доклад на Всесоюз. акуст. конф. М., 1973.
11. Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А., Рожков В.А. Векторный приемник МГУ. АС СССР № 322.884 от 19.12.1988 г.; Патент РФ 322884. 1997.
12. Пархоменко А.В., Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Шмелёв В.В. Построение и устройство современных звукометрических систем и комплексов / Под общ. ред. А.В. Пархоменко. Пенза, 2013.
13. Акустические системы определения выстрела. Военное обозрение. Вооружение. 2013. № 12.
14. Acoustic Vector Sensor. Microflown Avisa Charting sound fields. V. 1.0, 01.2011.
15. Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А. // Физическая и нелинейная акустика: Сб. тр. семинара научной школы профессора В. А. Красильникова. М., 2002.
16. Козорезов К.И., Сергеев В.В. // Физика горения и взрыва. 1975. № 6.
17. Эксклагон Э. Акустика орудий и снарядов. Л., 1929.
18. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородно движущейся среды. М., 1981.
19. Уайт Д.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М., 1989.
20. Али К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х т. М., 1983.