

УДК 681.3

О. В. Загора, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-9042-6838)

А. Б. Феценко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ЦІЛІ ПРИ ДОВІЛЬНОМУ ЗСУВІ АНТЕН ДВОКАНАЛЬНОГО ПРИЙМАЧА МІНОШУКАЧА VLF-СИСТЕМИ

Розглянуто один з аспектів проблеми проведення гуманітарного розмінування, пов'язаний з пошуком боєприпасів у зонах колишніх бойових дій, а саме задачу вдосконалення металошукачів системи "Very Low Frequency" з двома прийомними каналами. В ході аналізу методики й алгоритму визначення глибини залягання боєприпасу запропоновано розрахункові алгоритми визначення глибини боєприпасу двоканальної прийомної системи міношукача цього типу. Задачу розв'язано у ідеалізованій постановці з деякими обмеженнями, прийнятими у роботі: розглянуто випадок співвісного компланарного розташування прийомних антен, тобто розташування в одній площині, та розташування при довільному осьовому зсуві прийомних котушок. В якості параметра двоканальної прийомної системи розглядається співвідношення амплітуд сигналів, що приймаються різними прийомними каналами. Розглядаються можливі варіанти побудови розрахункового алгоритму. При цьому виявляється можливим застосування графічної або аналітичної (розрахункової) методики визначення глибини. Показано, що при використанні більш складної антенної системи з довільним осевим зсувом антенних котушок алгоритм визначення глибини цілі може бути зведено до модифікованого варіанту алгоритму розрахунку глибини для компланарної антенної системи. Розраховано помилки, які виникають в деяких умовах такого спрощення. На підставі проведених розрахунків розроблено рекомендації щодо побудови алгоритму розрахунку глибини цілі. Розглядаються варіанти практичної реалізації антенної системи міношукача з двома прийомними каналами при компланарному та відмінному від компланарного розташуванні прийомних антен. Наводяться аналітичні та графічні матеріали для різних варіантів практичної реалізації розрахункового алгоритму. Отримані алгоритми потребують подальших досліджень для урахування особливостей конструкції та розташування елементів реальної антенної системи.

Ключові слова: гуманітарне розмінування, глибина об'єкту, VLF.

1. Вступ

Підвищення об'єму задач ДСНС України щодо проведення гуманітарного розмінування за наслідками бойових дій на сході держави й збільшенням випадків аварій у місцях зберігання боєприпасів та техногенних катастроф вимагає вдосконалення існуючих та розробки нових технічних засобів, що застосовуються при пошуку та знешкодженні вибухонебезпечних об'єктів. До "Very Low Frequency" (VLF) відносять TR-металодетектори (МД типу "передача-прийм") з безперервним випромінюванням сигналу на певній частоті у діапазоні від 3 до 30 кГц. Однією з актуальних проблем гуманітарного розмінування є розробка ефективних пошукових приладів забезпечення пошукових робіт та безпеки праці у зоні надзвичайної ситуації. Задача вдосконалення вимірювачів глибини залягання боєприпасу міношукачів обумовлена тим, що приймачі існуючих детекторів мін VLF-системи (МД VLF) побудовані, переважно, по одноканальній схемі, в якій оцінка глибини залягання робиться по амплітуді відгуку у припущенні про певні розміри і електричні властивості боєприпасу і стає завідомо хибною у випадках, коли знахідка відрізняється від "еталону". Можливим рішенням проблеми є прийом сигналів від боєприпасу за допомогою двох прийомних каналів з різними за розміром антенами і визначення параметру глибини шляхом співставлення вимірних параметрів сигналів. Але цей підхід вимагає розробки більш складних, багатоканальних прийом-

них систем, а також алгоритмів визначення параметру глибини боєприпасу на підставі розширеного вектора вимірюваних параметрів сигналу.

Однією з актуальних проблем є розробка ефективних алгоритмів розрахунку глибини цілі у двоканальній прийомній системі МД VLF з довільним відносним осевим зсувом антен.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботах [1, 2] обґрунтовано доцільність використання активного зондування для виявлення вибухових пристроїв, які розташовані у товщі ґрунту. У роботі [1] обґрунтовано доцільність використання методів радіолокаційного зондування із застосуванням складних сигналів для виявлення небезпечних ґрунтових пристроїв. В роботі [3] викладено рекомендацію Женевського міжнародного центру гуманітарного розмінування щодо методів виконання робіт з розмінування сучасними технічними засобами. У роботі [4] приведені результати експериментальних дослідження залежності амплітуди і фази сигналу мін типу "мінімальний склад металу" при використанні сучасного мінного детектора VLF, подано основні технології, які використовуються у МД VLF, підтверджена висока залежність цих параметрів від форми і орієнтації міни у просторі, проведено аналіз сучасної ситуації щодо гуманітарного розмінування. У роботі [5] подано основні технології, які використовуються у сучасних МД VLF, дано загальну класифікацію металодетекторів, які можна використати, в тому числі, з метою пошуку боєприпасів, що містять мінімальний вміст металів, методів вирішення задач, які покладаються на сучасні VLF МД. В роботі [7] досліджено властивості ґрунтової засипки захисних споруд місць зберігання боєприпасів та вибухових речовин.

Складність задачі виявлення та знешкодження сучасних боєприпасів породжує низку наукових проблем. Важливим напрямом вдосконалення сучасних міношукачів є розробка ефективних розрахункових алгоритмів для забезпечення роботи багатофункціональних пошукових приладів з прийомною системою, що, в тому числі, містить кілька прийомних каналів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка алгоритмів визначення глибини залягання боєприпасу у двоканальному приймачі міношукача VLF–системи при довільному осьовому зсуві антенних котушок прийомної системи.

Для досягнення мети роботи були поставлені завдання:

- розробити методику та загальний алгоритм розрахунку визначення глибини залягання боєприпасу у двоканальному приймачі міношукача VLF–системи в реальному часі спостереження;
- розробити методику розрахунку точності визначення глибини цілі модифікованим алгоритмом;
- експериментально перевірити запропоновані алгоритми визначення глибини залягання боєприпасу у двоканальному приймачі міношукача в реальному часі спостереження на основі використання формул (таблиць) або графіків залежності параметрів міношукача, що вимірюються, від глибини залягання боєприпасу.

4. Матеріали та методи досліджень

Розв'язання поставленої у роботі задачі здійснювалося за допомогою методів математичного моделювання, геометричного проектування, оптимізації обчи-

слювального процесу. Розрахунки графіків та обчислювальні експерименти проводились на базі AMD Athlon(tm) 64 X2 Dual Core Processor 4400+ з використанням математичного апарату системи прикладного схемотехнічного моделювання «Micro-Cap» 9-ї версії [8].

5. Результати досліджень

Особливістю випадку виміру глибини залягання боєприпасу є те, що в умовах підземного середовища розповсюдження радіохвилі випробують швидке поглинання. Сила сигналу від боєприпасу сильно залежить від його відстані до пошукових котушок. Магнітне поле швидко зменшується зі збільшенням відстані між передавальною котушкою і ціллю, і так само поле дуже швидко зменшується зі збільшенням відстані від цілі до приймальної котушки. Але особливістю цього процесу є те, що швидкість загасання, крім інших факторів, залежить також від розміру прийомної котушки. Припустимо, що ціль знаходиться безпосередньо на центральній осі котушки. Якщо в якості передавальної антени використовується котушка радіусу R , а відстань від цілі до котушки рівна d , то поле в цілі [4]:

$$H = 2NI \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

де I – струм передачі; N – кількість обмоток котушки передачі.

На своєму зворотному шляху наведений боєприпасом сигнал зазнає таких саме втрат, тому поле біля прийомної котушки:

$$H_{\text{пр}} = c \cdot \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

де $c = \text{const}$ – коефіцієнт, який враховує вплив зовнішніх факторів, однакових для всіх прийомних котушок; R – радіус прийомної котушки.

Відомо, що велика котушка передавача при інших рівних параметрах створює інший розподіл напруги поля, чим поле маленької: на малих відстанях напруження великої котушки зменшується, а на великих перебільшує напруження малої. Такі відміни дозволяють визначати вимірювану глибину шляхом порівняння сигналів двох прийомних каналів, амплітуди V_1 і V_2 яких пропорційні $H_{\text{пр}1/2}$.

При використанні двох прийомних каналів, які обладнані антенами радіусів R_1 і R_2 , розташованими на відстані d_1 і d_2 від цілі відповідно, якщо об'єкт пошуку є досить малим щодо котушок або досить далеким від них, можна розрахувати співвідношення амплітуд сигналів в прийомних каналах [5]:

$$w = \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1^2 (R_2^2 + d_2^2)^{3/2}}{R_2^2 (R_1^2 + d_1^2)^{3/2}} = \frac{R_1^2 (R_2^2 + (d_1 + \Delta d)^2)^{3/2}}{R_2^2 (R_1^2 + d_1^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

де $\Delta d = d_2 - d_1$ – різниця відстаней від котушок до боєприпасу.

Це рівняння є лише функцією глибини боєприпасу і не залежить ні від його електричних властивостей, ні від властивостей навколишнього середовища. Перетворення останнього рівняння дозволяє розрахувати глибину відносно першої котушки d_1 , як рішення квадратного рівняння:

$$d_1^2 \left(w^{2/3} \frac{R_2^{4/3}}{R_1^{4/3}} - 1 \right) - 2d_1 \Delta d + \left(w^{2/3} R_2^{4/3} R_1^{2/3} - R_2^2 - \Delta d^2 \right) = 0. \quad (4)$$

Але, якщо пара прийомних котушок є компланарною (котушки розташовані в одній площині), як їх зараз переважно виготовляють в антенних системах МД VLF, то $\Delta d = 0$ і

$$d(w) = \sqrt{\frac{w^{2/3} R_1^{2/3} R_2^{4/3} - R_2^2}{1 - w^{2/3} (R_2/R_1)^{4/3}}}. \quad (5)$$

З метою спрощення розрахунку функції (5) можуть використовуватися розраховані чи табульовані значення цієї функції. На рис. 1 представлено графік функції (5) для випадку радіусів котушок $R_1 = 20$ см і $R_2 = 10$ см. Користуючись таким графіком, розрахованим заздалегідь з урахуванням параметрів антенної системи, що використовується двоканальним прийомним пристроєм, або безпосередньо виразом (5), можна перерахувати величину відношення вимірних амплітуд у значення глибини боєприпасу d .

В загальному випадку $\Delta d \neq 0$, а область можливих значень w обмежується двома граничними значеннями:

$$w_1 = \lim_{d_1 \rightarrow \infty} (w) = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2, \quad w_2 = \lim_{\substack{d_1 \rightarrow 0, \\ R_2 \gg \Delta d}} (w) = \frac{R_2}{R_1}, \quad (6)$$

в яких розмір діапазону можливих значень залежить від того, яка котушка є більшою за розміром.

Наприклад, при $R_1 = 20$ см, $R_2 = 10$ см маємо $w_1 = 4$, $w_2 = 1/2$ і $\Delta w = w_1 - w_2 = 3,5$; при $R_1 = 10$ см, $R_2 = 20$ см маємо $w_1 = 1/4$, $w_2 = 2$ і $\Delta w = w_2 - w_1 = 1,75$.

Рішення рівняння (4) може бути знайдено як загальне рішення квадратного рівняння і надає пару коренів

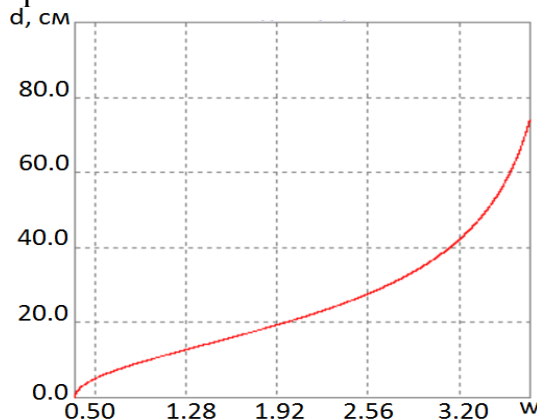


Рис. 1. Графік залежності глибини боєприпасу d , см, від співвідношення амплітуд відгуків цілі w для компланарного розташування котушок з радіусами $R_1 = 20$ см і $R_2 = 10$ см

$$d(w) = \left(\Delta d \pm \sqrt{\frac{w^{2/3}}{R_1^{4/3}} (R_2^{10/3} + R_2^{4/3} R_1^2 + R_2^{4/3} \cdot \Delta d^2) - w^{4/3} \frac{R_2^{8/3}}{R_1^{2/3}} - R_2^2} \right) / \left(w^{2/3} \frac{R_2^{4/3}}{R_1^{4/3}} - 1 \right), \quad (7)$$

де від'ємні значення відповідають горішнім цілям (розташованим зверху котушок). Враховуючи реальні (підземні) цілі з позитивними значеннями глибини, отримуємо єдине рішення:

$$d(w) = \left(\Delta d + \sqrt{\frac{w^{2/3}}{R_1^{4/3}} (R_2^{10/3} + R_2^{4/3} R_1^2 + R_2^{4/3} \cdot \Delta d^2) - w^{4/3} \frac{R_2^{8/3}}{R_1^{2/3}} - R_2^2} \right) / (1 - w^{2/3} (R_2/R_1)^{4/3}) \quad (8)$$

При $\Delta d = 0$ рівняння (8) спрощується до виразу (5), що відповідає випадку компланарного розташування прийомних котушок. Якщо $\Delta d \neq 0$, розрахунок цього виразу може бути спрощено при урахуванні ваги його складників. У сумі $(R_2^{10/3} + R_2^{4/3} R_1^2 + R_2^{4/3} \cdot \Delta d^2) = x + y$, де $x = R_2^{10/3} + R_2^{4/3} R_1^2$, $y = R_2^{4/3} \cdot \Delta d^2$, вплив доданка y буде визначатися співвідношенням величини зсуву Δd та радіусів котушок R_1, R_2 . Порівнюючи доданки x і y при малих (щодо розмірів котушок) значеннях Δd , приходимо до висновку, що в цьому випадку $x \gg y$. Наприклад, при $R_1 > 3\Delta d$ і $R_2 = 3\Delta d$ маємо:

$$x > (3^{10/3} \Delta d^{10/3} + 3^{4/3} \Delta d^{4/3} 3^2 \Delta d^2) = 2 \cdot 3^{10/3} \Delta d^{10/3} \approx 78 \cdot \Delta d^{10/3};$$

$$y = 3^{4/3} \cdot \Delta d^{4/3} \cdot \Delta d^2 \approx 4,3 \cdot \Delta d^{10/3},$$

отже $x \gg y$.

В цьому випадку можна знехтувати складником y під знаком кореня і, враховуючи вираз (5), загальний алгоритм розрахунку глибини (8) представити як модифікований алгоритм для компланарної антенної системи:

$$d(w) = d_k(w) + \frac{\Delta d}{1 - w^{2/3} (R_2/R_1)^{4/3}} = d_k(w) + d'_k(w), \quad (9)$$

$$\text{де } d'_k(w) = \frac{\Delta d}{1 - w^{2/3} (R_2/R_1)^{4/3}}, \quad (10)$$

що дозволяє використовувати для розрахунку (8) розраховані для алгоритму (5) графіки або таблиці, уводячи додаткову поправку $d'_k(w)$.

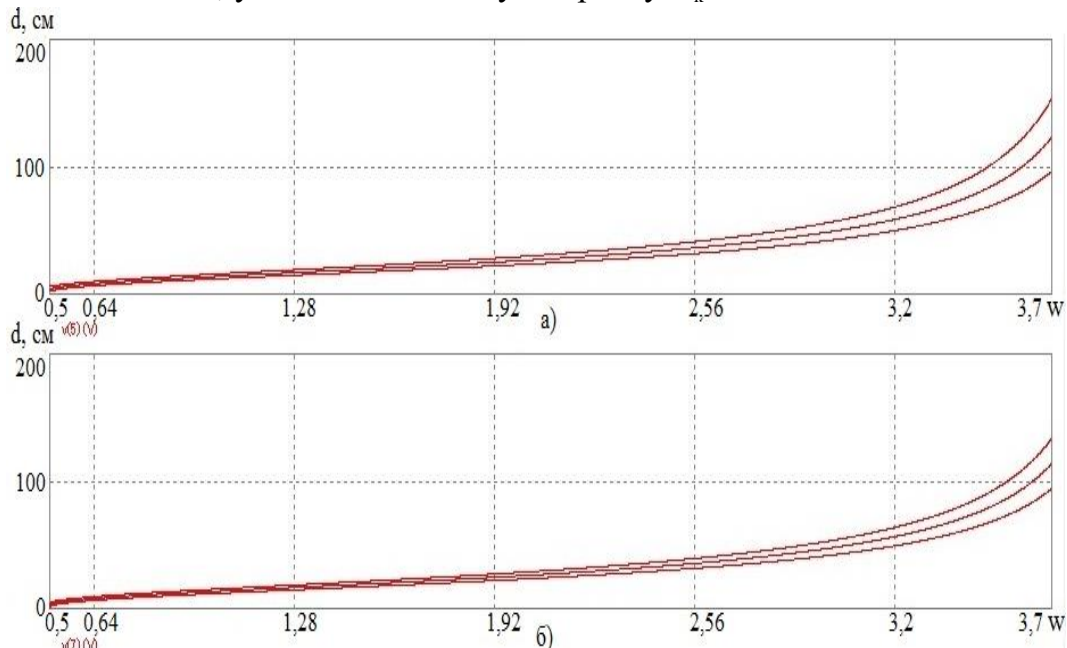


Рис. 2. Графік залежності глибини боєприпасу d , см, від співвідношення амплітуд відгуків w при малих значеннях зсуву котушок $\Delta d = 1, 2, 3$ см ($R_1 = 20$ см, $R_2 = 10$ см): а) по загальному алгоритму (8); б) по модифікованому алгоритму (9).

На рис. 2 наведено графіки залежності глибини боєприпасу від співвідношення амплітуд відгуків $d(w)$ при малих значеннях зсуву котушок Δd , розраховані по виразах (8) і (9), які майже співпадають.

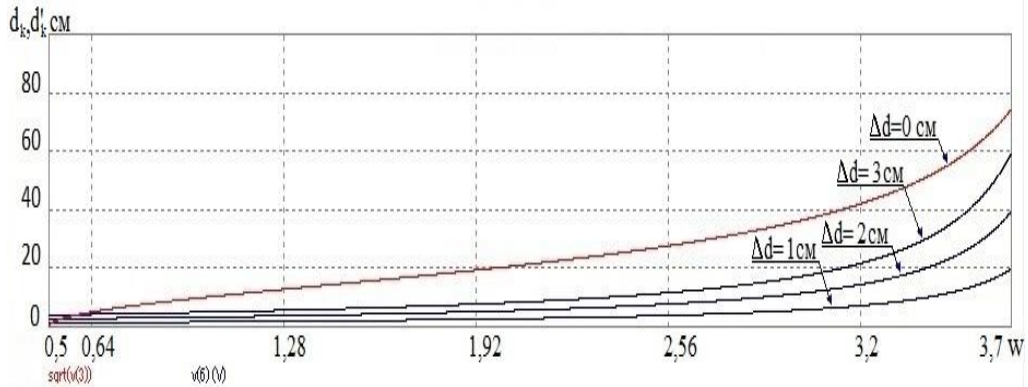


Рис. 3. Графіки залежності глибини боєприпаси d_k , см, від співвідношення амплітуд відгуків цілі w для компланарної системи котушок ($\Delta d=0$) по алгоритму (5) та поправок (10) при малих значеннях зсуву котушок $\Delta d=1, 2, 3$ см (радіус котушок $R_1=20$ см, $R_2=10$ см)

Для порівняння складників суми (9) на рис.3 наведено графік $d(w)$ для компланарної системи (5) та графіки поправок (10) для розрахунку глибини боєприпасу при малих значеннях зсуву котушок.

При подальшому збільшенні значень зсуву Δd помилка наближення (9) зростає (рис. 4) і для збільшення точності розрахунку необхідно користатися розрахунком за алгоритмом (8).

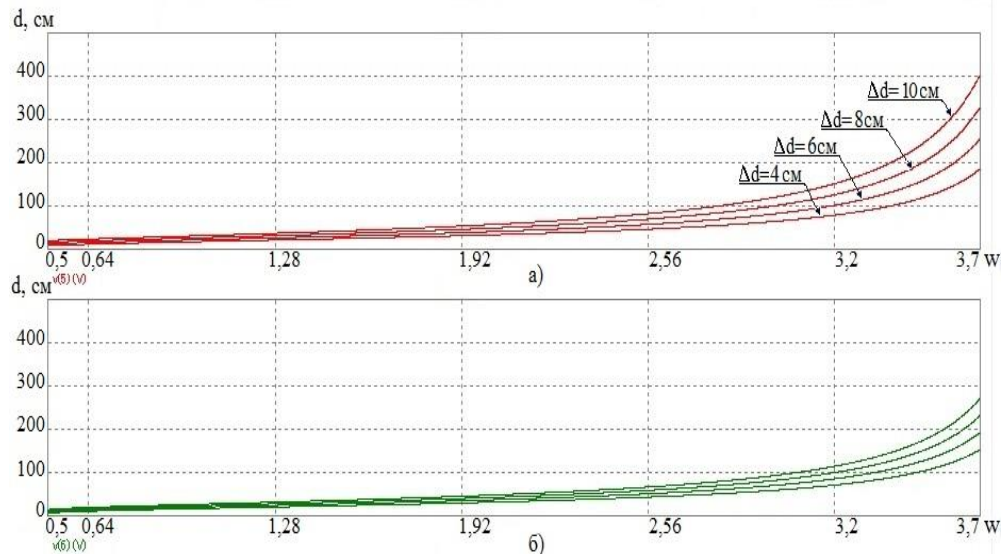


Рис. 4. Графіки залежності глибини боєприпасу d , см, від співвідношення амплітуд відгуків цілі w при великих значеннях зсуву котушок $\Delta d=4, 6, 8, 10$ см ($R_1=20$ см, $R_2=10$ см): а) по загальному виразу (8); б) по модифікованому алгоритму (9)

Порівнюючи криві на рис. 2 і рис. 4 можна відмітити, що винесення однієї з котушок зі спільної площини (збільшення Δd) дозволяє збільшити крутизну і діапазон лінійної ділянки робочої характеристики двоканального вимірювача $d(w)$. Змінюючи цей параметр під час експлуатації можна перелаштовувати МД на рішення різних задач, "фокусуючи" на певний діапазон і точність виміру глибини боєприпасу.

Інша проблема, пов'язана з виміром глибини у двоканальній прийомній системі, полягає в узгодженні розрахункового алгоритму з особливостями конструкції антенної системи, яка б забезпечила функціонування додаткового прийомного

каналу. Відштовхуючись від найпоширеніших зараз конструкцій концентричної та "2D" антен МД VLF, можна припустити, що найбільш придатними у випадку системи з довільним зсувом прийомних котушок є трьохкотушковий аналог концентричної системи (рис. 5, а).

При компланарному розташуванні антен може використовуватися варіант "3D", що є аналогом більш розповсюдженого варіанту "2D" розташування одноканальної прийомної системи (рис. 5, б). При цьому, звичайно, алгоритм виявлення цілі повинен враховувати додатковий просторовий і, відповідно, часовий зсув моментів опромінювання антен, що рухаються у просторі, відбитим сигналом цілі. Вибір тієї або іншої антенної системи є досить неоднозначним і вимагає проведення додаткових досліджень і натурних випробувань, так само як і вдосконалення роботи всієї схеми вимірювача у комплексі інших систем і пристроїв МД.

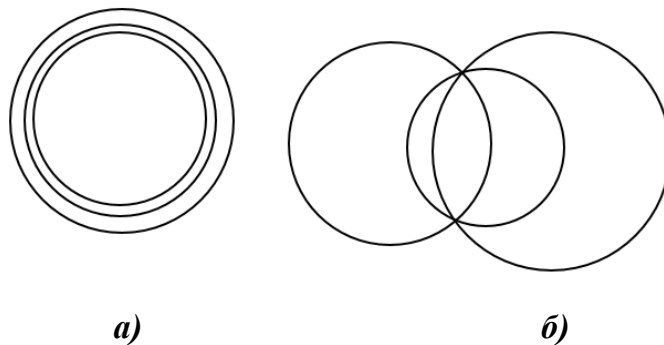


Рис. 5. Совісна та компланарна антенні системи типу: а) "концентрична" та б) "3D"

6. Обговорення результатів

Отримувані на підставі виразів (5), (8), (9) алгоритми розрахунку глибини залягання боєприпасу передбачають вимір амплітуд сигналів у двох прийомних каналах V_1 і V_2 , розрахунок їх співвідношення $w = V_1/V_2$ і значення глибини або аналітичним шляхом, або з графіків, розрахованих заздалегідь з урахуванням параметрів антенної системи, що використовує МД. При великих осевих зсувах прийомних котушок перевагу має аналітичний алгоритм.

Порівняння сигналів, які приймаються різними каналами має здійснюватися з урахуванням часових затримок, що відповідають особливостям конструкції антенної системи МД.

Введення третього та більшої кількості прийомних каналів з окремими котушками надає можливість збільшувати кількість незалежних оцінок параметру глибини, підвищувати точність оцінювання шляхом розрахунку усередненого значення параметру. Звичайно, таке збільшення ускладнює структуру прийомного тракту й антенної системи, але може бути доцільним, наприклад, у системах, яки вносяться, або змонтовані на пересувній транспортній базі.

7. Висновки

В роботі розглянуто проблему проведення гуманітарного розмінування, пов'язану з пошуком боєприпасів у зонах колишніх бойових дій, а саме задачу вдосконалення металошукачів системи "Very Low Frequency" з двома прийомними каналами та отримано наступні результати:

1. Для визначення глибини боєприпасу у двоканальному МД VLF з довільним відносним осевим зсувом антен прийомних каналів може використовуватися аналітична або графічна залежність глибини залягання цілі від співвідношення

амплітуд сигналів, прийнятих двоканальною прийомною системою. Розроблено методику та загальний алгоритм розрахунку визначення глибини залягання боеприпасу у приймачі двоканальному міношукача VLF-системи.

2. Запропоновано методику розрахунку точності визначення глибини цілі модифікованим алгоритмом. Розрахункові алгоритми визначення глибини боеприпасу двоканальної прийомної системи міношукача мають обмеження на випадок співвісного компланарного розташування прийомних антен та розташування при довільному осьовому зсуві прийомних котушок. В якості параметра двоканальної прийомної системи може використовуватися співвідношення амплітуд сигналів, що приймаються різними прийомними каналами.

3. На підставі проведених розрахунків розроблено рекомендації щодо експериментальних досліджень алгоритму розрахунку глибини цілі на основі використання аналітичних виразів та графічних матеріалів, що отримано протягом дослідження. Отримані алгоритми потребують подальших досліджень для урахування особливостей конструкції та розташування елементів прийомного тракту міношукача.

Наведені результати дозволяють вдосконалити алгоритм розрахунку глибини боеприпасу при виконанні завдань гуманітарного розмінування ДСНС України.

Література

1. Seleenko Y. Y., Feshchenko A. B., Zakora O. V., Sokolov D. L. Results from study of signal distortion in radar sensing of explosive devices in soil column. Problems of emergency situation, NUCP. 2016. № 23. P. 164–167.

2. Селеенко Е. Е., Фещенко А. Б., Загора А. В. Магнитометрический метод подповерхностного зондирования взрывных устройств. Збірник матеріалів науково-практичного семінару "Проблеми цивільного захисту: профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій", НУЦЗУ. 2017. P. 145–146.

3. Guidebook on detection technologies and systems for humanitarian demining. Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2006. 226 p. URL: <https://www.gichd.org/en/resources/publications/detail/publication/guidebook-on-detection-technologies-and-systems-for-humanitarian-demining>

4. Ripka P., Janošek M., Nováček P. Depth estimation of metal objects. Procedia Engineering, Czech Technical University, 2010. № 5. P. 280–283.

5. Metal detector basics and theory. 24 p. URL: https://www.minelab.com/files/f/11043/KBA_METAL_DETECTOR_BASICS_&_THEORY.pdf

6. Bruschini C. A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining: Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Brussels, 2002. 242 p.

7. Федюк І. Б., Чернуха А. М. Система пожежогасіння в місцях зберігання боеприпасів та вибухових речовин. Проблеми пожежної безпеки. НУЦЗУ. 2018. № 43. С. 178–181.

8. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program User's Guide, 2016. 224 p. URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf>

A. Zakora, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department

*A. Feshchenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

ALGORITHMS FOR DETERMINING THE DEPT OF THE TAGET IN CASE OF ARBITRARY ANTENNA BIAS OF A TWO-CHANNEL RECEIVER OF THE VLF MINE DETECTOR SYSTEM

One of the aspects of the problem of humanitarian mine clearance related to the search for ammunition in the zones of former military operations, namely the task of improving the metal detectors of
Civil Security. DOI: 10.5281/zenodo.3647948

the "Very Low Frequency" system with two receiving channels, is considered. In the course of the analysis of the methodology and algorithm for determining the depth of ammunition, calculation algorithms for determining the depth of ammunition of a two-channel mine detector of this type are proposed. The problem was solved in an idealized formulation with some limitations accepted in the work: the case of coaxial coplanar arrangement of receiving antennas, that is, positioning in one plane, and arrangement with arbitrary axial displacement of the receiving coils are considered. As a parameter of a two-channel receiving system, the ratio of the amplitudes of the signals received by different receiving channels is considered. Possible options for constructing a computational algorithm are considered. In this case, it is possible to use a graphical or analytical (calculated) methodology for determining the depth. It is shown that when using a more complex antenna system with arbitrary axial displacement of the antenna coils, the algorithm for determining the target depth can be reduced to a modified version of the algorithm for calculating the depth for a coplanar antenna system. The errors that occur under certain conditions of such simplification are calculated. Based on the calculations, recommendations were developed on the construction of an algorithm for calculating the target depth. Variants of practical implementation of the mine detector antenna system with two receiving channels are considered with a coplanar and different from the coplanar arrangement of the receiving antennas. Analytical and graphical materials are presented for various options for the practical implementation of the calculation method. The resulting algorithms require further research to take into account the design features and arrangement of elements of a real antenna system.

Keywords: humanitarian demining, object depth, VLF

References

1. Seleenko, Y. Y., Feshchenko, A. B., Zakora, O. V., Sokolov, D. L. (2016). Results from study of signal distortion in radar sensing of explosive devices in soil column. *Problems of emergency situation, NUCDU*, 23, 164–167.
2. Seleenko, E. E., Feshchenko, A. B., Zakora, A. V. (2017). Magnitometricheskij metod podpoverhnostnogo zondirovaniya vzryvnyh ustrojstv. *Zbirnik materialiv naukovopraktichnogo seminaru "Problemi civil'nogo zahistu: profilaktika, poperedzhennya ta likvidaciya nadzvichajnih situacij"*, NUCDU, 145–146.
3. Guidebook on detection technologies and systems for humanitarian demining. Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2006. 226 p. URL: <https://www.gichd.org/en/resources/publications/detail/publication/guidebook-on-detection-technologies-and-systems-for-humanitarian-demining>
4. Ripka, P., Janošek, M., Nováček, P. Depth estimation of metal objects. *Procedia Engineering, Czech Technical University*, 2010, 5, 280–283.
5. Metal detector basics and theory. 24 p. URL: https://www.minelab.com/files/f/11043/KBA_METAL_DETECTOR_BA-SICS_&_THEORY.pdf
6. Bruschini, C. (2002). A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining: Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Brussels, 242.
7. Fediuk, I. B., Chernukha, A. M. (2018). Systema pozhezhohasinnia v mistsiakh zberihannia boieprypasiv ta vybukhovnykh rehovyn. *Problemy pozharnoi bezopasnosti, NUCDU*, 43, 178–181.
8. Micro-Cap 11. (2016). *Electronic Circuit Analysis Program Users Guide*, 224. URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf>

Надійшла до редколегії: 28.09.2019

Прийнята до друку: 08.10.2019