

Загальні питання

УДК 623.454.36: 623.438.3.09

В.І. Коцюрuba¹, О.М. Гусяков²

¹ Національний університет оборони України, Київ

² Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РАДІОХВИЛЬОВИМ МЕТОДОМ

На підґрунті аналізу існуючих підходів запропоновано удосконалену математичну модель виявлення вибухонебезпечних предметів радіохвильовим методом, який, на відміну від існуючих, враховує неоднорідність укриваючих поверхонь, тип об'єкту пошуку та характер зміни параметрів розповсюдження радіохвиль у підповерхневому шарі у залежності від його складу.

Ключові слова: математична модель; вибухонебезпечний предмет; радіохвильовий метод виявлення.

Вступ

Постановка завдання у загальному вигляді та його зв'язок із практичними заходами. На сучасному етапі розвитку воєнного мистецтва відмічається стійка тенденція зміщення пріоритетів у бік асиметричних дій [1]. За таких умов, поряд із застосуванням авіаційних, артилерійських боєприпасів досить високу ефективність показали інженерні міни та різноманітні саморобні вибухові пристрої. Загальна риса визначених боєприпасів щодо можливості нанесення ураження ними як особовому складу, озброєнню та військовій техніці ворогуючих сторін, так й мирному населенню, дозволяє їх віднести до вибухонебезпечних предметів (ВНП). Виявлення ВНП на сьогоднішній день й є найбільш складною проблемою процесу розмінування місцевості й об'єктів.

Серед відомих електромагнітних методів виявлення рукотворних предметів не останнє місце займає радіохвильовий метод, який дозволяє виявити в укриваючих середовищах будь-які предмети, в тому числі й ВНП, виконані у корпусах із різноманітних матеріалів. Враховуючі те, що завчасно не можливо точно вказати який предмет буде виявлено у якому саме місці та який склад прошарку укриваючого середовища при цьому буде мати місце, можна стверджувати, що процес виявлення ВНП буде носити стохастичний характер та потребує удосконалення відповідної математичної моделі, що і обумовлює актуальність даної статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [2 – 5] показав, що дослідженню ефективності використання пошукових пристроїв із електромагнітними методами пошуку приділялась достатня увага. Однак, предметна сторона для різних досліджень мала різну спрямованість. Так у [2, 3] увагу приділялась різним методам виявлення рукотворних об'єктів в укриваючих середовищах. При цьому, на підґрунті [6] стосовно радіохвильового методу вияв-

лення наголошувалось на можливості реєстрації різниці діелектричного проникання укриваючого середовища та об'єкту. Однак, у [2, 3] не враховувався ймовірнісний характер зміни параметрів розповсюдження радіохвиль у підповерхневому шарі у залежності від складу середовища, що вкриває об'єкт пошуку. Автори наступної роботи [4] запропонували математичну модель виявлення ВНП пошуковим пристроєм з радіохвильовим методом, встановленим на легких броньованих машинах. Поряд із використанням ймовірнісного підходу та врахуванням достатньої кількості факторів запропонована модель має низку обмежень. Так запропонована модель [4] не враховує технічні характеристики пошукового пристрою щодо глибини проникнення радіохвиль в укриваючих середовищах. Не повністю врахований ймовірнісний характер розподілу випадкової величини виявлення ВНП, у якості якої було обрано коефіцієнт відбиття радіохвиль. При цьому, у [2 – 4] визначення такого коефіцієнту здійснюється на підґрунті порівняння відносних діелектричних проникань на межі розділу укриваючого середовища та об'єкту пошуку. А в [6] він показує узгодженість по хвильовому імпедансу. Також у [4] не наводяться формульні залежності для характеристик випадкової величини, значення яких використовуються під час моделювання.

Ці обмеження викликали потребу удосконалення існуючих підходів щодо моделювання процесу виявлення вибухонебезпечних та інших рукотворних предметів радіохвильовим методом.

Враховуючі вищезазначене, **метою статті** є розкриття основних положень уточненої математичної моделі [4] виявлення ВНП радіохвильовим методом.

Основной материал

За відомостями [4] ймовірність виявлення ВНП радіохвильовим методом визначається як добуток ймовірностей попадання ВНП у зону дії пошукового пристрою та виявлення при умові попадання ВНП у

зону дії пошукового пристрою

$$P_B = P_{\Pi} P_{B/\Pi}, \quad (1)$$

де P_{Π} – ймовірність попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою; $P_{B/\Pi}$ – ймовірність виявлення при умові попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою.

Ймовірність попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою (рис. 1) визначається по показовому закону розподілу випадкової величини. Розрахунки згідно [4] дозволяють визначити ймовірність попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою, який складається тільки з двох пошукових елементів. Якщо їх буде менше або більше двох, результат розрахунків буде мати похибку, що неприпустимо. При цьому, згідно [4] припускається, що ймовірність попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою збільшується із збільшенням пройденого шляху на замінованій ділянці місцевості. Таке збільшення на думку

авторів роботи [4] є нерівномірним та, виходячи із наведеного ними виразу, залежить від зміни щільності ВВП в межах замінованої ділянки місцевості. Однак, там же вводиться припущення щодо рівномірного розподілу ВВП в межах замінованої ділянки місцевості. Це приводить до стійкого протиріччя, розв'язання якого, на нашу думку, лежить у спрощенні формульних залежностей. Зокрема, ймовірність попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою пропонується визначати як

$$P_{\Pi} = 1 - \exp(-\mu(nb + 2d)), \quad (2)$$

де μ – щільність мінування ВВП ділянки місцевості, m^{-2} ; n – кількість пошукових елементів у пошуковому пристрої; b – ширина зони дії пошукового елемента, m ; d – діаметр небезпечної зони реагування підричника міни (ВВП), m .

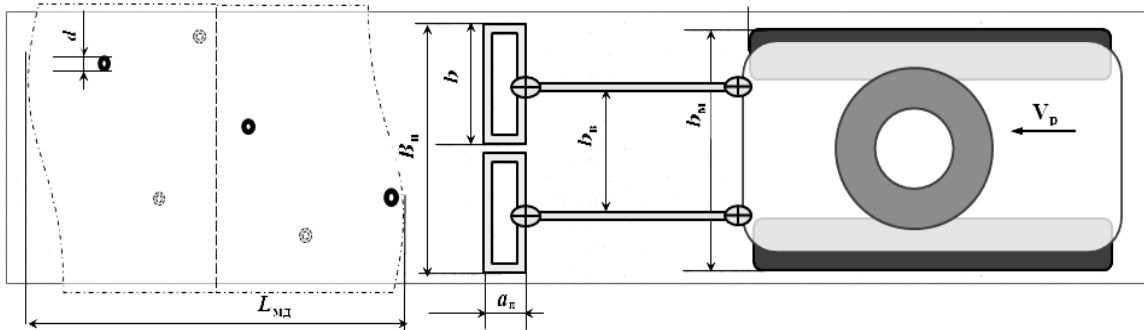


Рис. 1. Схема попадання ВВП у зону дії пошукового пристрою

Для визначення ймовірності виявлення ВВП при умові попадання його у зону дії пошукового пристрою було обрано нормальний закон розподілу [4]. Згідно із запропонованим підходом для розрахунків обирались значення випадкової величини коефіцієнту відбиття радіохвиль, який для наведеного прикладу дорівнював 0,44. Таке значення у [2] відповідало відбиття для розділу вологого ґрунту та рукотворного предмету у корпусі із пластмаси. При цьому, не зовсім зрозуміло: як визначались математичне очікування та середньоквадратичне відхилення коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ (ВВП та ґрунту). Також формульна залежність, яка наведена в [4] не повністю враховує неоднорідність укриваючих поверхонь, в яких встановлюються вибухонебезпечні предмети, та ймовірнісний характер зміни параметрів розповсюдження радіохвиль у підповерхневому шарі у залежності від його складу і завчасно не відомого (за матеріалом корпусу) типу ВВП.

Для усунення цієї невідповідності, визначення ймовірності виявлення ВВП за умов попадання його у зону дії пошукового пристрою пропонується здійснювати за формулою

$$P_{B/\Pi} = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{k_{\max} - m^*}{\sigma^* \sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{k_{\min} - m^*}{\sigma^* \sqrt{2}} \right) \right], \quad (3)$$

де $k_{\max(\min)}$ – максимальне (мінімальне) значення, яке може приймати коефіцієнт відбиття радіохвиль для реально можливих умов; m^* – математичне очікування коефіцієнту відбиття радіохвиль; σ^* – середньоквадратичне відхилення коефіцієнту відбиття радіохвиль.

Математичне очікування коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ буде визначатись як

$$m^* = \sum_{i=1}^n k_i / n, \quad i = \overline{1 \dots n}, \quad (4)$$

де k_i – значення коефіцієнту відбиття радіохвиль для вибірки очікуваних ґрунтових умов та типів ВВП; n – кількість значень коефіцієнту відбиття радіохвиль для вибірки очікуваних ґрунтових умов та типу ВВП.

Дисперсія коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ буде дорівнювати

$$D^* = \sum_{i=1}^n (k_i - m^*)^2 / (n-1), \quad i = \overline{1 \dots n}. \quad (5)$$

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ

$$\sigma^* = \sqrt{D^*}. \quad (6)$$

Визначення же коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ пропонується здійснювати із врахуванням їх відносного діелектричного проникнення [2 – 4] за формулою

$$k = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{гр}}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{ВНП}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{гр}}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{ВНП}}}}, \quad (7)$$

де $\varepsilon_{\text{гр(ВНП)}}$ – відносне діелектричне проникнення ґрунту та ВНП, значення яких наведені у роботах [2, 4].

Останнє удосконалення моделі, яке пропонується авторами цієї статті пов'язане із неврахуванням у [4] затухання радіохвиль та глибини їх проникнення при визначенні умовної ймовірності виявлення ВНП радіохвильовим методом. Для наочності скористаємось схемою, яка наведена на рис. 2.

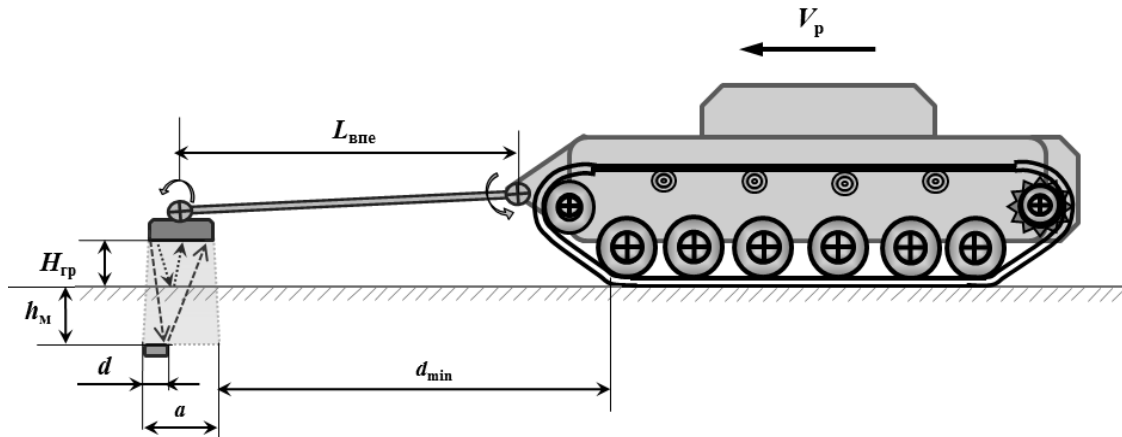


Рис. 2. Схема процесу виявлення ВНП у ґрунті за умов попадання у зону дії пошукового пристрою з радіохвильовим методом

Як видно з рис. 2, ймовірність виявлення ВНП за умов попадання у площину поверхневої зони дії пошукового пристрою із радіохвильовим методом залежить також від технічних характеристик пошукового пристрою щодо глибини проникнення радіохвиль та глибини встановлення ВНП.

Для врахування визначених параметрів доцільно ввести додаткове правило

$$h_m \leq l_{\text{рх}} - H_{\text{гр}}, \quad (8)$$

де h_m – глибина встановлення ВНП у ґрунті, м; $l_{\text{рх}}$ – максимальна відстань дії пошукового пристрою із радіохвильовим методом [4], м; $H_{\text{гр}}$ – висота встановлення пошукового пристрою по відношенню до поверхні ґрунту, м.

Враховані у (8) параметри використовувались й в попередніх роботах. Так в [4] їх пропонували використовувати для обґрунтування висоти розміщення пошукових елементів пристрою над рівнем ґрунту. У нашому випадку їх пропонується врахувати під час розрахунку ймовірності виявлення ВНП за умов попадання його у площинну зону дії пошукового пристрою. Так, якщо умова (8) виконується, то $P_{\text{ВНП}}$ визначається за виразом (3). Якщо не виконується, тоді $P_{\text{ВНП}} = 0$.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Таким чином, запропоновані в статті удосконалення дозволять підвищити точність розрахунків

під час моделювання процесу виявлення ВНП радіохвильовим методом. Напрямами подальших досліджень є удосконалення методичних підходів щодо дослідження процесів виявлення ВНП іншими методами пошуку.

Список літератури

1. Денисенко А.М. Математическая модель поражения легких бронированных машин взрывоопасными предметами фугасного типа / А.М. Денисенко, В.Н. Зиркевич, А.М. Андриенко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 4. – С. 34-37.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. – М.: Арбат-Информ, 2004. – 144 с.
3. Щербаков Г. Н. Новые методы обнаружения скрытых объектов. – М.: ООО Эльф ИПР, 2011. – 503 с.
4. Денисенко О.М. Математична модель виявлення вибухонебезпечних предметів пошуковим пристроєм з радіохвильовим методом, встановленим на легких броньованих машинах / О.М. Денисенко, С.В. Мацюк // Збірник наукових праць НАДПСУ ім. Б.Хмельницького. Серія: військові та технічні науки. – Хмельницький: Вид-во НАДПСУ, 2010. – № 52. – С. 54 – 57.
5. Карев А. Мобильный комплекс обнаружения взрывчатых веществ. Технология разминирования XXI века / А. Карев, В. Раевский, Ю. Коняев, А. Румянцев, А. Аверченко, // Электроника: Наука. Технологии. Бизнес. – 2000 – № 1 – С. 54-58.
6. Блюх П.В. Радиоволны на земле и в космосе / П.В. Блюх. – М.: Бюро Квантум, 2007. – 207 с.

Надійшла до редколегії 4.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Певцов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ
ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ РАДИОВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ**

В.И. Коцюрuba, О.М. Гусяков

На почве анализа существующих подходов предложена усовершенствованная математическая модель выявления взрывоопасных предметов радиоволновым методом, который, в отличие от существующих учитывает неоднородность укрывающих поверхностей, тип объекта поиска и характер изменения параметров распространения радиоволн в подповерхностном слое в зависимости от его состава.

Ключевые слова: математическая модель; взрывоопасный предмет; радиоволновой метод выявления.

**IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF EXPOSURE
EXPLOSIVE OBJECTS BY RADIO WAVE METHOD**

V.I. Kotsiubura, O.M. Gusliakow

On soil of analysis of existent approaches the improved mathematical model is offered of exposure of explosive objects a radio wave method which, unlike existing heterogeneity of covering surfaces, type of object of search and character of change of parameters of distribution of radio waves, takes into account in a subsuperficial layer depending on its composition.

Keywords: mathematical model; explosive object; radio wave method of exposure.