

10. Kozeruk S.O. and Maznichenko D.V. (2017), Determining of source's coordinates of shot by mean of acoustic waves. *Electron. Commun.* Vol. 22, No 1. pp. 45-49. DOI: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.1.79761>

11. Prokopenko V.V. (2015), Sources of errors affecting accuracy of firing data acquired for record transfer of fire for effect. *Weapons systems and military equipment.* No 2. pp. 37-43.

12. Horton M.A. and Newton A.R. (1997), Method and apparatus for determining position and orientation of a moveable object using accelerometers. U.S. Patent 5,615,132, issued March 25. URL: <https://patents.google.com/patent/US5615132A/en>

13. Alves R.G., Osorio P.L. and Swamy M.N.S. (2000), General FFT pruning algorithm. *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems* (Cat. No. CH37144). Vol. 3. pp. 1192-1195. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2000.951428>

14. Bect J., Ginsbourger D., Li L., Picheny V. and Vazquez E. (2012), Sequential design of computer experiments for the estimation of a probability of failure. *Statistics and Computing.* Vol. 22 (3). pp. 773-793. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11222-011-9241-4>

MICROPROCESSOR DEVICE DETERMINING DIRECTION OF SOUND TO IMPROVE TECHNICAL EQUIPMENT AT WEAPONRY

I.B. Trach, H.I. Klym, R.V. Diachok, I.D. Karbovnyk

In this work development of an effective microprocessor device for determining the direction of the sound source with high accuracy and algorithm for calculating directions to the sound source were performed. The basis is a 32-bit STM32 microcontroller, which performs the necessary actions for the implementation of sound processing algorithms by the designed device. Electrical oscillations in analog form at the outputs of three microphones were used as input signals. The received signals are amplified by microphone amplifiers with a software-controlled transmission ratio to the nominal level of ADC operation. The use of such microphone sound amplifier with a software-controlled gain level made it possible to respond sensitively to the sound signal level of the environment and maintain the nominal level of the input signal at the ADC input. This approach made it possible to reduce the level of noise (at a low level of the input signal) and the level of signal distortion (at a powerful signal).

The device proposed in the work includes three remote microphones connected by a cable. The microphone amplifiers of each channel are divided into two parts. The first is placed near the microphone and converts the output signal into a differential signal with low internal resistance, the second is placed inside the device itself and converts the differential input signals into a normal form, removing interference of the common type. The amplifiers of the second part of the microphone amplifiers are software controlled, which allows adjustment to the nominal levels required by the ADC inputs. This design uses a built-in MCU ADC, which allows easy conversion of analog signals into digital form and process them according to the necessary algorithms. The obtained results are displayed on the display panel and transmitted over the Ethernet channel for further analysis. The full functioning of the device requires an autonomous power source to provide energy to all nodes.

The developed microprocessor device for determining the direction to the sound source can be used for military purposes with the joint use of algorithms and approaches to determining the direction proposed by other developers.

Key words: microprocessor device, design, direction on sound source, reliability, microphone amplifier.

УДК 358.1; 358:007.35; 534.6

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.27.2022.45-52>

А.В. Шульгін, О.В. Тимошук, Д.Є. Хаустов, О.О. Бурашніков, Д.В. Вільгуш, Ю.А. Настишин

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 14 October 2022; Revised 20 October 2022; Accepted 25 October 2022

АНАЛІЗ БАЛІСТИЧНОЇ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ КУЛІ АБО СНАРЯДА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ ВЛУЧЕННЯ В МІШЕНЬ

Створення вітчизняного озброєння та навчального військового обладнання з метою покращення забезпеченості підрозділів та прискорення і підвищення якості підготовки військовослужбовців – завдання, які і раніше були важливими та набули особливої пріоритетності в умовах війни. Дослідження існуючих технологій та методів покращення процесів навчання та ведення бойових дій вказує, що перспективним напрямком у цьому відношенні є аналіз звукового поля для отримання розширеної інформації щодо подій які відбуваються на полі бою чи на місці проведення заняття з вогневої та тактичної підготовки.

© А.В. Шульгін, О.В. Тимошук, Д.Є. Хаустов, О.О. Бурашніков, Д.В. Вільгуш, Ю.А. Настишин

Аналіз звукового поля під час польоту кулі є важливим для використання як в навчально-тренувальному процесі, так і під час виконання бойових завдань. Великою перевагою таких методів є відносна простота, невелика вартість обладнання та відсутність демаскуючих факторів у вигляді електромагнітного випромінювання з різних спектральних діапазонів. Перевагою також є можливість модернізації існуючого обладнання та озброєння без необхідності внесення кардинальних змін у конструкцію та схему функціонування використовуваного озброєння та обладнання.

У статті запропоновано метод визначення траєкторії кулі чи снаряда для встановлення точки влучання або, що особливо важливо, визначення напрямку відхилення від цілі чи мішені у разі невлучання. Наведено математичні алгоритми, отримані на основі запропонованої фізичної моделі детектування прольоту кулі в околі системи мікрофонів, яка знаходиться поблизу мішені, компактно розміщених на певних відстанях один від одного на жорсткому штативі для проведення відповідних розрахунків. Проведено аналіз технічної можливості реалізації відповідного пристрою та його функціонування в умовах реального експерименту.

Приведено результати експериментальної перевірки можливості методу з метою підтвердження правильності математичних розрахунків а також визначення можливих напрямків розвитку даного підходу і шляхи підвищення точності визначення параметрів, що розраховуються. Експериментально отримані дані добре узгоджуються із результатами теоретичних розрахунків.

Використання разом із мішеневим обладнанням запропонованої акустичної системи визначення координати влучання дозволяє прискорити процес навчання з вогневої та тактичної підготовки та покращує засвоєння навчального матеріалу. Прискорює аналіз результатів виконання вправ та дозволяє зменшити витрати боєприпасів в процесі навчання. Аналіз балістичної звукової хвилі кулі, з метою визначення координати траєкторії польоту кулі, можливий для використання як в навчальному процесі військовослужбовців так і під час виконання бойових завдань.

Ключові слова: балістична звукова хвиля, конус Маха, мішеневе обладнання, аналіз звукової хвилі

Постановка проблеми

Вторгнення збройних сил російської федерації на територію України викликало необхідність в короткі терміни мобілізувати і підготувати велику кількість військовослужбовців. Для виконання цього завдання необхідно обладнати значну кількість навчальних місць і забезпечити швидке та ефективне навчання в процесі виконання вправ з вогневої та тактичної підготовки. Існуюче мішеневе обладнання з фіксацією влучання в ціль і опусканням мішені може тільки зафіксувати факт влучання або невлучання. Такий підхід не дає можливість покращити навички прицілювання, якщо всі мішені вражені. А саме, в більшості випадків неможливо оперативно отримати інформацію про те, в яку точку відбулось влучання без візуального огляду мішеней. Ще більша проблема постає, коли влучання не відбулось. У такому випадку взагалі невідомо, в якому напрямку полетіла куля і як провести коректування. Для стрільців-початківців це особливо важлива проблема. Крім того до проблеми недосконалості особистих навичок стрільця додаються ще можливі технічні проблеми зі зброєю. У випадку численних невлучань у мішень провести аналіз якості стрільби та внести відповідні коректування взагалі неможливо.

Існуюче сучасне обладнання з покращеними можливостями аналізу якості стрільби є дороговартісним та потребує відповідної інфраструктури ділянок для польових навчань.

Таким чином, гостро постає питання термінової модернізації існуючого навчального обладнання в умовах обмеженого фінансування та ресурсних можливостей для покращення навчальної бази.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існуюче обладнання для візуалізації виконання вправ з вогневої підготовки у вигляді паперових мішеней хоча і є найбільш дешевим, особливо на початковому етапі впровадження та все ж таки не відповідає вимогам сучасних програм навчання, оскільки передбачає після кожного виконання вправи вихід в поле, для візуальної оцінки результатів стрільби. Такий метод може лише обмежено використовуватись для стрільби на невелику віддаль, інакше час на переміщення до мішені і назад на вогневу позицію стає неприпустимо тривалим.

Вогневі вправи зі стрілецької зброї передбачають виконання стрільби по мішенях на відстань понад 300 м. В таких умовах використання даного методу стає недоцільним [1-4].

Мета статті – дослідження технічної можливості використання обладнання на основі системи жорстко зв'язаних мікрофонів для фіксування балістичної хвилі кулі і подальшого аналізу сигналу за допомогою цифрового осцилографа і персонального комп'ютера для визначення траєкторії польоту кулі і точки влучання у мішень чи прольоту повз неї. Можливість аналізу траєкторії кулі, що не влучили у мішень, є особливо вагомим перевагою.

Проаналізовані В літературі розроблено методи визначення джерела пострілу на основі реєстрації різниці часу реєстрації звукової хвилі [5-7].

У роботі, на відміну від існуючих систем і методів, де визначається точка вильоту кулі нами розроблена методика та запропонована фізична модель визначення точки влучання та визначення траєкторії польоту кулі за допомогою системи жорстко зв'язаних на спільному штативі мікрофонів, що розміщені у безпечному (захищеному) місці в околі мішені та проведено відповідні теоретичні розрахунки, на основі яких запропоновано алгоритми визначення траєкторії польоту кулі через уявну вертикальну площину, в якій знаходиться мішень. Розглянуто можливості зниження вартості обладнання шляхом використання розповсюджені побутової електроніки (як то мікрофони, планшети та ноутбуки) та матеріалів. Проведено відповідні експерименти та перевірена можливість реалізації запропонованого методу на основі виробів, що випускаються серійно.

Виклад основного матеріалу

Постріл зі стрілецької зброї чи гармати створює в атмосфері як мінімум дві звукові хвилі [8], які можна використати для визначення траєкторії польоту кулі чи снаряда. Звукова хвиля, яка утворюється виходом порохових газів зі ствола гармати, має сферичний фронт і поширюється від зрізу ствола рівномірно в усіх напрямках зі швидкістю звуку, називається дульною звуковою хвилею пострілу (далі - ДЗХ) [1, стор. 34]. Рух снаряда та кулі в повітрі з надзвуковою швидкістю також створює звукову хвилю. Ця звукова хвиля поширюється у вигляді конуса, який називають конусом Маха. Цю звукову хвилю називають балістичною звуковою хвилею снаряда або кулі (далі - БЗХ) [9, стор. 35].

У подальшому, в тексті ми будемо використовувати термін «куля», маючи на увазі «куля» для стрілецької зброї та «снаряд» для гармат.

У роботі для реєстрації звукових хвиль використовується просторова компактна система із шести жорстко зв'язаних мікрофонів на спільному штативі (рис. 1). В залежності від потреб задіюється різна кількість мікрофонів. Для встановлення координат вершини конуса Маха достатньо три мікрофони. Для підвищення точності експериментального визначення ми використовуємо чотири мікрофони.



Рис. 1. Система із шести жорстко зв'язаних мікрофонів на спільному штативі

Збільшення кількості задіяних мікрофонів дозволяє підвищити точність визначення координат кулі за рахунок отримання кількох наборів експериментальних результатів для різних комбінацій з трьох мікрофонів.

У процесі розповсюдження звукова хвиля доходить до кожного з мікрофонів, і таким чином мікрофони реєструють відповідні моменти часу проходження фронту звукової хвилі через них.

Під час загальновійськового бою або польових занять з вогневої підготовки може здійснюватись велика кількість пострілів та підривів боєприпасів а також проліт в атмосфері куль. Всі ці події створюють в атмосфері звукові хвилі, які будуть реєструватися мікрофонами. Необхідно розділяти, до якої звукової хвилі належить факт реєстрації кожним мікрофоном звукового імпульсу. Для вирішення цієї задачі необхідно ідентифікувати пакети звукових імпульсів в межах максимального часу руху звукової хвилі через об'єм простору, обмежений системою мікрофонів, а також розпізнавати звукові імпульси за спектральним складом частот і перевіряти виявлений звуковий фронт на відповідність розрахованій швидкості звуку з виміряною. Звук кулі, що пролітає на невеликій відстані від мікрофона, реєструється ним як звуковий імпульс значної амплітуди і супроводжується шумом із суттєвим вмістом високих частот на відміну від ДЗХ, яка реєструється зі значно більшої віддалі, має значно меншу амплітуду і більш низькі частоти у своєму спектрі.

Більшість стрілецької зброї і гармат стріляє кулями та снарядами з початковою швидкістю, вищою від швидкості звуку [1-4, 10]. Відповідно, спочатку до детектора долітає куля зі своєю БЗХ, і тільки через деякий час реєструється ДЗХ. Зрозуміло, що у випадку, коли швидкість кулі падає настільки, що виявляється меншою від швидкості звуку, ДЗХ може випередити кулю. Але у такому випадку куля не створюватиме БЗХ, і такий випадок ми не розглядаємо. Ми також не будемо розглядати постріли,

де початкова швидкість кулі, снаряда, пострілу чи ракети нижче швидкості звуку, які теж не створюють БЗХ.

Для визначення траєкторії кулі методом аналізу БЗВ розмістимо систему мікрофонів в околі мішені, перед нею. Куля, рухаючись назустріч мішені, створює в атмосфері за собою звукову хвилю у вигляді конуса Маха.

Виберемо праву прямокутну Декартову систему координат так, що її вісь X спрямована паралельно горизонтальному напрямку траєкторії кулі, назустріч польоту кулі. Вісь Y знаходиться у горизонтальній площині перпендикулярно площині траєкторії кулі, а вісь Z , відповідно, спрямована вертикально вгору. Центр системи координат розташований в центрі системи мікрофонів, показаної на рис. 1.

Завдяки настільності траєкторії сучасної стрілецької зброї на відстанях до 500 м, а для гармат – на відстані до 1500 м кут падіння, а отже, і відхилення траєкторії польоту кулі від напрямку на точку, з якої був здійснений постріл, є меншим від одного градуса [1-4, 10], і, таким чином, можна вважати з прийнятним наближенням, що куля летить вздовж прямої лінії.

Швидкість кулі в околі мішені визначається з балістичних таблиць зброї, що використовується відповідно до відстані, з якої виконується постріл.

Координати кулі в залежності від часу в районі мішені в такій системі координат наближено мають таку аналітичну форму

$$[X_0 - VT; Y_0; Z_0], \quad (1)$$

де X_0, Y_0, Z_0 – координати кулі в початковий час $T=0$; V – швидкість кулі, T – момент часу, в який визначаються координати кулі.

Для того, щоб отримати рівняння поверхні балістичної звукової хвилі, що рухається за кулею, розглянемо конус із вершиною у початку координат, а його вісь збігається з віссю X . Такий конус описується рівнянням [10, с 93]

$$-\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{S^2} + \frac{z^2}{T^2} = 0, \quad (2)$$

де S і T відповідно півосі еліптичного перерізу в площині YZ на відстані R вздовж осі X

Важливо зауважити, що рівняння (2) описує двосторонній конус, симетричний відносно початку координат в обидва боки вздовж осі X . Реальний балістичний конус формується лише в один бік позаду від кулі. Відповідно вводиться умова

$$X > 0. \quad (3)$$

Отже, всі точки, що належать поверхні конуса, будуть мати координату X , більшу, ніж координата X вершини конуса.

Крім того, слід зауважити, що БЗХ розповсюджується з однаковими швидкостями у вертикальній та горизонтальній площинах. Тобто, конус є круговим, і, відповідно, параметри S і T є рівними між собою [10, с 93], тому вираз (2) набуває вигляду

$$-\left(\frac{T}{R}\right)^2 \times X^2 + Y^2 + Z^2 = 0, \quad (4)$$

Якщо розглянути переріз конуса площиною, що проходить через вісь конуса, то отримаємо прямокутний трикутник з катетами R та T (рис. 2). Кут конуса α задається відношенням протилежного катета до прилеглого, що є рівним $\operatorname{tg} \alpha$. Із аероакустики [12, с. 55] відомо, що кут конуса Маха визначається за формулою

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{M} = \arcsin \frac{C}{V},$$

де C – швидкість звуку, V – швидкість руху тіла (тут – кулі) в атмосфері, M – число Маха.

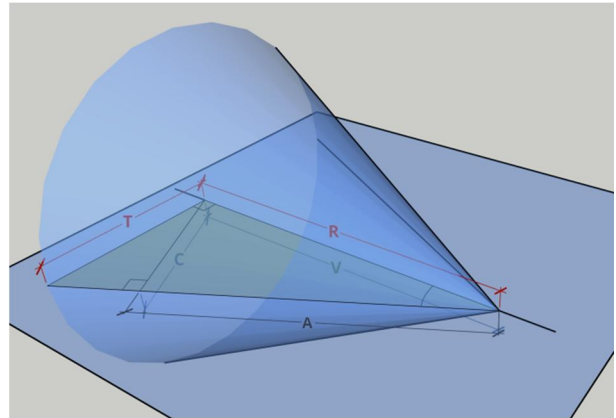


Рис. 2. Схематичне зображення конуса Маха

Із рис. 2 отримуємо

$$\frac{T}{R} = \frac{C}{V} = \frac{C}{\sqrt{V^2 - C^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{V^2}{C^2} - 1}} = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}},$$

Підставивши це рівняння у рівняння (2), отримаємо рівняння поверхні конуса Маха в Декартовій системі координат у залежності від числа Маха у формі

$$-\frac{X^2}{\sqrt{M^2 - 1}} + Y^2 + Z^2 = 0,$$

Із цього виразу видно, що такий підхід не може бути використаний для куль із дозвуковою швидкістю.

Конус Маха у вибраній системі є рухомих. Вісь X збігається з вектором швидкості кулі і, відповідно, із віссю конуса Маха. Така поверхня описується виразом

$$\frac{(X - X_0 + VT)^2}{\sqrt{M^2 - 1}} + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2 = 0, \quad (5)$$

Умова (3) набуває форми

$$X > X_0 - VT, \quad (6)$$

Конус Маха, рухаючись в бік мішені і системи мікрофонами, в певний момент часу починає досягати точок, в яких розміщені мікрофони. В момент часу, коли БЗХ і мікрофон з номером n перетинаються і фіксується звуковий імпульс, ми будемо мати координати точки, яка належить конусу Маха. Координати мікрофона X_n, Y_n, Z_n відомі, а T_n – це час, коли мікрофон зафіксував перетин з конусом Маха.

Таким чином можна визначити координати трьох точок, які належать конусу Маха, і скласти систему з трьох рівнянь другого степеня, підставивши замість X, Y, Z, T у рівняння конуса (5) значення координат і часу реєстрації імпульсу кожним мікрофоном X_n, Y_n, Z_n, T_n .

$$\begin{cases} \frac{(X_1 - X_0 - VT_1)^2}{\sqrt{M^2 - 1}} + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2 = 0 \\ \frac{(X_2 - X_0 - VT_2)^2}{\sqrt{M^2 - 1}} + (Y_2 - Y_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2 = 0 \\ \frac{(X_3 - X_0 - VT_3)^2}{\sqrt{M^2 - 1}} + (Y_3 - Y_0)^2 + (Z_3 - Z_0)^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Для зручності розв'язання системи рівнянь (7) вводим наступні змінні:

$$\begin{aligned} n &= (1, 2, 3) \\ X_{n,1} &= 2K^2 X_n \\ Y_{n,1} &= -2Y_n \\ Z_{n,1} &= -2Z_n \\ M_{n,1} &= -K^2 X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2 \\ m &= (1, 2) \\ Y_{1,2} &= (Y_{1,1} - Y_{2,1})(X_{2,1} - X_{3,1}) \\ Z_{1,2} &= (Z_{1,1} - Z_{2,1})(X_{2,1} - X_{3,1}) \\ M_{1,2} &= (M_{1,1} - M_{2,1})(X_{2,1} - X_{3,1}) \\ X_{2,2} &= (X_{2,1} - X_{3,1})(X_{1,1} - X_{2,1}) \\ Y_{2,2} &= (Y_{2,1} - Y_{3,1})(X_{1,1} - X_{2,1}) \\ Z_{2,2} &= (Z_{2,1} - Z_{3,1})(X_{1,1} - X_{2,1}) \\ M_{2,2} &= (M_{2,1} - M_{3,1})(X_{1,1} - X_{2,1}) \\ Z_{1,3} &= -\frac{Z_{1,2} - Z_{2,2}}{Y_{1,2} - Y_{2,2}} \\ M_{1,3} &= -\frac{M_{1,2} - M_{2,2}}{Y_{1,2} - Y_{2,2}} \\ Z_{2,4} &= Z_{1,3} Y_{2,2} + Z_{2,2} \\ M_{2,4} &= M_{1,3} Y_{2,2} + M_{2,2} \\ Z_{3,4} &= 2Z_{1,3} M_{1,3} + Z_{1,3} Y_{3,1} + Z_{3,1} \end{aligned}$$

$$M_{3,4} = M_{1,3} + M_{1,3} Y_{3,1} + M_{3,1}$$

$$Z_{2,5} = -\frac{Z_{2,4}}{Z_{2,2}}$$

$$M_{2,5} = -\frac{M_{2,4}}{X_{2,2}}$$

$$A = -K^2 Z_{2,5}^2 + Z_{1,3}^2 + 1$$

$$B = -2K^2 Z_{2,5} M_{2,5} + Z_{2,5} X_{3,1} + Z_{3,4}$$

$$C = -K^2 M_{2,5}^2 + X_{3,1} M_{2,5} + M_{3,4}$$

$$D = B^2 - 4AC$$

Розв'язок системи рівнянь (7) має вигляд:

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{-B \mp \sqrt{D}}{2A} \\ X_0 = Z_0 Z_{2,5} + M_{2,5} \\ Y_0 = Z_0 Z_{1,3} + M_{1,3} \end{cases}$$

Таким чином, отримуємо корені X_0, Y_0, Z_0 , які є координатами вершини конуса в початковий момент часу $T=0$ а отже, і координати кулі в будь-який час T , які можна визначити із виразу (1).

Важливо також зауважити, що при $D > 0$ система має 2 розв'язки, оскільки це система рівнянь другого степеня. Для визначення, який із двох розв'язків має фізичний зміст, введемо додаткові умови до умови (6). А саме: приймаємо лише такий розв'язок, для якого:

$$X_0 < X_n + VT_n$$

для всіх $n = (1, 2, 3)$. Така умова зумовлена тим, що конус Маха може формуватись лише позаду кулі. Крім того, якщо мікрофони знаходяться на рівні землі відповідно $Z_0 > 0$, оскільки, фізично куля не може створювати балістичну звукову хвилю, рухаючись під поверхнею землі.

Для підвищення точності, можна використовувати більше, ніж три мікрофони і розв'язувати систему рівнянь для різних комбінацій з трьох мікрофонів. Розв'язки, які мають фізичний зміст, повинні відповідати близьким (приблизно тим самим) точкам у просторі.

Для перевірки адекватності моделі та отриманих математичних алгоритмів було проведено випробування в умовах полігону. Система мікрофонів була розміщений на відстані 200 м від місця здійснення пострілу. Постріл здійснювався зі снайперської гвинтівки СВД. Швидкість кулі на такій відстані згідно з балістичними таблицями [3] складає 685 м/с, Сигнал з мікрофонів записувався багатоканальним USB осцилографом з частотою 125 кГц у кожному каналі. Осцилограми звукових сигналів, зареєстрованих мікрофонами 1, 2, 5, 6 (див. відповідні позначення на рис. 1) показано на рис. 3.

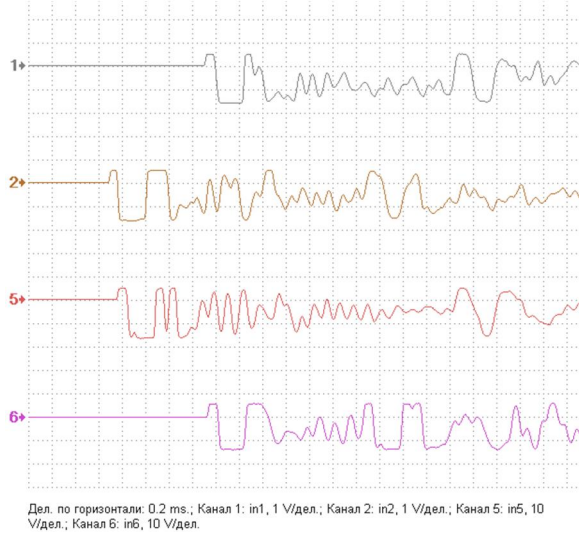


Рис. 3. Осцилограми звукових сигналів балістичної хвилі, зареєстрованих мікрофонами 1, 2, 5, 6 (див. рис. 1)

Просторові координати мікрофонів у вибраній системі координат та часи реєстрації ними балістичної звукової хвилі подано в Таблиці 1.

Таблиця 1

Просторові координати мікрофонів і час реєстрації балістичної звукової хвилі у вибраній системі координат

Мікрофон	X, м	Y, м	Z, м	T, с
Канал 1	-0.1528	0.1979	0.0015	0.000824
Канал 2	0.1551	-0.1961	0.0015	0.000000
Канал 5	-0.0003	-0.0021	0.2500	0.000072
Канал 6	-0.0003	-0.0021	-0.2500	0.000840

Для визначення координати кулі в умовний момент часу $T=0$ треба підставити координати трьох мікрофонів і відповідний час в систему рівнянь (7) і розв'язати її. Розв'язки системи рівнянь (7) для експериментально отриманих даних від мікрофонів 1, 2, 5, 6 (див. позначення показаних на рис. 1) наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2

Розв'язки системи рівнянь (7) для експериментально отриманих даних від мікрофонів 1, 2, 5, 6, показаних на рис. 1

Мікрофони			X	Y	Z
			Розв'язок 1		
			Розв'язок 2		
			1	2	5
-0.27	-0.12	0.19			
1	2	6	0.79	0.11	-0.19
			-0.2	-0.1	0.18
1	5	6	0.71	0.06	-0.14
			-0.1	-0.08	0.14
2	5	6	1.04	0.22	-0.25
			-0.32	-0.14	0.22

У цій таблиці жирним шрифтом виділено розв'язки, які для часу $T=0$ відповідають координатам кулі, що уже пролетіла повз систему мікрофонів, тобто відповідають конусу позаду кулі, і, відповідно, звук кулі міг бути зареєстрований мікрофонами. Значення, позначені нежирним курсивом, відповідають нефізичному розв'язку для конуса попереду кулі, що означає, що куля ще не долетіла до мікрофонів.

Середнє значення допустимих розв'язків для чотирьох наборів даних дає такі координати кулі (в метрах):

$$[-0.22; -0.11; 0.18].$$

Отже, в момент часу $T=0$, коли мікрофон «2» зареєстрував звукову балістичну хвилю, куля пролетіла 11 см лівіше, 22 см вище та 18 см глибше відносно центру системи мікрофонів, показаної на рис. 1.

Система мікрофонів, показана на рис. 1, є універсальною конструкцією, яка використовується нами для різноманітних задач, у тому числі для визначення координат пострілу та ідентифікації зброї, з якої проведено постріл.

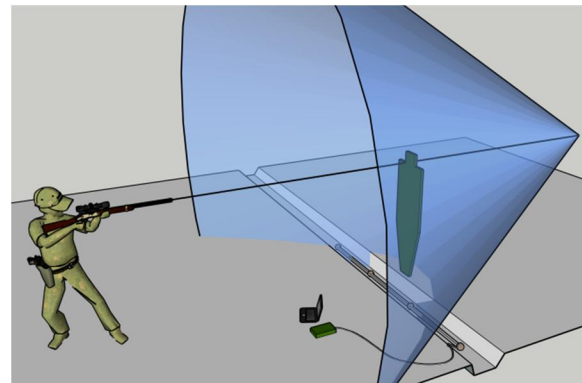


Рис. 4. Розміщення мікрофонів реєстрації БЗХ в траншеї перед мішенню

Специфічно ж для задачі влучання у мішень систему мікрофонів можна спростити, виконавши її у формі горизонтальної жорсткої балки, на якій з певним кроком розміщені мікрофони, як показано на рис. 4. Мінімальна кількість – 4 шт. Балка розміщується перед мішеневим обладнанням на рівні землі або може бути розміщена в неглибокій, але широкій траншеї з метою уникнення пошкодження обладнання кулями під час виконання вправ з вогневої підготовки. Така конструкція дозволяє легко транспортувати вимірювальне обладнання як в пішому порядку, так і на легковому чи вантажному транспорті. Реєструюче обладнання може бути розміщено на вогневій позиції або позаду неї і з'єднане з мікрофонами кабелем. Для зменшення рівня завад рекомендовано використовувати кабель з декількома витими парами. Такий кабель при відносно невеликій вартості і доступності забезпечуватиме захист

від завод і передачу сигналів на значну відстань. Живлення мікрофонів буде відбуватися по цьому ж кабелю. В якості реєструючого обладнання може бути використаний цифровий USB осцилограф. Обробка та відображення інформації відбувається на ноутбучі.

Висновки

У роботі запропоновано схему компактної акустичної системи на основі мікрофонів для аналізу балістичної звукової хвилі кулі, яка відрізняється від схем, які раніше використовувались на основі рознесених звукових баз. Запропонована схема також відрізняється від систем антиснайперської боротьби. Перевагою використання прямого розрахунку координат кулі є можливість визначення траєкторії польоту кулі. Це надає можливість визначення точки влучання при використанні в якості мішеневого обладнання, навіть якщо мішень є віртуальною.

Під час ведення бойових дій такий підхід дозволить розрізняти цілі по важливості. Відкривається можливість розрізняти цілі, які ведуть вогонь безпосередньо по нашому підрозділу або навіть моделювати можливі ураження і в реальному часі отримувати інформацію щодо нашого ураження і прогнозувати подальшу можливість виконання бойового завдання.

Проведена експериментальна перевірка підтверджує адекватність фізичної моделі та теоретично виведених алгоритмів розрахунку координат кулі. Запропонований підхід до аналізу БЗК з метою визначення траєкторії польоту кулі може бути використаний для як у навчальному процесі військовослужбовців, так і під час виконання бойових завдань. А саме, використання запропонованої акустичної схеми та відповідних алгоритмів розрахунку дозволяє прискорити процес навчання з вогневої та тактичної підготовки та покращує засвоєння навчального матеріалу, а також прискорює аналіз результатів стрільби та дозволяє зменшити витрати боєприпасів як у процесі навчання так і при виконанні бойових вогневих задач.

Список літератури

1. Наставление по стрелковому делу 7,62-мм модернизированный автомат Калашникова (АКМ и АКМС). Киров. 2015.
2. Настанова зі стрілецької справи. 5,45-мм автомати Калашнікова (АК-74, АКС-74, АК-74Н, АКС-74Н) та 5, 45-мм ручні кулемети Калашнікова (РПК-74, РПКС-74, РПК-74Н, РПКС-74Н). Київ: МО. 2005р. 172с.
3. Наставление по стрелковому делу 7,62-мм снайперская винтовка Драгунова (СВД). Издание второе, дополненное. москва, Воениздат. 1976. 176 с.
4. Руководство по 12,7-мм пулемету «Утес» (НСВ-12,7). москва. Воениздат. 1978, 116 с.

5. Kam W. Lo, Brian G. Ferguson, Localization of small arms fire using acoustic measurements of muzzle blast and/or ballistic shock wave arrivals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Volume 132, Issue 5. 2997. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4757737>

6. Murray S. Korman and Antal A. Sarkady. Ballistic shock wave localization estimation of shooter position and velocity using difference of time of arrival DTOA algorithm in orthogonally arranged discrete acoustic arrays. *Proceedings of Meetings Acoustics*. Volume 19, Issue 1. URL: <http://acousticalsociety.org/> 19, 045070 2013. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4799802>

7. Kam W. Lo; Brian G. Ferguson, A ballistic model-based method for ranging direct fire weapons using the acoustic muzzle blast and shock wave. *IEEE 2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. 2008. Sydney. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2008.4762030>

8. Гапі С. Сетлс. High-speed Imaging of Shock Waves, Explosions and Gunshots Високошвидкісна візуалізація ударних хвиль, підривів і пострілів. 2006. *American scientist*. Volume 94, Issue 1. p. 22. URL: <https://www.americanscientist.org/article/high-speed-imaging-of-shock-waves-explosions-and-gunshots>

9. О. Красюк, Р. Сергієнко, С. Соколовський, В. Корольов, О. Коцемир, А. Шерба. Артилерійська звукова розвідка. Підручник. Львів: Національна академія сухопутних військ. 2020. 346 с.

10. Таблицы стрельбы для равнинных и горных условий 125-мм танковой пушки Д-81 (2А46М, 2А46М-1). Бронепойные подкалиберные снаряды ЗБМ9 (ЗБМ12), ЗБМ15, ЗБМ22, ЗБМ26 и ЗБМ29. Кумулятивные снаряды ЗБК12 (ЗБК12М), ЗБК14 (ЗБК14М) и ЗБК18 (ЗБК18М) Практический кумулятивный снаряд ЗП11. Осколочно-фугасные снаряды ЗОФ19 и ЗОФ26. Издание второе, исправленное и дополненное. москва. Военное издательство. 1987. 168 с.

11. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. москва. Наука. 1973. 832 с.

12. Аэроакустика, Мэрвин Е. Голдстейн. Перевод с английского Р.К. Каравосова и Г.П. Караушева. москва. Машиностроение. 1981.

References

1. (2015), "Nastavlenie po strelkovomu delu 7.62-mm modernizirovannuy avtomat Kalashnikova (AKM i AKMS)" [Instruction on shooting 7.62-mm modernized Kalashnikov assault rifle (AKM and AKMS)]. Kirov. [in Russian]
2. (2005), "Nastanova zi strileckoi spravy. 5.45-mm avtomaty Kalashnikova (AK-74, AKS-74, AK-74N, AKS-74N) ta 5, 45-mm ruchni kulemety Kalashnikova (RPK-74, RPKS-74, RPK-74N, RPKS-74N)" [Instruction on shooting 5.45-mm Kalashnikov assault rifles (AK-74, AKS-74, AK-74N, AKS-74N) and 5.45-mm Kalashnikov machine guns (RPK-74, RPKS-74, RPK-74N, RPKS-74N)]. Київ: МО. 172с. [in Ukrainian]
3. (1976), "Nastavlenie po strelkovomu delu 7,62-mm sniperskaya vintovka Dragunova (SVD). Izdanie vtoroe, dopolnennoe" [Instruction on shooting 7,62-mm sniper rifle Dragunov (SVD). Second edition, corrected]. moscow, Voenizdat. 176 p. [in Russian]

4. (1978), "Rukovodstvo po 12,7-mm pulemetu «Utes» (NSV-12,7)" [Instruction on shooting 12,7-mm machine gun «Utes» (NSV-12,7)]. Moscow. Voentizdat. 116c.
5. Kam W. Lo and Brian G. Ferguson. (2012), Localization of small arms fire using acoustic measurements of muzzle blast and/or ballistic shock wave arrivals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Volume 132, Issue 5. 2997. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4757737>
6. Murray S. Korman and Antal A. Sarkady. (2013), Ballistic shock wave localization estimation of shooter position and velocity using difference of time of arrival DTOA algorithm in orthogonally arranged discrete acoustic arrays. *Proceedings of Meetings Acoustics*. Volume 19, Issue 1. URL: <http://acousticalsociety.org/> 19, 045070. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4799802>
7. Kam W. Lo and Brian G. Ferguson. (2008), A ballistic model-based method for ranging direct fire weapons using the acoustic muzzle blast and shock wave. *IEEE 2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. 2008. Sydney. DOI: 10.1109/ ISSNIP. 4762030
8. Gary S. Settles. (2006), High-speed Imaging of Shock Waves, Explosions and Gunshots. *American scientist*. Volume 94, Issue 1. p. 22. URL: <https://www.americanscientist.org/article/high-speed-imaging-of-shock-waves-explosions-and-gunshots> DOI: <https://doi.org/10.1511/2006.57.22>
9. O. Krasiuk, R. Sergienko, S. Sokolovskiy, V. Korolev, O. Kocemyr, A. Sherba. (2020), "Artyleriyska zvukova rozvidka" [Artillery sound reconnaissance]. Textbook. Lviv, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy. 346 p. [in Russian]
10. (1987), "Tablicy strelby dlya ravninnuh i gornyh usloviy 125-mm tankovoy pushki D-81 (2A46M, 2A46M-1), Broneboynuye podkalibernuye snaryady 3BM9 (3BM12), 3BM15, 3BM22, 3BM26 i 3BM29. Kumulyativnuye snaryady 3BK12 (3BK12M), 3BK14 (3BK14M) i 3BK18 (3BK18M) Practicheskii kumulyativnuy snaryad ZP11. Oskolochno-fugasnuye snaryady 3OF19 i 3OF26. Izdanie vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe" [Shooting tables for plain and mountain conditions of the 125-mm tank gun D-81 (2A46M, 2A46M-1), Armor-piercing projectiles 3BM9 (3BM12), 3BM15, 3BM22, 3BM26 and 3BM29. HEAT shells 3BK12 (3BK12M), 3BK14 (3BK14M) and 3BK18 (3BK18M) Practical HEAT projectile ZP11. High-explosive fragmentation shells 3OF19 and 3OF26. Second edition, corrected and enlarged]. moscow, Military publishing. [in Russian]
11. G. Korn and T. Korn, (1973), "Spravocnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzenеров" [Handbook of Mathematics for Scientific Workers and Engineers]. moscow, Nauka. 832 p. [in Russian]
12. Marvin E. Goldstein. (1981), "Aeroakustika" [Aeroacoustics]. Translation from English by R.K. Karavosov and H.P. Karaushev. moscow, Machinebuilding. [in Russian]

ANALYSIS OF THE BALLISTIC SOUND WAVE OF THE BULLET TO DETERMINE THE POINT OF HITTING THE TARGET

A.V. Shulgin, O.V. Tymoschuk, D.Ye. Khaustov, O.O. Burashnikov, D.V. Vilgush, Yu.A. Nastishin

Development of armament and training military equipment aimed to improve the support of units as well as to speed up and improve the quality of training of military personnel are the tasks that remains important and gained special priority in the conditions of war. The study of existing technologies and methods for improving the processes of training and conducting combat shows that a promising direction in this regard is the analysis of the sound field to obtain detailed information about the events on the battlefield or at the place of firing and tactical training classes.

The analysis of the sound field during the flight of the bullet is important both for use in the educational and training process as well as during the performance of combat missions. The great advantage of such methods is the relative simplicity, low cost of equipment and the absence of unmasking factors in the form of electromagnetic radiation from various spectral ranges. Another advantage is the ability to modernize existing equipment and weapons without the need to make drastic changes to the design and operation scheme of used armament and equipment.

The paper proposes a method for the determination of the trajectory of a bullet or projectile to establish the point of impact or to determine the direction of deviation from the real or training target in the case of a failed shot. Mathematical algorithms obtained on the basis of the proposed physical model for detecting the flight of a bullet in the vicinity of a system of microphones located near the target, compactly placed at certain distances from each other on a rigid tripod, are presented. An analysis of the technical possibility of implementing the corresponding device and its functioning in the conditions of a real experiment was carried out.

The results of the experimental verification of the capability of the method are presented in order to confirm the correctness of the mathematical calculations, as well as to determine the possible directions of development of the approach and the ways of increasing the accuracy of the determination of the calculated parameters. The experimentally obtained data agree well with the results of theoretical calculations.

Employment of the proposed acoustic system for the determination of the coordinate of the target hitting point together with the traditional target equipment allows one to enhance the training process in firing and tactical training as well as improves the learning of the training issues. It also shortens the time needed for the analysis of the results of the shooting exercises and allows one to reduce the consumption of ammunition in the training process. The analysis of the ballistic sound wave of a bullet, in order to determine the coordinates of the bullet flight path, can be used in the training process of military personnel and during real battles.

Keywords: Ballistic sound wave, Mach cone, target equipment, sound wave analysis-