

DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.13.2.13-22>

УДК 621.391.2:621.372.54:550.83

**В.В. Орлов**, к.т.н., доц.**Р.В. Лукаш****Л.П. Папуша***Військова академія (м. Одеса), Україна*

## **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗВУКОВОЇ ЛОКАЦІЇ В ЗАДАЧАХ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ПОСТРІЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ**

*Досліджено ефективність виявлення і визначення класу вогнепальної зброї, як джерела випромінювання акустичного сигналу. Запропоновано метод побудови багатоканальної системи спільного виявлення і розпізнавання звукових сигналів, заснованої на оптимальних фільтрах з подальшими схемами відбору максимуму і порівняння з пороговим рівнем. Проведено дослідження ефективності та визначено вимоги до параметрів детектора, а також фільтрів оптимальної і узгодженої обробки.*

**Ключові слова:** виявлення, розпізнавання, оптимальна обробка, узгоджений фільтр, пасивна звукова локація, роботизовані розвідувальні комплекси.

### **Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В даний час на озброєнні провідних країн світу знаходяться звукометричні розвідувальні комплекси, які відносяться до класу високоточних засобів ведення війни і призначені для визначення координат снайперів, вогневих позицій артилерійських гармат і мінометів [1, 2]. Основною перевагою таких пасивних систем локації є захищеність від засобів радіоелектронної боротьби, незалежність від умов видимості. В умовах бойової обстановки із застосуванням противником різномірних завад проводиться комбінація основних систем моніторингу (радіоелектронної розвідки, РЛС, відеокамер, тепловізорів) з додатковими пасивними системами (звуколокаторами, сейсмолокаторами), які виконують аналогічні функції [3]. В даний час спостерігається тенденція встановлення пасивних систем звукової локації на машини супроводу важливих вантажів, БПЛА, роботизовані розвідувальні комплекси [4]. Пропонується один із шляхів високоточного визначення координат, оперативного виявлення і розпізнавання зброї, забезпечення миттєвої реакції на напад. Він полягає в глибинному висуванні роботизованих розвідувальних комплексів, що дозволяє створити реконфігуровану сенсорну мережу між ними, розподілену на сотні метрів, тактико-технічні характеристики якої перевершують існуючі звукометричні розвідувальні комплекси. При цьому алгоритми розпізнавання зброї потребують удосконалення, зокрема, через недостатню базу експериментальних даних для побудови еталонних сигналів класів вогнепальної зброї.

Традиційно прийнято, що задачі виявлення в умовах завад і розпізнавання досліджувалися окремо, для кожної з яких розроблені оптимальні алгоритми відповідно до заданих критеріїв якості [5]. Однак в існуючих розробках пасивної звукової локації відсутні дані про застосування оптимальних фільтрів, що дозволяють накопичувати відліки сигналів і пригнічувати завади. В даній статті досліджується проблема спільного виявлення-розпізнавання із застосуванням еталонних сигналів, створених із аудіозаписів пострілів для різних класів зброї. Розглядається вплив багатопікової структури вихідного сигналу на прийняття хибних рішень.

Синтез системи спільного виявлення і розпізнавання.

Для вибору алгоритмів розпізнавання пострілів в повітряному середовищі слід враховувати ряд особливостей. В умовах акустичних завад (від безперервно працюючих механізмів і імпульсів поривів вітру) необхідно, щоб системи розпізнавання не допускали хибних рішень коли на вході присутні тільки завади. У зв'язку з цим при побудові системи розпізнавання потрібно проводити виявлення сигналів і придушення завад на основі фільтрів, які враховують форму можливих сигналів

і параметри завад, що змінюються [6]. Для розпізнавання використовуються еталонні сигнали, розроблені на основі експериментальних даних. Вони містять тимчасові відліки, що визначають форму сигналу, характерну для кожного класу. Зауважимо, що сигнали, які приймаються, не є повністю відомими, так як форма еталону визначена приблизно, а амплітуда сигналу невідома.

Уявімо вибірку вхідного процесу у вигляді вектору  $Y = X + S_i$  розміру  $N$  адитивної суміші сигналу  $S_i$  із завадою  $X$  і розглянемо  $M$  класів  $\omega_1 \dots \omega_M$  сигналів, що приймаються, які описуються густинами нормального розподілу [7]

$$p(X, \omega_i) = (2\pi)^{-n/2} |R_i|^{-1/2} \exp\left[-0,5(X - S_i)^T R_i^{-1} (X - S_i)\right], i = \overline{1, M},$$

де кожна густина розподілу повністю визначається вектором еталону  $S_i$  і коваріаційною матрицею  $R = \overline{XX^T}$  розміру  $N * N$ ,  $|R|$  – визначник коваріаційної матриці.

Розглядається випадок, коли потрібно визначити наявність на вході будь-якого із сигналів і вказати, який з можливих сигналів присутній. Для вирішення завдання з мінімальною ймовірністю похибки слід порівнювати між собою зворотні ймовірності всіх можливих сигналів і вибирати той сигнал, зворотна ймовірність якого виявляється найбільшою. Належить вважати всі похибки однаково небезпечними, тобто важливості каналів однаковими, а використання монотонності функції від зворотної ймовірності дозволяє для гаусовських сигналів звести обробку до безлічі лінійних вирішувальних статистик [6, 7]

$$d_i(Y) = S_i^T R^{-1} Y - 0,5 S_i^T R^{-1} S_i, \quad i = \overline{1, M} \quad (1)$$

де  $S_i = q S_{0i}$ ,  $S_{0i} = S_i / (S_i^T S_i)^{1/2}$  вектори розміру  $N$  відповідно очікуваного сигналу і нормованого еталонного сигналу;  $q$  – амплітудний – множник при нормованому еталоні. Так як дальність між джерелом сигналу й сенсором невідома, то виникають труднощі через відсутність інформації про амплітудний множник  $q$ . Для визначення вирішувальної статистики  $d$  при невідомому  $q$  застосуємо адаптивний баєсів підхід [6]. Він складається з підстановки  $S_i = \hat{q} S_{0i}$  в (1) і визначення екстремуму, який доставляє оцінку  $\hat{q}$  максимальної правдоподібності

$$\partial d_i / \partial \hat{q} = \partial \{ \hat{q} S_{0i}^T R^{-1} Y - 0,5 \hat{q}^2 S_{0i}^T R^{-1} S_{0i} \} / \partial \hat{q} = 0, \quad \hat{q} = S_{0i}^T R^{-1} Y / S_{0i}^T R^{-1} S_{0i}. \quad (2)$$

Після підстановки оцінки  $\hat{q}$  (2) в (1), отримаємо з точністю до постійного множника 0,5 вирішувальну статистику

$$d_i(Y) = (W_i^T Y)^2, \quad \text{где } W_i = R^{-1} S_{0i} / (S_{0i}^T R^{-1} S_{0i})^{0,5} \quad (3)$$

Отримана вирішувальна статистика (3) має наступні властивості:

1. За відсутності корисних сигналів ( $d_i(Y = X)$ ) досягається стабілізація потужності на виходах всіх каналів  $\sigma_i^2 = W_i^T R W_i = S_{0i}^T R^{-1} R R^{-1} S_{0i} / S_{0i}^T R^{-1} S_{0i} = 1$ , що дозволяє при виявленні скористатися одним пороговим рівнем для всіх каналів.

2. При наявності сигналу ( $d_i(Y = S_i)$ ), відгук відповідного йому каналу є максимальним

$$d_i(Y = S_i) - d_j(Y = S_i) > 0, \quad i \neq j. \quad (4)$$

В цьому не важко переконатися, якщо  $d_i(Y = S_i) = S_i^T R^{-1} S_i$ ,  $d_j(Y = S_i) = S_j^T R^{-1} S_i / S_j^T R^{-1} S_j$  підставити в (4) та помножити обидві частини нерівності на  $S_j^T R^{-1} S_j > 0$ , то приходимо до нерівності Коши-Шварца  $S_i^T R^{-1} S_i * S_j^T R^{-1} S_j - (S_j^T R^{-1} S_i)^2 \geq 0$ .

При синтезі належало, що  $-\infty < q < \infty$ , хоча на основі апріорної інформації досить прийняти  $q \geq 0$ . Тоді не потрібно піднесення до другого степеня  $d_i(3)$ , а остаточно достатня статистика має вигляд

$$d_i = S_{0i}^T R^{-1} Y / (S_{0i}^T R^{-1} S_{0i})^{0.5} \quad \text{чи} \quad d_i = W_i^T Y, \quad (5)$$

а алгоритм виявлення-розпізнавання при перевищенні порогу полягає у виборі номера каналу з максимальним значенням

$$v = \begin{cases} i, \max d_i \geq c, i = 1, M \\ 0, \max d_i < c, i = 1, M \end{cases} \quad (6)$$

де  $v$  – вихідний сигнал системи,  $c$  – пороговий рівень, який визначає ймовірність хибної тривоги.

Так як досягається стабілізація потужності на виходах всіх каналів  $\sigma_i^2 = 1$ , то вихідне відношення сигнал/завада  $Q$  при цьому визначається тільки сигналом  $Q_i = d_i(S_i)$  на виході свого каналу.

Крім адаптивних фільтрів на практиці широко застосовуються фільтри з постійними ваговими коефіцієнтами, налаштованими на типову заводну обстановку або узгодженими з еталонами. Так, при ігноруванні кореляції завади (зокрема, через відсутність корельованих завод або з метою спрощення обробки) коваріаційна матриця завод має діагональний вигляд  $R = \sigma^2 I_0$  (де  $\sigma^2 = N^{-1} \overline{X^T X}$  – потужність завади), а ваговий вектор (3) спрощується і є узгодженим з еталонним сигналом [6]

$$W_i = S_{0i} \quad (7)$$

Структурна схема спільного виявлення і розпізнавання (6) представлена на рис.1, де  $M$  вирішувальних функцій реалізуються мають вагові коефіцієнти  $W_i = R^{-1} S_{0i} / (S_{0i}^T R^{-1} S_{0i})^{1/2}$  й існують для розпізнавання і виявлення класів з відомими еталонами. Блок оцінки  $\hat{R}$  заводної обстановки відстежує параметри завод: коваріаційну матрицю завод  $R$  для оптимального подавлення завод чи потужність завади  $\sigma^2$  для узгодженої обробки. Після відбору максимуму пороговий пристрій (ПУ) порівнює максимальне значення вирішувальної статистики з порогом  $d_i(Y) > c$ , а вихідний сигнал  $\{0; 1, \dots, M\}$  відповідає виявленому класу зброї.

В реальних умовах прийом сигналів здійснюється в умовах завод з невідомими кореляційними властивостями. У зв'язку з апріорною невизначеністю щодо параметрів завод застосовується вибіркова оцінка коваріаційної матриці завод по  $K$  вибірках розміру  $N$  вхідного процесу за відсутності корисних сигналів (класифікована вибірка). При обробці сигналів в реальному часі відсутня інформація про наявність сигналу у вибірці, в зв'язку з чим необхідно провести дослідження ефективності при оцінюванні завод за некласифікованою вибіркою [7]. Якщо навчання проводиться на коротких інтервалах часу (пориви вітру) та число вибірок менше розміру фільтра  $K < N$ , то для виключення виродженої оцінки матриці  $\hat{R} = \sum_{k=1}^K X_k X_k^T$  застосовується регуляризація вибіркової оцінки коваріаційної матриці [8] з параметром регуляризації  $\alpha > 3\sigma_{avn}^2$ , що перевищує потужність шумів аналогово-цифрового перетворювача  $\hat{R} = \sum_{k=1}^K X_k X_k^T + \alpha I_0$ . Згідно синтезованої вирішувальної статистики (6), в якій можуть застосовуватися вагові вектори для оптимальної (5) і узгодженої обробки (7), проведемо аналіз ефективності системи, представленої на рис.1.

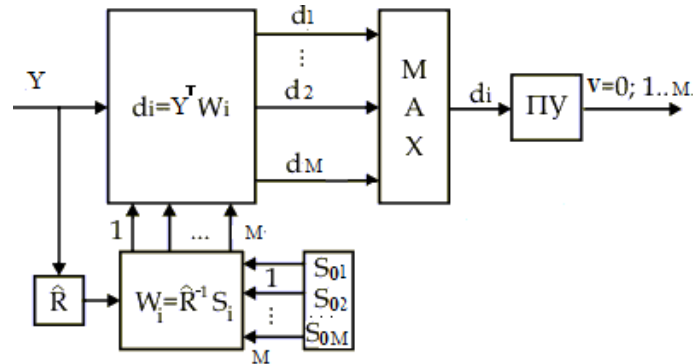


Рис. 1. Схема спільного виявлення і розпізнавання

Моделювання системи за експериментальними даними.

Дослідження ефективності системи виявлення-розпізнавання проводиться в умовах квазістаціонарних вітрових завад на основі вибірок із записів реалізацій різних класів зброї, розташованих за межами видимості щодо акустичних датчиків. Використовується 500 експериментальних вибірок реалізацій, що містять по 1024 відліків, знятих з інтервалом дискретизації часу близько 1 мс. Процедура адаптації (6) проводиться виміром кореляційних властивостей завад на ділянках вибірок не зайнятих корисним сигналом.

Розглянемо проходження сигналів в досліджуваній системі. Вхідна реалізація  $Y$  з елементами  $y_j$  дійсного моменту часу  $j$  проходить через кожний  $i$ -й з  $M$  фільтрів, на виході яких формуються вирішувальні статистики  $d_i(j)$ , після цього проводиться відбір максимального значення з них  $d_{\max}(j)$  і номеру відповідного йому каналу  $V(j)$

$$d_i(j) = \sum_{n=1}^N w_{in} y_{j-n}; \quad d_{\max}(j) = \max_{1 \leq i < M} d_i(j); \quad v(j) = i \text{ для } d_i(j) = d_{\max}(j) \quad (8)$$

Вихідним сигналом системи виявлення-розпізнавання є номер каналу  $i > 0$  у випадку перевищення порогового сигналу. Зауважимо, що при заниженому пороговому рівні  $c < 2$  процес  $V(j)$  на інтервалі, що не зайнятий корисним сигналом, може неодноразово приймати ненульові значення. У зв'язку з цим при розрахунках ефективності розпізнавання системи за експериментальними даними необхідно вибрати глобальний максимум  $d$  за всією вихідною реалізацією  $d = \max d_{\max}(j)$  розміру  $j=1-1024$ , а потім приймати рішення  $v(j)$  до якого класу віднести цю вибірку.

Розглянемо особливості проходження сигналів через різні блоки системи, налаштованої на  $M=4$  класу сигналів. На рис. 2 представлені епюри: вхідного процесу, що містить суміш сигналу 1-го класу з перешкодою (рис. 2а) і суміш сигналу 2-го класу з перешкодою (рис.2б). На рис. 3 представлені сигнали з виходів блоків. На рис. 3 показаний сигнал 1-го класу з виходів чотирьох фільтрів, узгоджених із зразками (7), де пунктирною лінією позначений сигнал 1-го класу з виходу фільтра 2-го класу. На рис. 3б показаний сигнал з виходу схеми відбору максимуму (суцільна лінія), з виходу вирішувального пристрою (штрихова лінія) у вигляді ступінчастої функції номеру каналу розпізнаного класу,  $i$ -ий рівень якої відповідає рішення про наявність  $i$ -го класу, а нульовий рівень – рішення про відсутність сигналу.

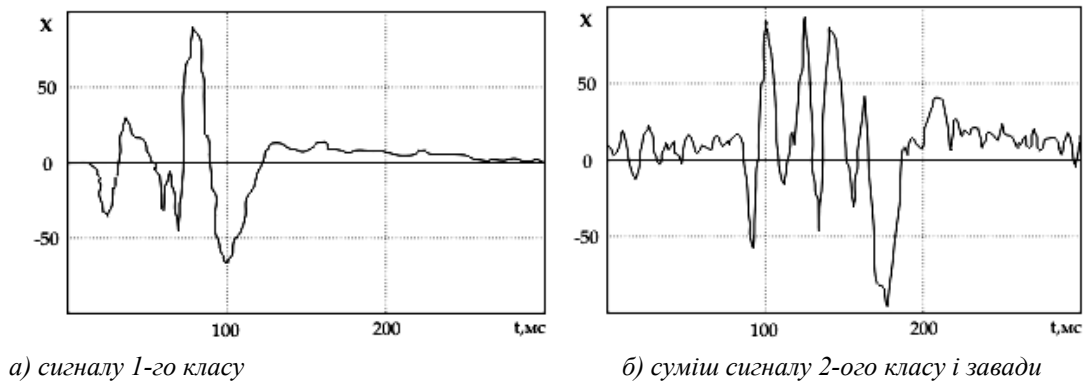


Рис. 2. Епюри вхідного процесу

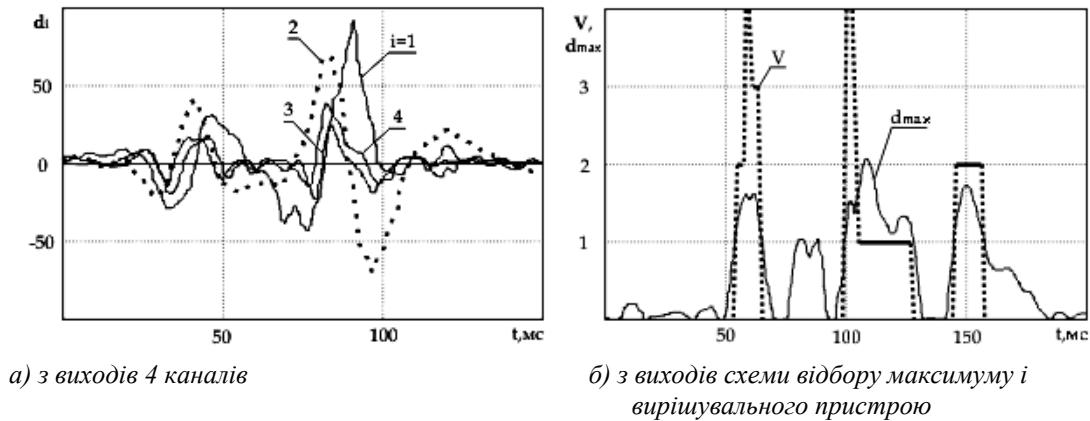


Рис. 3. Епюри сигналу 1-го класу з виходів блоків

Як видно з рис. За рівень бічних піків сигналів у сусідніх каналах хоча і нижче, але зрівнюється з головним піком з виходу фільтра 1-го класу. Середній рівень цих хибних піків істотно перевищує рівень шумів, незначно відрізняється за величиною від фільтра до фільтра, а їх максимальний рівень в сусідніх каналах визначається взаємно кореляційною функцією побудованих еталонів. Отже, синтез еталонів є завданням оптимізації, в якій потрібен відхід від форми узгодженого фільтра для забезпечення низького рівня взаємно кореляційних функцій еталонів. З аналізу рис. 3б випливає, що при заниженому порозі  $c=2$ , коли потужність перешкод оцінювалася за межами області сигналу, розпізнавач іноді приймає неправильні рішення про наявність інших класів (амплітуди помилкових піків перевищують граничний рівень), крім першого. Правильне рішення про наявність сигналу 1-го класу приймається тільки на інтервалі  $t = 110-130$  мс, що містить області високих амплітуд головного піку. Хибні рішення, що перевищують 1, приймаються на інтервалах часу  $t = 55-65$  мс,  $t = 100-110$  мс,  $t = 140-160$  мс. Цим хибні рішення усуваються вибором вищого  $c > 2$  порогу виявлення.

Дослідимо ефективність розпізнавання у випадку узгоджених і оптимальних адаптивних фільтрів. У таблицях 1 і 2 наведені розрахунки ймовірності правильного і хибного розпізнавань, де діагональні елементи таблиць представляють ймовірності правильного розпізнавання, а позадіагональні – ймовірності помилок розпізнавання  $i$ -го класу при наявності на вході  $j$ -го класу. У таблиці 1 наведені результати для ймовірностей  $P_c$  неадаптивної системи (5) узгоджених із зразками фільтрів, в таблиці 2 – для ймовірностей  $P_a$  адаптивної системи (3), що використовує оптимальне подавлення завад. Для аналізу таблиць використовуються узагальнюючі ймовірнісні показники ефективності: середні ймовірності  $\bar{P}$  правильного розпізнавання і середньоквадратичні відхилення  $m_2\{P\}$  від них

$$\bar{P} = 1/M \sum_{i=1}^M P_{ii} ; m_2\{P\} = 1/M \sum_{i=1}^M (P_{ii} - \bar{P})^2 \quad (9)$$

Усереднюванням елементів головної діагоналі таблиці отримаємо, що середні ймовірності правильного розпізнавання двох систем розрізняються незначно  $\bar{P}_c=0,740$ ;  $\bar{P}_a=0,746$ . При цьому, розсіювання від середньої ймовірності  $m_2\{P\}$  для оптимального алгоритму завжди менше, ніж при узгодженій фільтрації. Зауважимо, що в разі вгадування (неналаштованих фільтрів) ймовірності правильного розпізнавання були б усі рівні  $\bar{P} = P_{ii} = 1/M = 0.25$ . Розглянемо зв'язок між ефективністю розпізнавання і пороговим рівнем виявлення. У таблицях 3-4 наведені результати розпізнавання при узгодженій фільтрації відповідно для двох значень порогового множника  $c=2,4$ . Як видно, перевищення  $c > 2$  призводить до помітного зниження вірогідності розпізнавання. Перейдем к аналізу порогової схеми обнаружителя для случаев согласованной и оптимальной фильтрации. Зауважимо, що якщо у відсутності сигналу вимірювана потужність після фільтрації визначається рівнем шумів і некомпенсованих завад, то при наявності сигналу потужність зростає на величину середньоквадратичного рівня хибних піків сигналу.

Так як на близьких відстанях між джерелом звуку і приймальною системою акустичних датчиків відношення сигнал/шум досить велике, а на великих відстанях сигнал порівняємо або нижче рівня шумів, то для аналізу рівня помилкової тривоги через багатопіковості сигналів потрібно провести аналіз ефективності оптимальних і узгоджених фільтрів від дальності прийому.

Таблиця 1

## Узгоджена фільтрація

Клас	1	2	3	4
1	0.678	0.072	0.178	0.072
2	0.454	0.806	0.011	0.022
3	0.153	0.096	0.730	0.019
4	0.056	0.075	0.132	0.698

Таблиця 2

## Оптимальна фільтрація

Клас	1	2	3	4
1	0.678	0.072	0.178	0.072
2	0.056	0.829	0.011	0.022
3	0.153	0.096	0.730	0.019
4	0.056	0.075	0.132	0.735

Таблиця 3

Поріг  $c=2$ 

Клас	1	2	3	4
1	0.678	0.071	0.178	0.071
2	0.056	0.829	0.011	0.022
3	0.153	0.096	0.730	0.019
4	0.056	0.075	0.132	0.735

Таблиця 4

Поріг  $c=4$ 

Клас	1	2	3	4
1	0.571	0.071	0.178	0.071
2	0.454	0.795	0.011	0.022
3	0.153	0.076	0.711	0.019
4	0.037	0.075	0.132	0.698

Для цього визначим вхідне відношення сигнал/перешкода  $q$  за векторами сигналу  $S$  і перешкоди  $X$

$$q_i = \sigma_c^2 / \sigma_n^2 = N^{-1} S_i^T S_i / (N^{-1} \overline{X^T X}) \quad (10)$$

Так як фільтри є лінійними, то процес на виході схеми відбору максимуму розподілений за нормальним законом з одиничною потужністю перешкод і середнім, визначеним вихідним відношенням сигнал/перешкода  $Q$ . Густина розподілу ймовірностей для одного каналу у відсутності і при наявності сигналу мають вигляд [6]

$$w_n(y) = (2\pi)^{-1/2} \exp\{-y^2/2\}; w_{c+n}(y) = (2\pi)^{-1/2} \exp\{-(y-Q)^2/2\},$$

то ймовірності хибної тривоги і правильного виявлення на виході одного каналу визначаються виразами [6]

$$F = \int_c^{\infty} w_{\text{п}}(y) dy = 0,5 - 0,5\Phi(c); \quad D = \int_c^{\infty} w_{c+\text{п}}(y) dy = 0,5 + 0,5\Phi(Q - c) \quad (11)$$

де  $\Phi(\cdot)$  інтеграл ймовірностей. Відомо [9], що після схеми відбору максимуму, як і після суматора некорельованих процесів, дисперсія нормального випадкового процесу зростає в  $M$  разів. Тоді ймовірність хибної тривоги на виході відбору максимуму багатоканальної системи визначається

$$F = \int_c^{\infty} w_{\text{п}}(y) dy = 0,5 - 0,5\Phi(c/\sqrt{M}), \quad (12)$$

а, отже, поріг повинен зростати пропорційно  $\sqrt{M}$  від числа каналів. Однак такий високий поріг є передбачуваною верхньою межею, так як процеси на виході каналів корельовані, а також залежать від рівня бічних сигналів. Тому поріг нижче, ніж передбачуваний за розрахунками (12), і визначається за статистичним моделюванням з урахуванням взаємних кореляцій еталонів і експериментальних даних.

Для аналізу ефективності адаптивної системи виявлення з обчисленням кореляційної матриці перешкод (5) на рис. 4 побудовані залежності ймовірності хибної тривоги від порогу  $c$  при різній кількості класів  $M$ . На рис. 5 наведено залежності ефективності виявлення для трьох видів фільтрів: узгоджена фільтрація (У), адаптивна фільтрація з оцінюванням кореляційної матриці завад на ділянці вибірки, що не містить корисний сигнал – оптимальна фільтрація за класифікованою вибіркою (ОК) і адаптивна фільтрація з оцінюванням кореляційної матриці завад за вибіркою, що містить корисний сигнал – оптимальна фільтрація за некласифікованою вибіркою (ОН). З аналізу графіків випливає, що оптимальна фільтрація ефективна при слабких сигналах (прийнятих з великих дальностей), що виявляються на тлі корельованих завад (вітрових завад). Якщо завада оцінюється на тимчасовому інтервалі, що містить оброблюваний корисний сигнал (ОН-фільтрація), то для сигналів з відношенням сигнал/завада вище 10 має місце зниження ефективності виявлення.

Графіки залежностей ймовірності правильного виявлення від вхідного відношення сигнал/завада  $q$  (11) представлені на рис. 5 для оптимальної класифікованої, некласифікованої і узгодженої обробки (7). Як видно ефективність оптимальної обробки при слабкому сигналі (великих дальностях) практично не залежить від наявності сигналу в коваріаційній матриці вхідного процесу і при великому відношенні сигнал/завада знижується та наближується до узгодженої обробки.

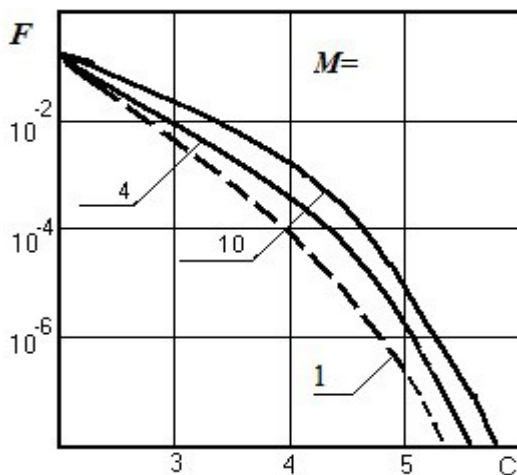


Рис. 4. Вибір порогу виявлення

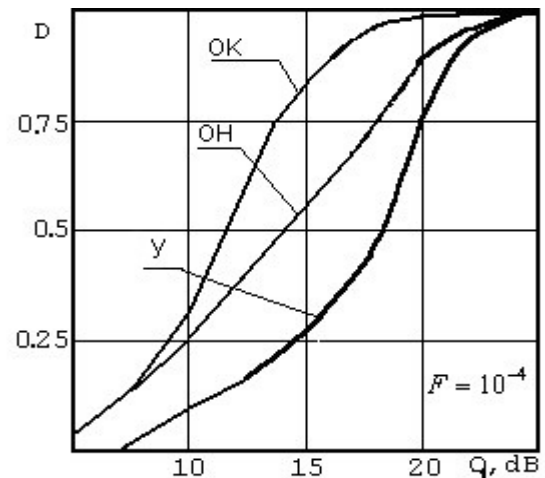


Рис. 5. Характеристики виявлення

За експериментальними даними побудовано залежності втрат у вхідному відношенні сигнал/(завада + шум) від дальності, розраховані відповідно до (10)  $\Delta q = q(D)/q(D = 0,5 \text{ км})$ , представлені на рис. 6 штриховою лінією, і їх згладжена апроксимація – суцільною лінією. Це дозволило розрахувати згідно (19) ймовірність правильного виявлення від дальності (рис. 7). Як видно на великих відстанях оптимальний фільтр дозволяє істотно підвищити якість виявлення і застосовувати запропоновану систему до дальностей, що не перевищують 15 км.

Проведено дослідження ефекту перевищення порога бічними піками вихідного сигналу, який негативно позначається на оцінці тимчасового положення сигналу і на стабілізації ймовірності хибної тривоги. Показано, що для дальностей до 10 км (вхідне відношення сигнал/шум  $q > 1$ , а вихідне відношення сигнал/шум  $> 10$ ), середньоквадратичний рівень хибних піків перевищує або порівнюється з рівнем шумів і викликає підвищення ймовірності хибної тривоги і, отже, призводить до необхідності завищення порогу в порівнянні з випадком відсутності сигналу. При цьому граничний рівень не повинен перевищувати  $c < 4$  щоб уникнути зниження ймовірності правильного виявлення до  $c < 0,95$ . Крім того, перевищення порогу  $c > 3$  призводить до помітного зниження ймовірностей розпізнавання. Таким чином, вибір в інтервалі порогових рівнів  $3 < c < 4$  достатній для забезпечення низької вірогідності хибної тривоги, при  $c < 4$ ,  $M < 10$  доставляє  $F_M \geq 10^{-4}$ , і не призводить до помітних втрат в ефективності розпізнавання.

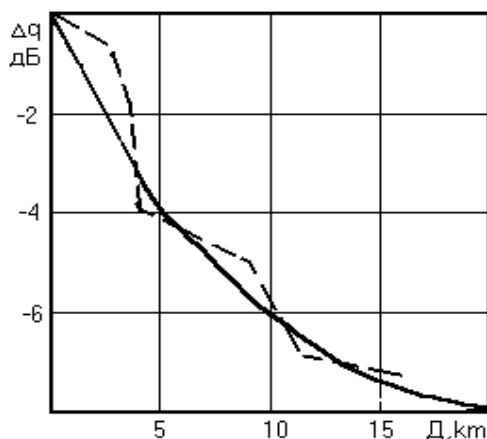


Рис. 6. Залежності ослаблення сигналу від дальності

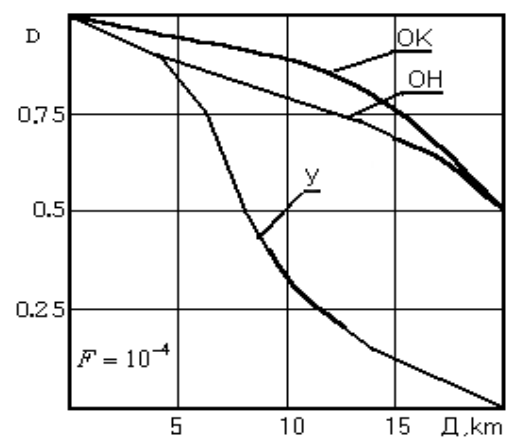


Рис. 7. Залежності ефективності виявлення від дальності

### Висновки

1. Розроблено метод оптимізації систем спільного виявлення-розпізнавання імпульсних сигналів відомої форми, що дозволив створити багатоканальну систему, яка містить однакові пороги в каналах виявлення. Це спрощує розрахунки по визначенню порогів і ймовірнісних характеристик адаптивних систем.

2. Дослідження ефективності алгоритмів оптимальної та узгодженої фільтрації показало, що при високому відношенні сигнал/шум алгоритми близькі по ефективності, а при низькому відношенні сигнал/шум оптимальна фільтрація дозволяє підвищити дальність контрольованої зони. Застосування оптимальних фільтрів, що дозволяють накопичувати відліки сигналів і пригнічувати перешкоди, відкриває можливість збільшення контрольованої зони в 1,5-2 рази.

3. Аналіз особливостей сигналів в досліджуваній системі встановив, що сигнали після фільтрації мають структуру з багатьма піками, яка визначається взаємними кореляційними функціями еталонних сигналів, що суттєво впливає на число хибних тривог при виявленні і утрудняє розпізнавання сигналів. Зниження впливу бічних піків можливо вибором порога виявлення на основі компромісу між якістю виявлення і розпізнавання сигналів.



В цілому, розроблена система звукового виявлення і розпізнавання пострілів вогнепальної зброї забезпечує достовірність прийняття рішень на дальностях до 10-15 км і більше, за рахунок глибинного висунення роботизованих розвідувальних комплексів з встановленими системами пасивної звукової локації.

### Список використаних джерел

1. Средства контрбатареинной борьбы украинского производства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://republic.com.ua/article/sredstva-kontrbatareynoy-borbyi-ukrainskogo-proizvodstva.html>
2. Система обнаружения выстрелов «Сова-М». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gurkhan.blogspot.com/2016/05/blog-post\\_89.html](http://gurkhan.blogspot.com/2016/05/blog-post_89.html)
3. Камышев В.В., Полковников С.П. АО «НИИ «ВЕКТОР» —старейшее радиотехническое предприятие России. Комплексы звуковой и звукотепловой артиллерийской разведки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://grau.informost.ru/2018/pdf/part2/22.pdf>
4. Русский «Тигр». Бронеавтомобиль для «вежливых людей» /Сергей Суворов. – М.: Стратегия КМ: Яуза: Эксмо, 2016. –192с.: илл.
5. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. - М.: Радио и связь,1981.- 416 с.
6. Орлов В.В. Обнаружение и распознавание импульсных акустических сигналов /В.В. Орлов //Тезисы доклада. Труды третьей международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологи», 21-24 мая 2002г., Одесса, Украина, с.63.
7. Монзинго Р.А.,Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ./ Под ред. В.А. Лексаченко. -М.: Радио и связь, 1986.- 448с.
8. Абрамович Ю.И. Регуляризованный метод адаптивной оптимизации фильтров по критерию максимального отношения сигнал/помеха /Ю.И. Абрамович // Радиотехника и электроника. - 1981.- Т.26, N3.-С.543-551
9. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. -М.: Сов. радио, 1963. – 356 с.

**Рецензент:** Скачков В.В., д.т.н., профессор, Військова академія (м. Одеса)

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫСТРЕЛОВ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

В. Орлов, Р. Лукаш, Л. Папуша

Исследована эффективность обнаружения и определения класса огнестрельного оружия, как источника излучения акустического сигнала. Предложен метод построения многоканальной системы совместного обнаружения и распознавания звуковых сигналов, основанной на оптимальных фильтрах с последующими схемами отбора максимума и сравнения с пороговым уровнем. Проведено исследование эффективности и определены требования к параметрам обнаружителя, а также фильтров оптимальной и согласованной обработки.

**Ключевые слова:** обнаружение, распознавание, оптимальная обработка, согласованный фильтр, пассивная звуковая локация, роботизированные разведывательные комплексы.

---

**ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF SOUND LOCATION IN THE PROBLEMS OF  
DETECTION AND RECOGNITION OF FIREARMS**

V. Orlov, R. Lukash, L. Papusha

*Nowadays, the world's leading countries are equipped with sound-reconnaissance systems, which belong to the class of high-precision means of warfare and designed to determine the coordinates of snipers, firing positions of artillery guns and mortars. The main advantage of such passive location systems is protection from electronic warfare, independence from visibility conditions. In combat conditions, with the use of disparate interference by the enemy, a combination of basic monitoring systems (electronic reconnaissance, radar, video cameras, thermal imagers) with additional passive systems (sound locators, seismic locators), which perform similar functions. Currently, there is a trend of installing passive sound location systems on vehicles accompanying important cargo, UAVs, robotic reconnaissance complexes. One of the ways of high-precision determination of coordinates, operative detection and recognition of the weapon, providing instant reaction to attack is offered. It consists in the deep advancement of robotic reconnaissance complexes, which allows creating a reconfigured sensor network between them, distributed over hundreds of meters, the tactical and technical characteristics of which exceed the existing sound reconnaissance complexes. At the same time, weapon recognition algorithms need to be improved, in particular, due to the insufficient database of experimental data for the construction of reference signals of firearms classes.*

*The efficiency of detecting and determining the class of firearms as a source of acoustic signal radiation is investigated. A method for constructing a multi-channel system for joint detection and recognition of audio signals based on optimal filters with the following schemes of maximum selection and comparison with a threshold level. A performance study was conducted and requirements for the parameters of the detector, as well as filters for optimal and consistent processing, were determined.*

**Keywords:** *detection, recognition, optimal processing, matched filter, passive sound location, robotic reconnaissance systems.*