

Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів

М. М. Нікіфоров¹, І. В. Пампуха¹, В. М. Лоза¹, С. В. Щербіна², Шевцов А. Г.³, 2018

¹Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

³Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова, Київ, Україна
Надійшла 26 червня 2018 р.

Дан анализ существующих разведывательно-сигнализационных приборов, построенные на принципах, в основе которых лежит использование современных сейсмоакустических датчиков обнаружения координат подвижных и неподвижных объектов. Раскрыты преимущества и недостатки сейсмического и акустического принципов обнаружения как отдельных и независимых методов, а также преимущества при применении комбинированного способа обнаружения. Комплексное использование акустических, сейсмических или сейсмоакустических датчиков вместо только одного типового элемента позволяет существенно расширить области применения комплексных групп этих устройств, соответственно уменьшает влияние природных свойств на процессы для качественных и точных результатов измерения. Приведены результаты автоматической обработки реальных сейсмоакустических записей на полигоне «Дивички», полученные с помощью метода математической обработки сейсмического, акустического или сейсмоакустического сигнала. Этот метод базируется на широко известном методе выделения первичных вступлений волн на основе использования LTA/STA метода (Long Time Amplitude/Short Time Amplitude method). Согласно результатам исследований автоматизированный подход обработки потока данных на основе использования LTA/STA метода позволяет достаточно точно определять время вступления волн сейсмоакустического сигнала различного происхождения. Проведена предварительная статистическая оценка разности значений рассчитанных координат источника сейсмоакустического сигнала и его реальных координат. Показано, что существует возможный выбор оптимального значения скорости распространения сейсмоакустического сигнала, значение которого может быть использовано при проведении последующих исследований на полигонах, карьерах или в шахтах. Представлены предварительные выводы, согласно которым одновременное использование общих принципов для сейсмического и акустического сигналов при выявлении их происхождения значительно повышает эффективность работы этих методов и средств для обнаружения координат подвижных объектов или техногенных явлений, а также увеличивает точность определения динамики значений координат военных объектов и других опасных процессов, которые они генерируют.

Ключевые слова: сейсмоакустический датчик, разведывательно-сигнализационный прибор, акустический, сейсмический, воздушный объекты, опасный объект.

Вступ. У системі наземної розвідки нині все більше уваги приділяють розробці розвідувально-сигналізаційних приладів (РСП). Ці прилади включають: інтелектуальний

датчик (ІД), інформаційний канал, засіб збору і зберігання даних. Залежно від завдання РСП можуть здійснювати такі функції: виявлення об'єкта, розпізнавання образу

об'єкта, його супровід, формування сигналу спрацьовування під час перебування об'єкта на певній ділянці руху та ін.

Системи наземної розвідки, побудовані на основі РСП, можна використовувати для вирішення таких завдань:

- розвідка в районах очікуваного зосередження (переміщення) військ противника;
- розвідка найімовірніших маршрутів переміщення військ противника, напрямків та інтенсивності їхнього руху;
- контроль найважливіших об'єктів супротивника (аеродромів, мостів, роздоріжжя, місць базування та ін.);
- контроль районів можливої висадки десантів і ділянок форсування річок;
- охорона місць дислокації своїх сил, мінних полів, підходів до мостів та ін.;
- видача цілевказівок іншим силам і засобам розвідки, що мають більші можливості;
- охорона військових і важливих цивільних об'єктів для виключення проникнення на їх територію розвідувально-диверсійних груп і терористів;
- охорона ділянок державного кордону і ліній поділу протиборчих сил.

З огляду на складність завдань та вимоги до високої надійності функціонування в основу створення ІД РСП покладено різні фізичні принципи побудови.

Важливою умовою успішного функціонування є потайність установки системи. Вимогам до маскуванню найбільшою мірою відповідають пасивні датчики (сейсмічні, магнітометричні, акустичні). За кордоном ІД отримали назву Unattended ground sensor (UGS) — необслуговані наземні сенсори. У них також використано різні фізичні принципи побудови. Найбільшого поширення набули сейсмоакустичні інтелектуальні датчики.

З метою підвищення ефективності ведення розвідки на полі бою, охорони об'єктів різного призначення, а також своєчасного оповіщення про пересування людей, наземної техніки та низьколітальних апаратів (вертольотів) у тактичній (оперативно-тактичній) глибині різні країни

поєднувати заходи щодо розробки та постачання у війська нових систем і комплексів РСП і модернізації тих, що прийняті на озброєння.

Комбінована обробка акустичних і сейсмічних хвиль може істотно підвищити ефективність розвідки. Водночас за експериментальними дослідженнями нарівні з акустичними хвилями можна ефективно використовувати й сейсмічні хвилі, що поширюються у земних надрах [Гейсер, Джеки, 2008].

Наявність таких проектів засвідчує перспективу застосування комбінованого способу виявлення об'єктів за допомогою сейсмоакустичних датчиків.

Мета роботи — розкриття переваг і недоліків сейсмічного та акустичного принципу виявлення, а також переваг використання комбінованого способу виявлення.

У наш час на озброєння передових армій світу прийняті різні види РСП з сейсмоакустичними каналами виявлення [Мошалева, 2003; Ерохин, Чабанов, 2014].

Сейсмоакустичні системи, що використовують природні поля, мають такі переваги [Averbuch et al., 2007; Панков, Дудкин, 2009].

1. Забезпечують стійке автоматичне функціонування: у складних метеорологічних умовах (дощ, сніг, туман); в умовах поганої оптичної видимості (ніч); у напрямках на джерела яскравого світла (сонце); в умовах сильного задимлення та запилення; в умовах порізаної рельєфу місцевості (пагорби, гірські перевали, ущелини, русла річок та ін.); за малої швидкості польоту або зависання вертольоту.

2. Сейсмоакустичні системи характеризуються повною потайністю, оскільки не формують зондувальних сигналів, за якими можна визначити їх наявність і місце розташування. Це виключає їх завчасне виявлення та обхід зони їхньої дії. Найважливішою властивістю цих систем є збереження працездатності в умовах сучасного радіоелектронного приглушення.

3. Такі системи мають малі габарити, низьке енергоспоживання і краще за інші системи (радіолокаційні, оптико-елект-

ронні) відповідають критеріям «ефективність—вартість».

У підсумку можна обґрунтовано вважати, що системи, які обробляють акустичні та сейсмічні сигнали, з урахуванням їх порівняно невеликої вартості і прийнятних характеристик можуть бути використані для моніторингу повітряного простору на гранично малих і малих висотах.

Наявність таких підходів засвідчує перспективу використання комбінованого способу виявлення об'єктів за допомогою сейсмоакустичних датчиків.

Як показує практика використання, наявність єдиного фізичного принципу дії для побудови датчика цілі накладає суттєві обмеження на сферу застосування датчика.

Сейсмічні РСП виявляють коливання ґрунту, викликані рухом людини або транспортного засобу. Як чутливий елемент у них використовують від 1 до 10 геофонів, заглиблених у ґрунт. Дальність виявлення цих приладів залежить від рівня і характеру фону навколишнього сейсмічного шуму і типу ґрунту.

Сейсмічні системи мають такі недоліки:

- залежність швидкості поширення сейсмічних хвиль від геологічного складу ґрунту;
- обмеженість використання сейсмічних засобів поблизу населених пунктів

через низьку перешкодозахищеність і нерегульований радіус зони виявлення;

– неможливість стеження за певною ділянкою руху через наявність колової зони виявлення;

– складність розпізнавання за класами «людина (група людей)»—«транспортний засіб» через подібність характеристик об'єктів, що може призвести до низької ефективності використання датчика в системах активного фізичного захисту.

Акустичні РСП реагують на шуми, що супроводжують діяльність людей, дію транспортних засобів й техніки. Як чутливий елемент використовують від 1 до 8 високочутливих керамічних мікрофонів. Дальність дії залежить від рівня шумів цілей і фонового акустичного шуму.

Акустичні засоби також мають недоліки:

- залежність швидкості поширення звуку від температури (приблизно 5 % на 30 °С);
 - обмеження використання акустичних засобів в умовах складного ландшафту і кліматичних умов за наявності ефектів відображення, заломлення і розсіювання звуку (особливо на частотах понад 3000 Гц);
 - низька перешкодозахищеність через вплив великої кількості джерел акустичних перешкод;
 - великий обсяг досліджуваних даних.
- Для ефективного вирішення завдань

Таблиця 1. Деякі можливі зміни характеристик інтелектувальних датчиків при комбінуванні сейсмічного та акустичного принципів побудови

Завдання	Сейсміка	Акустика	Результат комбінування
Збільшення завадостійкості	Середня завадостійкість залежить від геологічного складу ґрунту	Низька завадостійкість	Збільшення завадостійкості
Класифікація за класами «людина» — «транспортний засіб»	Залежить від відстані об'єкта до датчика	Висока ймовірність правильної класифікації	Збільшення ймовірності правильної класифікації
Створення обмеженого сектора виявлення	Неможливо, тому що чутливий елемент має колову зону виявлення	Можливо при використанні мікрофона із секторною діаграмою спрямованості	Обмеження зони виявлення сектором
Виявлення повітряних цілей	Немає	Можливе	Можливість виявлення повітряних цілей
Збільшення інформації про ціль під час її локації	Низькочастотний аналіз 3—150 Гц	Високочастотний аналіз 20—10000 Гц	Збільшення точності локації цілі

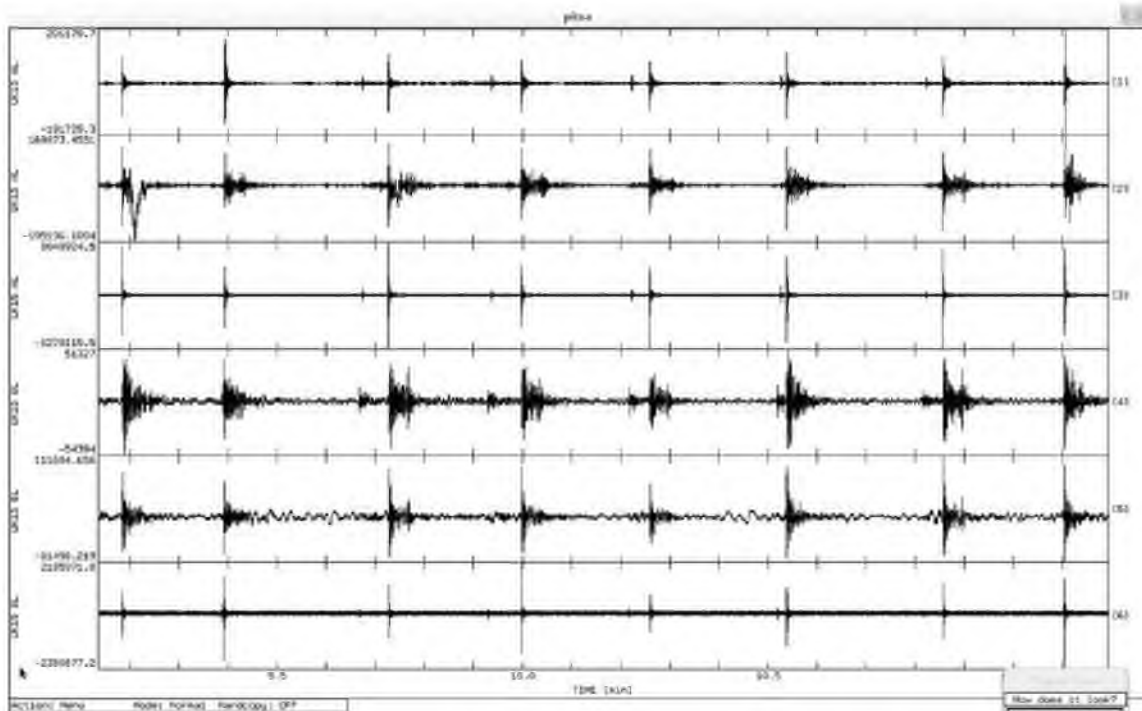


Рис. 1. Шість поканальних потоків сейсмоакустичної інформації, записані датчиками, кожен з яких реєструє сейсмічні та акустичні коливання одночасно, отримані на полігоні «Дівичики» під час роботи міномета 82-го калібру.

РСР і систем доцільно комбінувати акустичні й сейсмічні засоби [Барабанов, 2003].

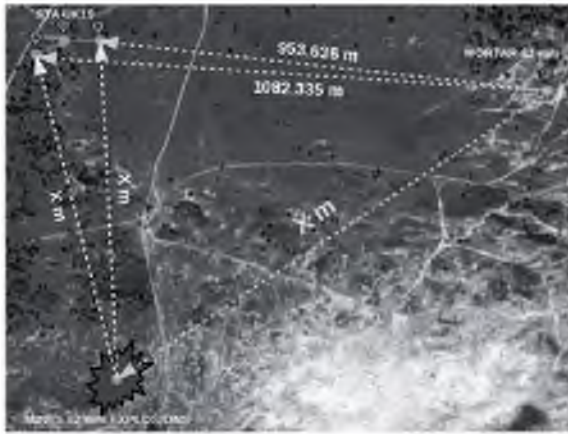
У табл. 1 наведено можливі поліпшення характеристик ІД комбінування сейсмічних і акустичних принципів побудови.

Зазначені недоліки було враховано під час розробки автоматизованого комплексу визначення координат об'єктів. Це завдання було реалізовано за допомогою розробки та експлуатації комплексної системи спеціальних суттєво модифікованих акустичних і сейсмометричних пристроїв, використання оптимальних відстаней між точками розташування цих пристроїв, автоматизованого програмного комплексу для швидкого та високоефективного розрахунку координат небезпечного об'єкта, застосування аналогово-цифрового перетворювача з достатньо широким динамічним діапазоном.

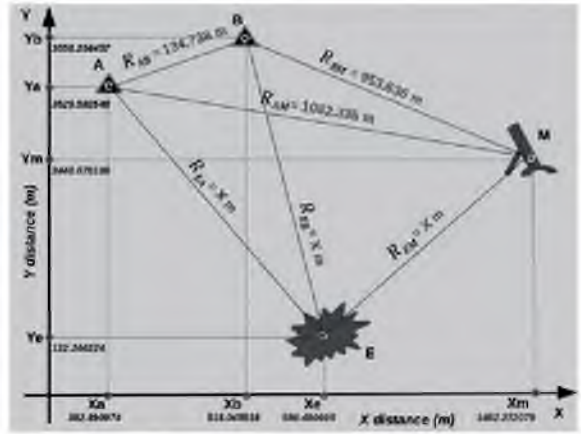
Основними особливостями такого автоматизованого акустичного, сейсмічного або сейсмоакустичного способу є те, що за використання високочутливих акустичних, сейсмічних або сейсмоакустичних пристро-

їв отримують необхідну корисну інформацію для автоматизованого розрахунку координат об'єктів різного походження. Цього досягають за допомогою 24-бітного АЦП сучасної розробки, груп модифікованих сейсмоакустичних пристроїв і відповідного комплексу програмного забезпечення. Зазначене дає змогу достатньо ефективно отримувати необхідні оперативні результати у вигляді умовних координат розташування небезпечних об'єктів, що генерують загальні потоки сейсмоакустичних сигналів [Щербина та ін., 2018] (рис. 1).

Запропонована корисна модель автоматизованого акустичного, сейсмічного або сейсмоакустичного комплексу для автоматизованого розрахунку координат небезпечних об'єктів різного походження може бути розташована в різних зонах, що генерують небезпечні події різного рівня. Для математичного опису такої модельної системи можна застосовувати спеціальний математичний підхід, що використовує такі системи алгебраїчних квадратичних рівнянь:



а



б

Рис. 2. Схема відносного розташування небезпечних об'єктів (б) генерації сейсмоакустичного сигналу різного походження (М) і точок їх реєстрації (А, В) під час роботи автоматизованого сейсмоакустичного комплексу на полігоні «Дівички» (а).

$$\begin{cases} (X_M - X_A)^2 + (Y_M - Y_A)^2 = V^2(t_A - t_M)^2, \\ (X_M - X_B)^2 + (Y_M - Y_B)^2 = V^2(t_B - t_M)^2, \end{cases} \quad (1)$$

де X_A, Y_A, X_B, Y_B — координати точок розташування аналогових частин акустичного, сейсмічного та сейсмоакустичного комплексів в точках А і В (рис. 2), призначених для відповідних вимірювань та отримання потоку постійної інформації; X_M та Y_M — невідомі координати небезпечного об'єкта (міномета 82-мм), що треба автоматично визначити; t_A і t_B — час приходу комплексного сигналу у точки вимірювань А і В; V — швидкість поширення сигналу, t_0 — початковий час його генерації у точці,

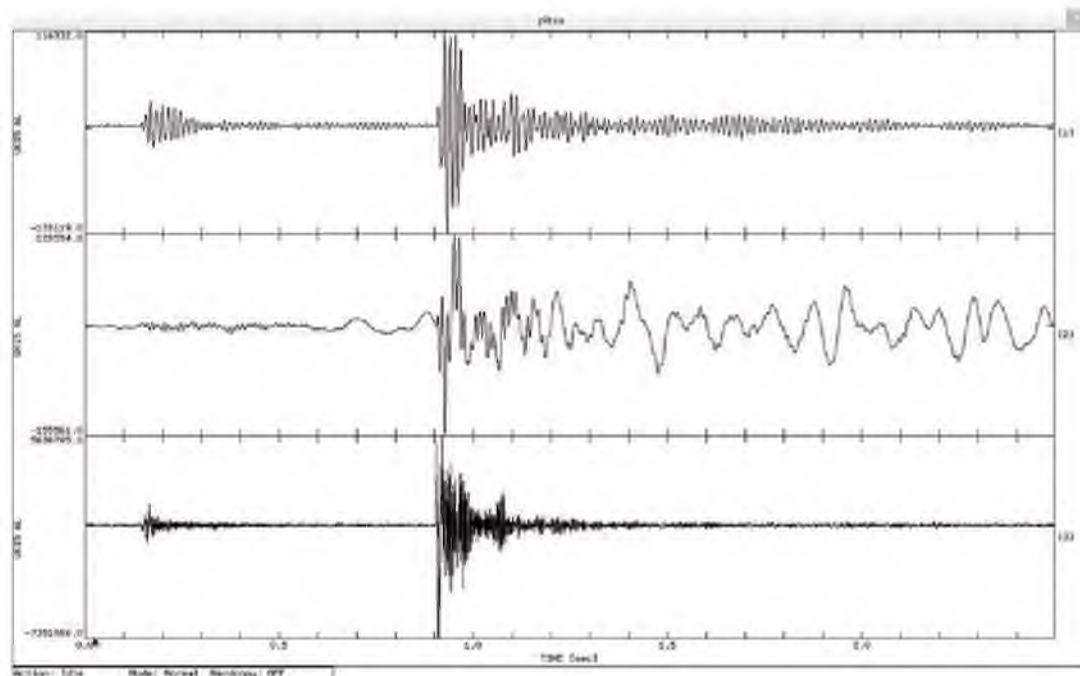
що має невідомі координати X_M та Y_M . Суть розв'язку цієї системи квадратних рівнянь полягає у тому, що для визначення невідомих координат X_M та Y_M слід побудувати модельну схему поширення комплексного сейсмоакустичного сигналу від невідомих точок його генерації до точок його фіксації автоматизованим комплексом.

На рис. 2, б також показано реальні значення координат усіх важливих об'єктів, що були використані при тестуванні роботи сейсмоакустичного комплексу на полігоні «Дівички».

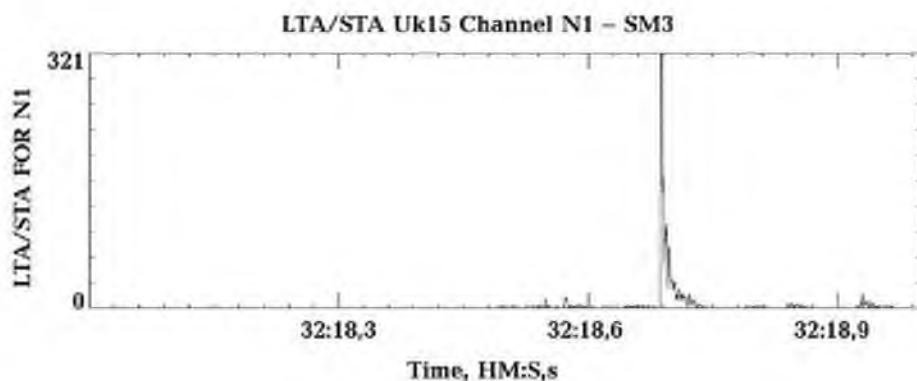
Ця математична модель відносного розташування небезпечних об'єктів генерації сейсмоакустичного сигналу різного

Таблиця 2. Похибки значень розрахованих і реальних координат міномета 82-го калібру на полігоні «Дівички»

№ п/п	Швидкість, V , м/с	Координати, м				Різниця між реальними та розрахованими значеннями, м	
		розраховані		реальні		dX	dY
		X	Y	X	Y		
1	500	566,92262	3307,440042	1462,272079	3440,676186	895,394	133,236
2	1000	811,354588	3143,216536	1462,272079	3440,676186	650,917	297,46
3	1500	1161,686374	3152,207148	1462,272079	3440,676186	300,585	288,469
4	1876	1461,426322	3438,917415	1462,272079	3440,676186	0,846	1,7587
5	2000	1512,921818	3757,716128	1462,272079	3440,676186	-50,649	-317,04
6	2500	1780,509191	3812,463111	1462,272079	3440,676186	-318,237	-371,79
7	3000	2048,038720	3865,190779	1462,272079	3440,676186	-585,766	-424,51



а



б

Рис. 3. Одна з частин записів сейсмоакустичного походження (а), автоматично оброблених за допомогою LTA/STA методу (б), для тестування та пошуку корисних властивостей розробленого програмного комплексу.

походження (M) і точок їх реєстрації (A , B) складається з таких параметрів: R_{AM} — відстань між об'єктом (M), що генерує сигнал, та точкою отримання сейсмоакустичного сигналу (A); R_{BM} — відстань між об'єктом (M), що генерує сигнал, і точкою отримання сейсмоакустичного сигналу (B); R_{AB} — відстань між точками отримання сейсмоакустичного сигналу (A) та (B); $D_{B,M,A,B}$ — різниця між відстанями R_{BM} та R_{AB} . Побудована модель була закладена

у програмний комплекс, розроблений за допомогою мови програмування C (ліцензія GNU, Copyright (C) 2016 Free Software Foundation, Inc.), за додаванням спеціального коду з ліцензією GSL (GSL — GNU Scientific Library) для розв'язання систем нелінійних рівнянь.

Під час випробовування моделі було зареєстровано технічні сейсмоакустичні події типу пострілів міномета 82-го калібру та вибухів мін. На рис. 3, а можна побачити

комплексну групу записів сигналів різного походження. Це дає змогу використовувати їх для аналізу необхідних властивостей ситуації з метою реалізації кінцевого варіанта розробки автоматизованого акустичного, сейсмічного або сейсмоакустичного комплексу.

Реальні результати тестових випробувань корисної моделі автоматизованого акустичного, сейсмічного або сейсмоакустичного комплексу було отримано при використанні попередніх результатів аналізу запису технічного походження від пострілів міномета 82-го калібру (рис. 3, а).

Для розв'язання системи нелінійних рівнянь другого порядку (1) було застосовано спеціальне програмне забезпечення, яке за допомогою ітерації, обмеженої за кількістю операцій, знаходить необхідні значення координат (табл. 2). Порівняльний аналіз розрахованих значень швидкості дає змогу реалізувати швидкий пошук оптимального значення швидкості для мінімізації похибки при розрахунках координат небезпечних об'єктів у нових місцях спостережень, де значення швидкості не відомі. Для цього попередньо можна виконати технічне випробування сейсмоакустичних систем у необхідних місцях їх наступного розташування.

Координати розташування міномета 82-го калібру розраховано за допомогою автоматизації обробки записів методом LTA/STA (табл. 2, рис. 3, б). Максимальне значення цього параметра аналізу запису дає значення часу для розрахунку координат об'єкта, що генерує сейсмічний або сейсмоакустичний сигнал.

Складніші варіанти комбінування і спільної обробки сейсмічних і акустичних сигналів можуть дати у перспективі до-

даткові переваги, такі як обмеження зони виявлення або адаптивна зміна параметрів алгоритмів для забезпечення максимальної зони виявлення розташування небезпечних об'єктів різного походження.

Висновки.

1. Комплексне використання акустичних, сейсмічних або сейсмоакустичних датчиків комплексу замість тільки одного суттєво розширює сферу використання груп цих пристроїв, що, відповідно, зменшує вплив природних властивостей на якість результатів вимірювання.

2. У робочій корисній моделі відношення мінімального та максимального значень АЦП досягає 144 дБ, що майже у 2,4 раза перевищує значення прототипу. 24-бітна розрядність АЦП дає змогу використовувати сейсмоакустичні пристрої високої чутливості у значному динамічному діапазоні, що суттєво поширює можливості проведення вимірювань.

3. У разі застосування запропонованого автоматизованого сейсмоакустичного комплексу одним високочутливим електромагнітним пристроєм можна вимірювати звуковий та сейсмічний сигнали одночасно. Разом з тим закладені початкові координати активного небезпечного об'єкта майже збігаються з його реальними координатами, що дає змогу визначати місце розташування об'єкта з точністю до 1 м за дальністю і до 3 градусів у напрямку, а також напрямком його руху. Інші подібні моделі не мають таких можливостей. Крім того, за частотними параметрами вказаного пристрою можна отримувати інфразвукові коливання повітря, а отже, розраховувати координати об'єктів, що розташовані на відстані більш як 12–15 км.

Список літератури

Барабанов А. Д. Совершенствование разведки в интересах применения высокоточного оружия. *Военная мысль*. 2003. № 11. С. 28–31.

Гейстер С. Р., Джеки А. М. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных

летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей. *Наука и военная безопасность*. 2008. № 1. С. 42–46.

Ерохин Е. И., Чабанов В. А. Современные средства воздушной разведки и наблюде-

ния США. *Авиационные системы. Научно-техническая информация*. 2014. № 6. С. 18—35.

Мосалев В. Системы дистанционного наблюдения за полем боя на базе разведывательно-сигнализационных приборов. *Зарубежное военное обозрение*. 2000. № 2. С. 21—27.

Панков А. А., Дудкин В. А. Помехоустойчивый алгоритм обнаружения техники по сейсмическим сигналам: *Труды Международной научной конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах»*. Пенза: Изд-во ПГУ, 2009. С. 381—383.

Щербина С. В., Феценко А. І., Ільєнко В. А., Лукіяничук А. А., Кривецький Г. В., Пампуха І. В., Боровська О. Г., Охрамович М. М., Нікіфоров М. М., Лоза В. М., Савков П. А. Патент України u201709127. Автоматизована комплексна система для детекції координат військових та техногенних об'єктів. Заявл. 15.09.2017., опубл. 11.06.2018. Бюл. № 11.

Averbuch, A., Zheludev, V., Rabin, N., & Schclar, A. (2009). Wavelet based acoustic detection of moving vehicles. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 20, 55. <https://doi.org/10.1007/s11045-008-0058-z>.

Features of the use of an automated seismic acoustic complex by a combined method of detection objects

*M. M. Nikiforov, I. V. Pampukha, V. M. Loza,
S. V. Shcherbina, A. G. Shevtsov, 2018*

The article deals with the analysis of existing intelligence and signaling devices (ISD) using principles based on the use of modern seismic acoustic sensors to detect the coordinates of moving and immobile objects. The advantages and disadvantages of the seismic and acoustic detection principle, as separate and independent methods, as well as the advantages of using the combined detection method, are revealed. Complex combined use of acoustic, seismic or seismic acoustic sensors instead of just one typical element significantly extends the areas of use of complex groups of these devices, which accordingly reduces the influence of natural properties on processes for qualitative and accurate measurement results. The results of automatic processing of real seismic acoustic records from the «Little Girls» site were obtained using the method of mathematical processing of a seismic, acoustic, or seismic acoustic signal based on the well-known method for allocating primary wave inputs based on the use of the LTA/STA method (Long Time Amplitude/Short Time Amplitude method). According to the results of these studies, it has been shown that this automated approach to data flow processing using the LTA/STA method allows accurately determining the time of the arrival of waves of a seismic acoustic signal of different origins. The preliminary statistical estimation of the difference between the values of the calculated coordinates of the source of the seismic acoustic signal and its real coordinates has been carried out. This basic part of the research shows that there is a possible choice of optimal value of the rate of propagation of the seismic acoustic signal, the value of which can be used in conducting further research at landfills, quarries or mines. Preliminary conclusions from the conducted research, which show that the simultaneous use of general principles for seismic and acoustic signals to detect the origin of these signals greatly improves the efficiency of these methods and tools for detecting the coordinates of moving objects or man-caused phenomena, and also improves the accuracy of the determination of dynamics changes in the values of the coordinates of military objects and other dangerous processes that they generate.

Key words: seismic acoustic sensor, intelligence-signaling device, acoustic, seismic, air object, dangerous object.

References

- Barabanov, A. D. (2003). Improvement of intelligence in the interests of the use of precision weapons. *Voyennaya mysl*, (11), 28—31 (in Russian).
- Gejster, S. R., & Dzheki, A. M. (2008). Solving the problem of detecting low-altitude light-engine aircraft using acoustic and seismic fields. *Nauka i voyennaya bezopasnost*, (1), 42—46 (in Russian).
- Erohin, E. I., & Chabanov, V. A. (2014). Modern means of aerial reconnaissance and surveillance of the USA. *Aviatsionnyye sistemy. Nauchno-tehnicheskaya informatsiya*, (6), 18—35 (in Russian).
- Mosalev, V. (2000). Remote monitoring systems for the battlefield based on reconnaissance and signaling devices. *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye*, (2), 21—27 (in Russian).
- Pankov, A. A., & Dudkin, V. A. (2009). An interference-free algorithm for detecting equipment using seismic signals. *Proceedings of the International Scientific Conference «Problems of Automation and Control in Technical Systems»* (pp. 381—383). Penza (in Russian).
- Sherbina, S. V., Feshchenko, A. I., Ilyenko, V. A., Lukiyanchuk, A. A., Krivitskiy, G. V., Pam-pukha, I. V., ... Savkov, P. A. (2018). Automated complex system for detecting the coordinates of military and technogenic objects. Patent No u201709127 (in Ukrainian).
- Averbuch, A., Zheludev, V., Rabin, N., & Schclar, A. (2009). Wavelet based acoustic detection of moving vehicles. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 20, 55. <https://doi.org/10.1007/s11045-008-0058-z>.