

УДК 621.396.96:004.94. 621.3.62-1. 517.958:537.8

**Микола Лисий**

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри транспортних засобів інженерного  
забезпечення охорони державного кордону,  
Національна академія Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький  
<https://orcid.org/0000-0002-9858-706X>  
*lisiy3152@ukr.net*

**Олександр Стрельницький**

кандидат технічних наук, доцент,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
м. Харків  
<https://orcid.org/0000-0003-0933-0324>  
*strela12624@gmail.com*

**Тарас Суслов**

кандидат педагогічних наук,  
Національна академія Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький  
<https://orcid.org/0000-0003-3811-0902>  
*zvdozdk@i.ua*

**Андрій Чуканов**

старший викладач,  
Національна академія Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький  
<https://orcid.org/0000-0002-7925-1026>  
*chukanov1990@ukr.net*

© Лисий М., Стрельницький О., Суслов Т., Чуканов А.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛИННОЇ МАГНІТНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ГЕОРАДАРІВ ЯК ЗАСОБІВ ПОШУКУ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ КОНТРАБАНДИ ЧЕРЕЗ ДЕРЖАВНИЙ КОРДОН

Боротьба з контрабандою досить поширена в усьому світі, не оминуло це і Україну. Новий вид контрабанди, а саме підповерхнева контрабанда, докорінно змінив підхід у боротьбі із нею. Прихованість від неозброєного ока, малі розміри та невелика витрата сил у прокладанні – виклик для сучасності. Актуальним завданням є удосконалення георадарів для потреб охорони та захисту державного кордону, зокрема антенних пристроїв, оскільки інформаційною ознакою для розпізнавання об'єктів можуть служити поляризаційні відмінності радіолокаційних зображень на двох взаємно ортогональних поляризаціях випромінювання і прийому сигналів. У статті досліджено та запропоновано антену, що являє собою екрановану магнітну щілинну антену, використовуючи яку, можна випромінювати й приймати сигнали ортогональних поляризацій, що дозволяє виявляти в ґрунті метали та діелектричні предмети з лінійними розмірами понад 15 см незалежно від їх орієнтації щодо антени. Антена становить порожнистий циліндричний об'ємний резонатор з металевими стінками. Така антена використовувалась у експериментальному георадарі, передавальна і приймальна частина якого мають загальну антену. Застосування циркулятора дозволяє використовувати одну і ту ж антену при передаванні і прийманні зондуючого сигналу. Глибина виявлення залежить від розмірів об'єктів і електричних властивостей ґрунту. Теоретично в сухому піску запропонований тип антени, встановленої на георадар неперервного випромінювання, дозволить виявляти приховані предмети, які мають лінійні розміри понад 15 см, на глибині до 3 м, що відповідає характеристикам засобів підповерхневої контрабанди через державний кордон.

Також було розроблено і створено широкосмугову прямокутну щілинну магнітну антену. Випробування цієї антени проводилися в складі георадара в умовах, наближених до польових. Для цього був створений спеціальний стенд, що складається з ящика з піском і

механізму, призначеного для переміщення георадара спільно з антеною. У пісок, на глибину 25-30 см, на відстані близько 50 см один від одного, як макети мін закопувались діелектричний кубик розміром 15×7 см і металева банка розміром висотою 10 см і діаметром 8 см. Результати експерименту дозволяють стверджувати про перспективність такого типу антен для розроблення георадарів.

**Ключові слова:** георадар; антена; підповерхнева контрабанда; державний кордон.

## 1. ВСТУП

Державна прикордонна служба України у межах своїх повноважень виконує завдання щодо захисту державного кордону від усіх ризиків та небезпек, що можуть завдати шкоду державі. Здебільшого суттю протиправної діяльності на державному кордоні є контрабандна діяльність як загроза безпеці держави у різних сферах її діяльності. Контрабанда суттєво впливає на криміногенну ситуацію, має організований характер та здійснюється злочинними організаціями. Протидія контрабанді постійно розвивається відповідно до способів і засобів її реалізації.

**Постановка проблеми.** Відносно новими є загрози, які пов'язані із застосуванням засобів підповерхневої контрабанди на державному кордоні (рис. 1, 2) [1].

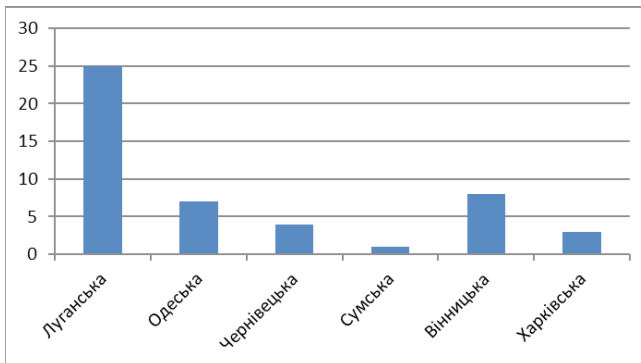


Рис. 1. Статистичні дані виявлення підповерхневої контрабанди на державному кордоні по областях України протягом 2012-2019 років

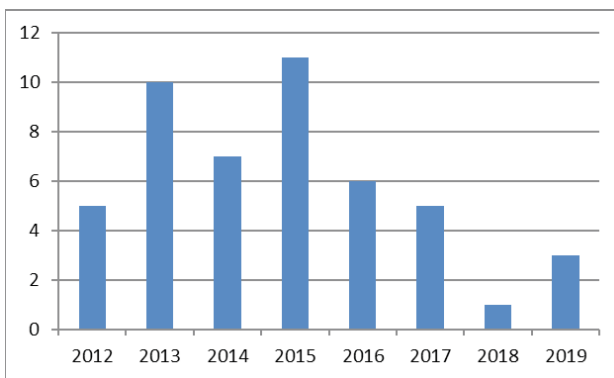


Рис. 2. Статистичні дані виявлення підповерхневої контрабанди на державному кордоні протягом 2012–2019 років

Прихованість, потенційна можливість транспортування людей і зброї, задіяння міждержавних криміналістичних угруповань робить такий тип загроз значимим як для ДПСУ, так і в цілому для національної безпеки держави.

Відповідно до довідки про результати застосування георадарів протягом 2019 року ДПСУ відзначається, що місць, на яких можливе приховане облаштування підземних комунікації, не виявлено. Як відзначається у довідці, існують проблемні питання, а саме: тактико-технічні характеристики георадарів ДПСУ не дозволяють ефективно виявляти трубопроводи, що прокладені за допомогою поліпропіленових, пластикових, гумових труб та шлангів і таких, що мають діаметр менше 100 мм [1].

Актуальним завданням є удосконалення георадарів для потреб охорони кордону і зокрема антенних пристроїв георадарів. Постає необхідність у впровадженні змін, тобто постановки завдання перед розробниками, щодо модернізації вже наявних георадарів або розробки нового зразка для ефективного використання на державному кордоні.

Найбільш часто використовуваним є георадар із відеоімпульсним методом зондування. Як зондує сигнал у такому типі георадара використовується короткий імпульс без несучої частоти [2]–[6].

Альтернативою відеоімпульсного георадара є SFCW георадар (SFCW – Step Frequency Continuous Wave (англ.) [8]–[11]. Зондує сигнал

сигнал у SFCW георадарі є послідовністю когерентних радіоімпульсів, частота яких змінюється за лінійним законом [8]–[11]. Застосування такого зонduючого сигналу дозволяє враховувати частотну дисперсію ґрунту на кожному частотному кроці зонduючого сигналу при математичній обробці даних, одержуваних у результаті зондування, тому такий підхід є більш інформативним, ніж при використанні відеоімпульсу [8]–[11].

У роботах [9], [10] предметно описується метод SFCW підповерхневого радіолокаційного зондування. У цих роботах обґрунтовано перевагу застосування методу SFCW радіолокаційного підповерхневого зондування по відношенню до відеоімпульсного методу, а саме: застосування цифрової обробки зонduючого сигналу на більш низькій частоті, ніж у відеоімпульсних георадарів; збільшення середньої випромінюваної потужності; відсутність необхідності використання високовольтних імпульсних вихідних каскадів; збільшення динамічного діапазону георадара; можливість узгодження смути випромінюваних частот зонduючого сигналу з відповідною смутою робочих частот антенної системи.

Важливою інформаційною ознакою для розпізнавання об'єктів можуть служити поляризаційні відмінності радіолокаційних зображень на двох взаємно ортогональних поляризаціях випромінювання і прийому сигналів. У такому випадку основною проблемою є розроблення антенної системи, здатної ефективно випромінювати й приймати відбиті підповерхневими об'єктами сигнали на двох ортогональних поляризаціях з незмінним фазовим центром антен [13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Антенна система георадара безпосередньо взаємодіє з досліджуванним середовищем, а саме випромінює в напрямку досліджуваного середовища зонduючий сигнал (передавальна антена) і приймає відбитий від цілі зонduючий сигнал (приймальна антена) [4], [5]. У георадіолокації на передавання і приймання можуть використовуватися дві рознесені антени (бістатична антенна система) або поєднана антена (моностатична антенна система). Антени можуть бути резонансними (наприклад, дипольні антени), широкосмуговими (наприклад, рупорні антени, антена Вівальді) [6]. Також антени можуть бути екранованими або неекранова-

ними [4]. Смути робочих частот передавальної й приймальної антен мають бути узгоджені з частотним спектром зондуючого сигналу. Вимоги до конструкції антенної системи георадара визначаються цілями та завданнями самого зондування з урахуванням електричних властивостей досліджуваних середовищ [4]–[6].

**Метою статті** є дослідження щілинної магнітної антени для георадарів як засобів пошуку підповерхневої контрабанди через державний кордон.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропонована антена являє собою екрановану магнітну щілинну антену, використовуючи яку, можна випромінювати й приймати сигнали ортогональних поляризацій, що дозволяє виробляти поляризаційну селекцію об'єктів. Антена виготовлена на основі патенту [12]. Конструкція антени така, що фазові центри ортогональних щілинних випромінювачів збігаються в обох поляризаціях. Це дозволяє зменшити фазові спотворення зондуючих радіолокаційних сигналів, які можуть відбуватися через різні шляхи поширення радіохвиль. “Розв’язка” між двома ортогональними щілинними випромінювачами в діапазоні частот 500-1000 МГц становить понад 25 дБ. Антена являє собою порожнистий циліндричний об’ємний резонатор з металевими стінками, в одній з площин якого прорізани щілини, утворені чотирма зігнутими, такими, що розходяться, металевими пелюстками. Конструкцію цієї антени подано на рис. 3.

Принцип роботи цієї антени полягає в такому: електричне з’єднання металевих пелюсток 1-го з 2-м і 3-го з 4-м у місцях, зазначених точками, утворює щілинний випромінювач 6-8. Відповідно, електричне з’єднання металевих пелюсток 1-го з 4-м і 2-го з 3-м у місцях, зазначених точками, утворює щілинний випромінювач 5-7, який ортогональний щілинному випромінювачу 6-8. Електричне з’єднання пелюсток проводиться за допомогою перемикачів на р-і-n діодах, які управляються відповідними сигналами з блока управління. Активна частина вхідного опору антени у відкритому просторі в діапазоні частот 500-1000 МГц становить 200 Ом. Антена підключається до гео-

радару за допомогою 50-омного фідера і трансформатора (надвисоко-частотного трансформатора з коефіцієнтом трансформації 1:4, наприклад, JTX-4-10T фірми Minicircuits). Вимірний КСХ (коефіцієнт стоячої хвилі) антени в діапазоні частот 400-1200 МГц при використанні трансформатора представлено на рис. 4.

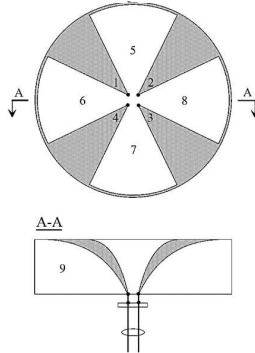


Рис. 3. Щілинна екранована магнітна антена

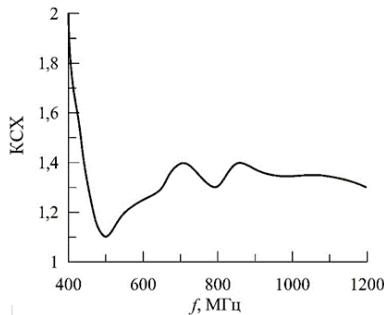


Рис. 4. КСХ щілинної магнітної антени

Така антена використовувалася в експериментальному георадарі, передавальна і приймальна частина якого мають загальну антену. “Розв’язка” передавальної і приймальної частини георадара здійснюється за допомогою надвисокочастотного циркулятора [13]. Застосування циркулятора дозволяє використовувати одну й ту ж антену при передаванні й прийманні зондуємого сигналу. Використання щілинної магнітної антени в складі багаточастотного когерентного підповерхне-

вого радіолокатора, що працює в діапазоні частот 500-1000 МГц, дозволяє визначати місце розташування похованих в ґрунті металевих і діелектричних предметів з лінійними розмірами понад 15 см [13].

Також було розроблено і створено ширококутову прямокутну щілинну магнітну антену. Випробування цієї антени проводилися в складі з SFCW георадара в умовах, наближених до польових. Для цього був створений спеціальний стенд, що складається з ящика з піском і механізму, призначеного для переміщення георадара спільно з антеною. У пісок, на глибину 25–30 см, на відстані близько 50 см один від одного, як макети мін закопувались діелектричний кубик розміром 15 × 7 см і металева банка розміром висотою 10 см і діаметром 8 см. Результати зондування подано на рис. 5 [13].

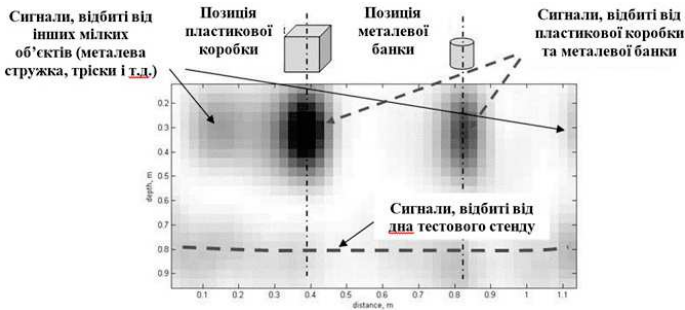


Рис. 5. Радіолокаційні зображення діелектричного і металевих об'єктів

### 3. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Застосування запропонованої конструкції щілинної магнітної антени спільно з SFCW георадаром дозволяє визначити місце розташування закопаних у ґрунті металевих і діелектричних предметів з лінійними розмірами понад 15 см незалежно від їх орієнтації щодо антени. Глибина виявлення залежить від розмірів закопаних предметів і електричних властивостей ґрунту. Теоретично в сухому піску потенціал SFCW георадара спільно із запропонованою антеною дозволяє виявляти закопані предмети, що мають лінійні розміри понад 15 см, на глибині до 3 м. Напрямок подальших досліджень є розробка георадара із запропонованими конструкціями антен.



**Список використаних джерел:**

1. Шинкарук О., Лисий М., Бабій Ю., Чуканов А. Аналіз стану проти-правної діяльності на державному кордоні України із застосуванням засобів підповерхневої контрабанди. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки.* Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2019. № 2. С. 364–403.
2. Финкельштейн М. И., Карпухин В. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. *Радио и связь.* Москва, 1994. 216 с.
3. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Москва : Издательство МГУ, 2004. 153 с.
4. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации. Москва : Издательство “Горная книга”. 2008. 196 с.
5. Annan A. P. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc., 2003. 278 p.
6. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. 2<sup>nd</sup> Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 2004. 734 p.
7. Теория и методы георадиолокации : учебное пособие. Москва : Изда-тельство Московского государственного горного университета, 2008. 196 с.
8. Iizuka K., Freundorfer A. P., Wu et al K. H. Step-frequency radar. *Journal of Applied Physics.* 1984. Vol. 56, № 9. P. 2572–2583.
9. Langman A. The Design of Hardware and Signal Processing for a Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar, Ph. D. Dissertation. University of Cape Town. 2002. 195 p.
10. Noon D. A. Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Ground Penetrating Radar Performance, Ph. D. Dissertation. The University of Queensland. 1996. 180 p.
11. Nguyen C., Park J. Stepped-frequency radar Sensors. Springer, 2016. 129 p.
12. Сугак В. Г., Букін А. В., Васильєва О. М. Щілинна антена для радіоло-каторів підповерхневого зондування. Патент № 103381 від 10.10.2013.
13. Радиолокатор со ступенчатим изменением частоты для обнаруже-ния и распознавания малогабаритных объектов под поверхностью Земли / Сугак В. Г. та ін. *Радиофизика и электроника.* 2010. т. 15, № 3. С. 92–97.

**References**

1. Shinkaruk O., Lisij M., Babij Yu., Chukanov A. (2019). *Analiz stanu protipravnoyi diyalnosti na derzhavnomu kordoni Ukrayini iz zastosuvannyam*

*zasobiv pidpoverhnevoyi kontrabandi* [Analysis of the state of illegal activity on the state border of Ukraine with the use of surface smuggling]. Zbirnik naukovih prac Nacionalnoyi akademiyi Derzhavnoyi prikordonnoyi sluzhbi Ukrayini. Seriya: Vijskovi ta tehnicni nauki, Hmelnickij: Vid-vo NADPSU. № 2. S. 364–403. [in Ukrainian]

2. Finkelshtejn M. I., Karpuhin V. I., Kutev V. A., Metelkin V. N. (1994). *Podpoverhnostnaya radiolokaciya* [Subsurface radar]. Radio i svyaz. Moskva. 216 s. [in Russian].

3. Vladov M. L., Starovojtov A. V. (2004). *Vvedenie v georadiolokaciju* [Introduction to GPR]. Moskva, Izdatelstvo MGU. 153 s. [in Russian].

4. Izjumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskij A.S. (2008). *Teoriya i metody georadiolokacii* [Theory and methods of ground penetrating radar]. Izdatelstvo “Gornaya kniga”. Moskva. 196 s. [in Russian].

5. Annan A. P. (2003). *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Inc.. 278 p. [in English].

6. Daniels D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. 2<sup>nd</sup> Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 734 p. [in English].

7. *Teoriya i metody georadiolokacii*. [Theory and methods of GPR]. Ucheb. posobie. Izdatelstvo “Gornaya kniga”. Moskva, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2008. 196 s. [in Russian]

8. Iizuka K., Freundorfer A. P., Wu et al K. H. (1984). Step-frequency radar. *Journal of Applied Physics*. Vol. 56, № 9. P. 2572–2583. [in English].

9. Langman A. (2002). *The Design of Hardware and Signal Processing for a Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar*, Ph.D. Dissertation. University of Cape Town. 195 p. [in English].

10. Noon D. A. (1996). *Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Ground Penetrating Radar Performance*, Ph.D. Dissertation. The University of Queensland. 180 p. [in English].

11. Nguyen C., Park J. (2016). *Stepped-frequency radar Sensors*. Springer. 129 p. [in English].

12. Sugak V. G., Bukin A. V., Vasilyeva O. M. *Shilinna antena dlya radiolokatoriv pidpoverhnevogo zonduvannya*. [Slot antenna for subsurface sounding radars]. Patent № 103381 vid 10.10.2013. [in Russian].

13. *Radiolokator so stupenchatym izmeneniam chastoty dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya malogabaritnyh obektov pod poverhnostyu Zemli* (2010). / Sugak V. G. Ta in. [Frequency stepped radar for detecting and recognizing small objects below the Earth's surface] *Radiofizika i elektronika*. t. 15, № 3. S. 92–97. [in Russian].

**Mykola Lysy, Oleksandr Strelnytskyi, Taras Suslov, Andriy Chukanov. Investigation of a Slotted Magnetic Antenna for Georadar as a Means of Searching for Subsurface Smuggling Across the State Border**

The fight against smuggling is a common thing in all the world, and it is not spared Ukraine. A new kind of contraband, namely subsurface smuggling, radically changed the approach to combating it. Stealth from the naked eye, the small size and relatively low forces in the strip - a challenge for contemporary. The actual problem is the improvement of ground penetrating radars for the needs and protection of the state border, in particular, antenna devices, since the information basis for the recognition of objects can serve as polarization differences of radar images in two mutually orthogonal polarizations of the radiation and reception of signals. In article is researched and proposed antenna, which is a shielded magnetic slit antenna, which can radiate and receive signals in orthogonal polarizations, which allows to identify in the soil of metallic and dielectric objects with linear dimensions of 15 cm, irrespective of their orientation relative to the antenna. The antenna is a hollow cylindrical volume resonator with metallic walls. This antenna was used in an experimental ground-penetrating radar, the transmitting and the receiving part which have a common antenna. The use of a circulator allows you to use the same antenna for the transmission and reception of the probing signal. Depth of detection depends on the object size and the electrical properties of the soil. Theoretically, in dry sand, proposed type antenna mounted on ground-penetrating radar continuous radiation, will reveal hidden objects with linear sizes of more than 15 cm, at depths up to 3 m, which corresponds to the characteristic of the products of subsurface smuggling across the state border.

A wideband rectangular slit magnetic antenna was also developed and created. Tests of this antenna were performed as part of georadar in conditions close to field. To do this, a special stand was created, consisting of a box of sand and a mechanism designed to move the georadar together with the antenna. In the sand, at a depth of 25-30 cm, at a distance of about 50 cm from each other, as a model of mines, buried a dielectric cube the size of 15 × 7 cm and a metal can with a height of 10 cm and a diameter of 8 cm. The results of the experiment allow us to assert the prospects of this type of antenna for the development of georadars.

**Key words:** georadar; antenna; subsurface smuggling; state border.