

Ю. С. Тарасенко, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри кібербезпеки Університету митної справи та фінансів
В. В. Смірнов, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів
Д. І. Прокопович-Ткаченко, кандидат технічних наук, виконувач обов'язків завідувача кафедри кібербезпеки Університету митної справи та фінансів

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ШТУЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ В УМОВАХ МИТНОГО КОНТРОЛЮ

Розглянуто актуальну проблему особливостей виявлення прихованих об'єктів штучного походження, які перебувають в умовах взаємодії з контрольо-вимірювальною радіоапаратурою митного контролю. Здійснено порівняння характеристик розсіювання об'єкта у вигляді як комплексного коефіцієнта відбиття (отриманого за допомогою моделі радіоканалу), так і ефективної площини розсіювання об'єкта. Наведено основне рівняння нелінійної радіолокації, яке описує поведінку двокомпонентної радіосистеми, в якій у відображення нелінійними елементами об'єкта, що опромінюється, вносяться деякі амплітудно-частотні перетворення зондувального сигналу передавача радіолокаційної станції.

Ключові слова: митний контроль; об'єкти штучного походження; комплексний коефіцієнт відбиття; ефективна площина розсіювання об'єкта.

Рассмотрена актуальная проблема особенностей выявления скрытых объектов искусственного происхождения, находящихся в условиях взаимодействия с контрольно-измерительной радиоаппаратурой таможенного контроля. Выполнено сравнение характеристик рассеивания объекта как в виде комплексного коэффициента отражения (полученного с помощью модели радиоканала), так и в виде эффективной плоскости рассеивания объекта. Приведено основное уравнение нелинейной радиолокации, описывающее

© Ю. С. Тарасенко, В. В. Смірнов, Д. І. Прокопович-Ткаченко, 2019

поведение двухкомпонентной радиосистемы, в которой в отображения нелинейными элементами облучаемого объекта вносятся некоторые амплитудно-частотные преобразования зондирующего сигнала передатчика радиолокационной станции.

Ключевые слова: таможенный контроль; объекты искусственного происхождения; комплексный коэффициент отражения; эффективная плоскость рассеивания объекта.

With the advent of near and later non-linear types of radar, it became possible to solve, in addition to radar, a number of other applied problems, such as problems of diagnostic and flaw detection, customs control, humanitarian demining, forensic science, archeology and construction with terrorism.

The article deals with the actual problem of peculiarities of detection of hidden objects of artificial origin, which are in the conditions of interaction with the control and measuring radio equipment of customs control, which do not satisfy the criterion of the far zone.

The object/targets catering characteristics were compared both in the form of a complex reflection coefficient (obtained using a radio channel model) and in the form of an effective object/targets catering plane.

In general, the object/target is displayed from the point of view of anisotropic fixed-point emitter f for a fixed stationary orientation of the signal/signal relative to the propagation direction of the incident and reflected waves of stability of the polarization characteristics of the transmitting and receiving antennas of the radar.

The basic nonlinear radar equation is described, which describes the behavior of a two-component radio system, in which some amplitude-frequency transformations of the radar transmitter sounding transducer signal are introduced into the reflection by nonlinear elements of the irradiated object/target.

Basically, nonlinear radio signals describing the behavior of a two-component radio system are considered, since the secondary reflection contains nonlinear signal elements that are often used to transmit frequency signals.

The results of the nonlinear transformation of the sounding signal on nonlinear elements with harmonic frequencies are combinations there of are based on the analysis of the scattering properties of the model in the form of antennas with the nonlinearities included there in.

The task of expediency of carrying out full-scale experimental researches of character of behavior of effective reflection ability of specific typical objects for drawing up of a databank containing portraits of hidden images of typical customs control object is set.

Key words: customs control; objects of artificial origin; complex reflection coefficient; effective scattering plane of the object.

Постановка проблеми. З появою ближньої [1], а в подальшому й нелінійної радіолокації [2] з'явилася можливість розв'язувати, крім радіолокаційних [3–7], цілу низку інших прикладних задач, наприклад завдань діагностичного й дефектоскопічного характеру, митного контролю, гуманітарного розмінування, криміналістики, археології, будівництва та боротьби з тероризмом [8]. З огляду на це актуальний розгляд особливостей вимірювання характеристик розсіяного поля на об'єктах (цілях) штучного походження (у тому числі прихованих), які перебувають в умовах взаємодії з контрольно-вимірювальною радіоапаратурою, що не задовольняє критерій дальньої зони.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За визначенням ефективна площа розсіювання (далі – ЕПР або ЕВП, тобто ефективна відбивна поверхня) являє собою розмірний коефіцієнт пропорційності між густиною потоку опромінювальної потужності електромагнітної хвилі в точці розташування об'єкта (цілі) й повною, розсіяною цим об'єктом (ціллю) потужністю.

При цьому об'єкт (ціль) зображують у вигляді ізотропного точкового випромінювача із фіксованою частотою випромінювання f за незмінної орієнтації об'єкта (цілі) щодо напрямку поширення падаючої та відбитої хвиль і сталості поляризаційних характеристик передавальної та приймальної антен радіолокаційної станції (далі – РЛС) [3; 9]:

$$\sigma(\theta, \varphi) = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} \frac{4\pi R_0^2 |E_s|^2}{|E_r|^2}, \quad (1)$$

де θ, φ – кутове положення об'єкта (цілі) щодо напрямків опромінювального поширення і розсіяних хвиль;

E_r і E_s – відповідно падаюче поле на розсіювальний об'єкт (ціль) і розсіювальне (відбите) поле в далекій зоні.

Умова $R_0 \rightarrow \infty$ підтверджує доцільність знаходження об'єкта (цілі) в далекій зоні, в якій хвильовий процес можна зобразити за допомогою плоских хвиль.

Наприклад, ЕВП об'єктів (цілей), описуваних моделлю ідеально провідного тіла, розміри якого значно більші за довжину хвилі, має вираз [3]:

$$\sigma_{\text{вп}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{S_{\text{осв}}} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta r') dS' \right|^2, \quad (2)$$

де $\Delta r = r - D$ – різниця ходу;

D і r – відповідно відстані від РЛС до відлікової площини об'єкта й до довільної точки на освітленій поверхні будь-якої виділеної плоскої елементарної ділянки завдовжки dl й завширшки da ;

$S_{\text{осв}}$ – площа освітленої поверхні;

$$dS' = d_\ell \cdot da \cdot \cos\theta.$$

Отже, ЕВП $\sigma_{об}$ залежить від форми, розмірів об'єкта (цілі), її орієнтації щодо напрямку опромінення й довжини хвилі.

Мета статті полягає в розгляді особливостей вимірювання характеристик розсіяного електромагнітного поля на прихованих об'єктах штучного походження, які перебувають в умовах взаємодії з контрольно-вимірювальною радіоапаратурою митного контролю, що не задовольняє критерій дальньої зони; порівняння характеристик розсіювання об'єкта як у вигляді комплексного коефіцієнта відбиття (отриманого за допомогою моделі радіоканалу), так і його (об'єкта) ЕВП з акцентом на правомірність, доцільність і однозначність їхнього використання.

Виклад основного матеріалу. Розглядаючи пізнавальну модель у вигляді радіоканалу, доцільно ввести поняття комплексного коефіцієнта відбиття у вигляді співвідношення [10]:

$$\rho_\ell(\theta, \varphi) = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} \sqrt{4\pi R_0} \frac{E_S(\theta, \varphi)}{E_r(\theta, \varphi)} \quad (3)$$

або

$$\rho_\ell(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{p}_i \cdot \vec{n} e^{-ip_i r} dS. \quad (4)$$

Комплексний коефіцієнт відбиття $\rho_\ell(\theta, \varphi)$ містить інформацію не тільки про амплітуду, але й про фазу розсіяного поля, причому фазовий множник відповідає місцю розташування тієї локально-відбивної особливості поверхні об'єкта (наприклад, у вигляді “блискучої” або “дзеркальної” точки), на якій відбулося розсіювання (відбиття).

Наприклад, для сфери радіуса a співвідношення (4) після обчислення інтеграла має вигляд:

$$\rho_\ell = \frac{\kappa a}{2} (1 - i/(2\kappa a)) e^{-2i\kappa a}. \quad (5)$$

Отже, обираючи за точку відліку фази центр сфери, комплексний коефіцієнт відбиття можна записати так:

$$\rho_\ell(\theta, \varphi) = |\rho_\ell(\theta, \varphi)| e^{i\psi}, \quad (6)$$

де $\psi = \Delta\psi + \psi^*$; $\Delta\psi = 2\pi R_0/\lambda$ – фазове набігання, що залежить від дальності R_0 ;

$\psi^* = 2\kappa \ell^*$ – додаткове фазове набігання, отримане за рахунок відстані

ℓ^* від локальної розсіювальної точки (області) на об'єкті до відлікової фазової площини.

Кутові залежності амплітуди (модуль $|\rho_\ell(\theta, \varphi)|$) і фази розсіювального поля прийнято вважати найпростішими радіолокаційними характеристиками (далі – РЛХ) об’єкта. Зазначені РЛХ зазвичай зображують у вигляді кругових діаграм (діаграм розсіювання), що характеризують залежність відбивних властивостей об’єкта від кута падіння хвилі на об’єкт і від кута між напрямками опромінення і прийняття.

Для складних об’єктів, таких як приховані об’єкти штучного походження, можна досліджувати явище розсіювання за допомогою поняття елементарних відбивачів або центрів розсіювання.

У цьому випадку об’єкт у цілому зображують набором центрів, кожен з яких викликає розсію хвилю з деякою амплітудою, фазою і поляризацією. Відтак кожний такий центр перевипромінювання, локалізований на об’єкті, можна характеризувати його амплітудною діаграмою, діаграмою ЕПР і фазовою діаграмою. Подібні характеристики прийнято називати локальними характеристиками розсіювання. Вони можуть бути визначені, наприклад, на основі застосування методу крайових хвиль (далі – МКХ) або геометричної теорії дифракції (далі – ГТД), які використовують концепцію центрів розсіювання [10]. При цьому розташування центрів розсіювання на об’єкті можна визначити з огляду на фізичні міркування (як правило, тільки для простих об’єктів) або експериментальні дані. Звідси впливає потреба створення банку даних за образами об’єктів штучного походження (у тому числі прихованих), до подібних відбитків пальців або рогівки очей.

У підсумку значення повної ЕПР (ЕВП) можна оцінювати, послуговуючись характеристиками окремих локальних центрів та використовуючи співвідношення вигляду:

$$\sigma(\theta, \varphi) = \left| |\rho_{\ell_1}(\theta, \varphi)| e^{i\psi_1} + \dots + |\rho_{\ell_n}(\theta, \varphi)| e^{i\psi_n} \right|^2; \quad \Psi_n = 2\kappa d_n + \psi_{n_0}, \quad (7)$$

де d_n – відстань від n -го локального центра розсіювання до відлікової фазової площини з початковою фазою ψ_{n_0} .

Слід звернути увагу, що використані поняття коефіцієнта відбиття q ефективної площі вторинного випромінювання припускають певні виправдані припущення.

Так, коефіцієнт відбиття, що описує розсіювальні властивості об’єкта, реалізований за допомогою математичної моделі у вигляді радіолокаційного каналу, в якому сам об’єкт є незалежним елементом даного інформаційного каналу.

Поняття ж ЕВП/ЕПР вводилося принаймні за двох припущень [10]:

- спадна хвиля на розсіювальному об’єкті приймалася за плоску й монохроматичну;

▪ напруженість відбитої (розсіяної) електромагнітної хвилі вимірювалася на достатній відстані від розсіювального об'єкта, при цьому хвилю вважали також плоскою.

Як відомо [9–12], ці припущення вважають виправданими, якщо дотримано умов реалізації критерію далекої зони або враховано особливості електромагнітних полів у близькій зоні взаємодії об'єкта з контрольно-вимірювальною апаратурою (наприклад, за ближньої радіолокації).

Таким чином, для опромінення об'єктів на несучій частоті доцільно застосовувати поняття ЕПР об'єктів/цілей з подальшою метою створення банку даних для розпізнавання прихованих об'єктів митного контролю.

У разі використання складних зондувальних сигналів, скажімо, під час опромінення об'єктів дослідження надширококустовими сигналами, бажано послуговуватися поняттям коефіцієнтів відбиття. При цьому очевидно, що оптимальність застосування того чи іншого поняття (ЕВП або коефіцієнта відбиття) насамперед визначають рівнем складності поверхні досліджуваного об'єкта, що, як правило, залежить від вибору методу його дослідження та умов реалізації експерименту.

Водночас прийнято зображати процес спостереження в умовах нелінійної радіолокації (далі – НРЛ) у вигляді радіосистеми, де у відбиття від об'єкта нелінійними елементами цього об'єкта вноситься деяке амплітудно-частотне перетворення зондувального сигналу передавача РЛС. У цьому випадку основне рівняння НРЛ має вигляд [11]:

$$P_{n \text{ пр}} = \frac{P_{\text{випр}} G_{\text{випр}} G_{n \text{ пр}} \lambda^2}{4\pi R_d^4} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 K_1(\omega) K_2(\omega_n) G_{\text{ц.пр}} G_{n \text{ випр ц}} K_{\text{пр}}(\omega) K_{\text{випр}}(\omega) \xi_n(\omega, P_{\text{випр}}), \quad (8)$$

де R_d , λ – відповідно відстань до об'єкта й довжина хвилі опромінення;

$P_{\text{випр}}$, $G_{\text{випр}}$, $P_{n \text{ пр}}$, $G_{n \text{ пр}}$ – відповідно вихідні на основній частоті й вхідні на n -й гармоніці зондувального сигналу потужності і коефіцієнти підсилення передавача й приймача активної РЛС;

$K_1(\omega)$, $K_2(\omega_n)$ – коефіцієнти, що характеризують дисперсію середовища поширення на основній і n -й гармоніці відповідно зондувального й перевипроміненого об'єктом сигналів;

$G_{\text{ц.пр}}$, $G_{n \text{ випр ц}}$ – відповідно коефіцієнти підсилення об'єкта в режимі приймання нелінійними елементами і його перевипромінення на n -й гармоніці;

$K_{\text{пр}}(\omega)$, $K_{\text{випр}}(\omega)$ – коефіцієнти, що відповідають за частотну залежність лінійних кіл об'єкта відповідно в режимі приймання й перевипромінення;

$\xi_n(\omega, P_{\text{випр}})$ – коефіцієнт перетворення нелінійними елементами об'єкта потужності зондувального сигналу на потужність вищих гармонійних складових.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Очевидна складність, а в більшості випадків нелінійних об'єктів – неможливість прямого використання співвідношення (8), оскільки прогнозування поведінки його параметрів $K_1(\omega)$, $K_2(\omega_n)$, $K_{пр}(\omega)$, $K_{випр}(\omega)$, $\xi_n(\omega, P_{випр})$ залишається практично нездійсненним завданням. Тому, як правило, результати нелінійного перетворення зондувального сигналу на нелінійних елементах із частотами гармонік або їх комбінацій ґрунтуються на аналізі розсіювальних властивостей моделі у вигляді антени або антен із включеними в них нелінійностями [9–12]. Доцільне проведення натурних (експериментальних) досліджень характеру поведінки ЕПР конкретних типових об'єктів з метою комплектації портретів прихованих об'єктів митного контролю.

Крім того, у перспективі необхідно враховувати особливості забезпечення нормативних вимог під час проведення радіотехнічних вимірювань даного профілю, здатного забезпечити рівень гарантованих вимірювань у малому довірчому інтервалі припустимих похибок виявлення прихованих об'єктів штучного походження.

Список використаних джерел:

1. *Каргашин В. Л., Ткач В. Н., Ткачев Д. В.* Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств // Специальная техника, ОАО “Электрозавод”. 2006. № 6. С. 42–48.
2. *Мусабеков П. М., Паньчев С. Н.* Нелинейная радиолокация: методы, техника и области применения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 5. С. 54–61.
3. *Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / под ред. Я. Д. Ширмана.* Москва: Радиотехника, 2007. 512 с.
4. *Зинченко М. В., Во Зуй Фук, Зиньковский Ю. Ф.* Тестирование нелинейных радиолокаторов на надежность идентификации // Вестник НТУУ “КПИ”. Серия: Радиотехника. Радиоаппаратостроение. 2017. № 68. С. 48–53.
5. *Зинченко М. В., Во Зуй Фук, Зиньковский Ю. Ф.* Исследование спектральных характеристик рассеивающих МОМ-структур в нелинейной локации // Вестник НТУУ “КПИ”. Серия: Радиотехника. Радиоаппаратостроение. 2017. № 70. С. 11–16.
6. *Вернигоров Н. С., Кузнецов Т. В.* К вопросу о принципе сравнения в нелинейной радиолокации // ИНФОРМОСТ “Радиоэлектроника и телекоммуникации”. 2002. № 3 (21). С. 8–14.

7. Бельчиков А. В., Мишустин Б. А., Дзисяк А. Б., Зайцев В. К. Взгляд разработчиков нелинейных локаторов серии «Лорнет» на некоторые актуальные вопросы нелинейной локации // Техника. Арсенал. Специальная техника. 2011. № 5. С. 14–20.

8. Щербаков Г. Н. Обнаружение скрытых объектов для гуманитарного разминирования, криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. Москва: Арбат-Информ, 2004. 144 с.

9. Тарасенко Ю. С. Фізичні основи радіолокації. Дніпро: Пороги, 2011. 487 с.

10. Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. 232 с.

11. Вернигоров Н. С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. С. 11–13.

12. Шифрин Я. С. Нелинейные эффекты в антеннах // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 4. С. 33–44.

References:

1. Kargashin V. L., Tkach V. N. and Tkachev D. V. (2006), “*Nelineynaya blizhnyaya radiolokatsiya. Novyye algoritmy identifikatsii elektronnykh ustroystv*” [“Nonlinear near-field radar. New algorithms for identification of electronic devices”], journal *Spetsial'naya tekhnika, OAO "Elektrozavod"* [Special equipment, JSC “Elektrozavod”, vol. 6, pp. 42–48.

2. Musabekov P. M. and Panychev S. N. (2000), “*Nelineynaya radiolo-katsiya: metody, tehnika i oblasti primeneniya*” [“Nonlinear radar: methods, techniques and applications”], journal *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspehi sovremennoy radioelektroniki* [Foreign Radio Electronics. Successes of Modern Radio Electronics], vol. 5, pp. 54–61.

3. Handbook / ed. Ya. D. Shirman (2007), *Radioelektronnyye sistemy: osnovy postroyeniya i teoriya* [Radio-electronic systems: fundamentals of construction and theory], Press Radiotekhnika, Moscow, 512 p.

4. Zinchenko M. V., Wo Zui Fook and Zinkovsky Yu. F. (2017), “*Testirovanie nelineynykh radiolokatorov na nadezhnost identifikatsii*” [“Nonlinear radar testing for identification reliability”], bulletin *Vestnik NTUU "KPI", Seriya: Radiotekhnika. Radioapparatostroenie*. [Bulletin of NTUU “KPI”. Series: Radio engineering], vol. 68, pp. 48–53.

5. Zinchenko M. V., Wo Zui Fook and Zinkovsky Yu. F. (2017), “*Issledovanie spektralnykh harakteristik rasseivayuschih MOM-struktur v nelineynoy lo-*

katsii” [“Investigation of the spectral characteristics of scattering MOM structures in a nonlinear location”], bulletin *Vestnik NTUU “KPI”, Seriya: Radio-tehnika. Radioapparatostroenie* [Bulletin of NTUU “KPI”, Series: Radio engineering], vol. 70, pp. 11–16.

6. Vernigorov N. S. and Kuznetsov T. V. (2002), “*K voprosu o printsipe sravneniya v nelineynoy radiolokatsii*” [To the question of the principle of comparison in nonlinear radiolocation], journal *INFORMOST Radio Electronics and Telecommunications*, vol. 3 (21), pp. 8–14.

7. Belchikov A. V., Mishustin B. A., Dzisyak A. B. and Zaitsev V. K. (2011), “*Vzglyad razrabotchikov nelineynykh lokatorov serii “Lornet” na nekotorye aktualnyye voprosy nelineynoy lokatsii*” [“A look at the developers of nonlinear locators of the Lornet series on some relevant issues of nonlinear location”], journal *Tehnika. Arsenal. Spetsialnaya tehnika* [Technics. Arsenal. Special equipment], vol. 5, pp. 14–20.

8. Shcherbakov G. N. (2004), *Obnaruzhenie skrytykh ob’ektov dlya gumanitarnogo razminirovaniya, kriminalistiki, arheologii, stroitelstva i borby s terrorizmom* [Detection of hidden objects for humanitarian mine clearance, forensics, archeology, construction and the fight against terrorism], Press Arbat-Inform, Moscow, 144 p.

9. Tarasenko Yu. S. (2011), *Fizychni osnovy radiolokatsii* [The physical foundations of the radiolocation], Press *Porohy*, Dnipro, 487 p.

10. L’vova L. A. (2003), *Radiolokatsionnaya zametnost’ letatel’nykh apparatov* [Radar visibility of aircraft], Press RFYATS-VNIITF, Snezhinsk, 232 p.

11. Vernigorov N. S. (1997), “*Protsess nelineynogo preobrazovaniya i rasseyaniya elektromagnitnogo polya elektricheskimi nelineynymi*” [“The process of nonlinear conversion and scattering of an electromagnetic field is electrically nonlinear objects”], Collection of scientific works Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS, vol. 42, pp. 11–13.

12. Shifrin Ya. S. (1997), “*Nelineynyye efekty v antennah*” [“Nonlinear effects of antennas”], journal *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspehi sovremennoy radioelektroniki* [Foreign electronics. Successes of modern radio electronics], vol. 4, pp. 33–44.