

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОММУНІКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 638.235.231

Зінченко М. В.¹, Зінковський Ю. Ф.²

¹Канд. техн. наук, доцент кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

²Д-р техн. наук, професор, професор кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

ШИРОКОСМУГОВІ РОЗСІЮВАЧІ В ЗАДАЧАХ НЕЛІНІЙНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ

Вирішено завдання впровадження єдиного імітатора нелінійного розсіювача для визначення показників призначення нелінійних радіолокаторів. Показано, що для об'єктивного порівняння нелінійних радіолокаторів за показниками призначення у реальних умовах необхідно враховувати вплив на розсіюваний нелінійним об'єктом сигнал випромінювань вузькосмугових сторонніх джерел та відгуків структур «метал-окисел-метал». Штатні імітатори розсіювачів, що входять до комплексу нелінійних радіолокаторів, не можна використовувати у якості еталонних, оскільки вони є резонансними. Запропоновано використовувати імітатор нелінійного розсіювача на базі двозаходової плоскої спіральної антени з узгодженим нелінійним навантаженням, оскільки за рахунок широкосмуговості та еліптичної поляризації матимемо ефективне поглинання енергії зонduючого сигналу з подальшим перевипромінюванням вагомим за рівнем нелінійних продуктів у порівнянні з випромінюваннями вузькосмугових сторонніх джерел та спектральних складових відгуків структур «метал-окисел-метал». Проведені у «польових» умовах експериментальні дослідження підтвердили вказані переваги запропонованого імітатора над штатними калібрувальними розсіювачами. Вимірювання для нелінійних радіолокаторів максимальної відстані виявлення вибірки імітаторів на базі двозаходової плоскої спіральної антени з узгодженим нелінійним навантаженням показали високу відтворюваність параметрів розсіювачів, що дозволяє використовувати їх у якості еталонів.

Ключові слова: ближня радіолокація, нелінійний радіолокатор, зонduючий сигнал, імітатор нелінійного розсіювача, двозаходова плоска спіральна антена.

НОМЕНКЛАТУРА

НР – нелінійний радіолокатор;

НРс – нелінійний розсіювач;

МОМ – «метал-окисел-метал»;

ЗС – зонduючий сигнал;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НВЧ – надвисокі частоти;

ДС – діаграма спрямованості;

КСД – коефіцієнт спрямованої дії;

ПСА – плоска спіральна антена;

A – векторний потенціал поляризаційної структури поля випромінювання ПСА;

J – вектор комплексної амплітуди об'ємної щільності струму;

$G(R)$ – функція Гріна для вільного простору;

R – відстань спостереження;

V – об'єм випромінюючої системи

k – хвильове число;

μ_0 – абсолютна магнітна проникність середовища;

AR – рівень послаблення зонduючого сигналу в дБ;

BR – чутливість приймачів другої і третьої гармонік в дБ.

ВСТУП

Нелінійна радіолокація використовується у багатьох сферах людської діяльності: технічний захист інформації, технології військового призначення, неруйнівний контроль якості виробів тощо. Нелінійні радіолокатори (НР) призначені для виявлення «закладних» радіоелектронних пристроїв, складовими елементної бази котрих є напівпровідникові прилади. Функціонування НР безпосередньо пов'язане з ефектом перевипромінювання нелінійними розсіювачами (НРс) – антенними структурами з нелінійним навантаженням, у простір під час зондування нових спектральних складових, не характерних для спектру опромінюючого сигналу (кратні гармоніки чи комбінаційні частоти). За результатом аналізу характеристик прийнятих нелінійних продуктів сигналу відгуку опе-

ратор робить висновок щодо знаходження та ідентифікацію у досліджуваному середовищі НРс [1–3].

Як правило, у реальних умовах використання нелінійних радіолокаторів на корисний сигнал відгуку від шуканого НРс накладаються спектральні складові з тими ж частотами від випромінювань вузькосмугових сторонніх джерел та відгуків структур «метал-окисел-метал» (МОМ-структур).

Вплив зовнішніх завад на НРс може призводити до появи мультиплікативних складових в розсіяному сигналі, що може створити фіктивні сигнали відгуку навіть при відсутності ЗС НР. Частота завадового сигналу може виявитися близькою до частоти корисного розсіяного сигналу та потрапити у смугу приймача. Боротьба з зовнішніми завадами вирішується, як правило, обранням частоти ЗС, забезпеченням можливості її зміни та відповідними схмотехнічними та конструкторськими рішеннями [4–5].

Причина виникнення «хвибних» відгуків від МОМ-структур пов'язана з тим, що слабкі металеві контакти, як правило, є квазінелійними елементами з симетричною вольт-амперною характеристикою. При цьому контактні нелінійності є джерелом нелінійних продуктів, в основному, непарного порядку, а присутні гармоніки парного порядку за рівнем менші на 20 дБ і більше. Селекція шуканих НРс від МОМ-структур здійснюється: за відношенням рівнів прийнятих перевипромінювань другої та третьої гармонік частоти ЗС НР; за характером зміни амплітуди сигналу на виході приймача поблизу перевипромінюючого об'єкта; за реакцією об'єкта на вібродію [6–7].

Таким чином, ефективність використання нелінійних радіолокаторів безпосередньо пов'язана з мінімізацією впливу випромінювань вузькосмугових сторонніх джерел та відгуків структур «метал-окисел-метал».

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сертифікація нелінійних радіолокаторів передбачає випробовування за багатьма показниками їх якості, вагомим серед яких є максимальна відстань виявлення об'єкта пошуку. Об'єктивність порівняння зразків нелінійних радіолокаторів за цим показником вимагає впровадження єдиного імітатора НРс [8–10]. Штатний калібрувальний розсіювач, відносно якого виконується налаштування в «польових» умовах конкретного НР, у більшості випадків є резонансним та налаштованим на частоту ЗС НР. Таким чином, він ефективно поглинає енергію зондуючого сигналу певного НР і перевипромінює достатньо вагомий за рівнем нелінійні продукти у порівнянні з випромінюваннями вузькосмугових сторонніх джерел та спектральних складових відгуків МОМ-структур. Оскільки робоча частота ЗС для різних типів НР лежить у широкому діапазоні (600...1000) МГц, то штатні резонансні імітатори НРс по різному поглинатимуть опромінюючий сигнал однакової підведеної потужності від нелінійних радіолокаторів. Таким чином, для об'єктивного порівняння єдиний імітатор НРс повинен задовольняти наступним вимогам: бути широкосмуговим; мати кругову або еліптичну поляризацію; конструктивно здатним до високої відтворюваності параметрів; забезпечувати спря-

мовану передачу потужності; володіти високим коефіцієнтом корисної дії (ККД); забезпечувати заданий рівень узгодження з нелінійним навантаженням.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В Україні та Росії за напрямком нелінійної радіолокації працювали групи дослідників під керівництвом Штейншлейгера В. Б., Вернигорова Н. С., Парватова Г. Н., Петрова Б. М., Горбачева О. О., Шифріна Я. С. та інших.

Провідними американськими дослідниками у нелінійній радіолокації стали Thomas H. Jones, Bruce R. Barsumian, Robert A. Rubega та інші. В Англії – відповідно James H. Stephen, John D. McCann, Steven John Holmes, Andrew Barry Stephen та інші.

Потужність неперервного ЗС НР в більшості випадків становить 10...850 мВт. В імпульсному режимі випромінювання пікова потужність в імпульсі 5...400 Вт. Деякі сучасні НР мають можливість зміни потужності ЗС. Чутливість приймачів сучасних НР лежить у межах від 10^{-15} до 10^{-11} Вт. В імпульсних вона трохи гірша, що пояснюється відповідною перевагою рівня пікової потужності імпульсних передавачів (приблизно на 35–40 дБ). У більшості НР використовуються приймачі з регульованою чутливістю. Діапазон регулювання цього параметра становить 30...50 дБ [6, 11].

Дальність дії більшості НР обмежена величиною близько 1 м. Обмеження відповідає варіанту роботи на відкритих площах або у великих необладнаних приміщеннях. Для офісних приміщень можливості виявлення ще скромніші, що пов'язано з високою концентрацією різних завад [6, 11, 12]. З поняттям максимальної дальності дії тісно пов'язана максимальна глибина виявлення об'єктів у досліджуваному середовищі. Для будівельних конструкцій вона може досягати лише декількох десятків сантиметрів.

Згідно з [6, 11] дальність виявлення НРс при імпульсному режимі набагато більша в порівнянні з неперервним випромінюванням ЗС НР.

Дальність дії нелінійних радіолокаторів може варіюватися не тільки їх енергетичним потенціалом і коефіцієнтом шуму прийомного пристрою, але і паразитними або побічними нелійними ефектами [6]:

- паразитні бічні пелюстки діаграми спрямованості (ДС) випромінюючої антени НР провокують появу побічних гармонік від навколишніх радіоелектронних засобів;
- наявність у ЗС НР паразитних гармонічних складових, які, відбиваючись від поверхні, попадають у прийомний тракт НР;
- виникнення в досліджуваному об'єкті за певних умов ефектів, які якісно впливають на зміну властивостей його демаскуючих ознак.

Широкий спектр практичного використання ефекту нелінійного розсіювання в багатьох сферах людської діяльності сприяв появі численних фундаментальних досліджень за тематикою нелінійної радіолокації. Більшість проведених робіт присвячені задачі підвищення ефективності виявлення, ідентифікації та локалізації нелінійних розсіювачів на фоні різних завад. Сучасні нелінійні радіолокатори для пошуку, ідентифікації та локалізації нелінійних розсіювачів використовують первинні демаскуючі ознаки нелінійних розсіювачів, тобто всі можливі спостере-

жувані за допомогою відповідної апаратури явища та процеси в досліджуваному середовищі, які породжуються або зазнають певних змін за рахунок наявних нелінійностей характеристик напівпровідникових структур НРС.

Як правило, підвищення ефективності нелінійних радіолокаторів у теперішній час зводиться до збільшення потужності випромінюваного НВЧ-сигналу НР, підвищення чутливості приймачів, вибору оптимальних параметрів ЗС тощо. Все це вимагає вирішення досить складних схематичних та конструкторських задач електромагнітної сумісності, забезпечення високої точності вихідних параметрів, заводостійкості тощо. При цьому вираш в більшості випадків незначний та не відповідає витратам [13].

Паспортні дані більшості представлених на ринку нелінійних радіолокаторів на показники ефективності використання (дальність дії, роздільна здатність, вибірковість тощо) важко співставити нормативам документа технічного захисту інформації НД ТЗІ 1.4.-002-08 «Радіолокатори нелінійні. Класифікація. Рекомендовані методи та засоби випробувань». При цьому випробування за нормативним документом необхідно здійснювати у лабораторних умовах. Запропонований в документі імітатор необхідно підлаштовувати під кожний НР, що теж додає незручностей та вносить вагому похибку.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Перспективними в якості антенних структур імітатора НРС є спіральні антени, оскільки вони є широкосмуговими та мають еліптичну поляризацію [14].

Плоскі спіральні антени (ПСА) виконуються зі спіралей двох видів: рівнокутних логарифмічних і арифметичних (архімедових). Гілки спіралей можуть бути або провідниками, розташованими на діелектричній основі, або виконуватися у вигляді щілин в провідній площині. Зазвичай плоскі спіралі мають дві гілки і залежно від фазових співвідношень в точці збудження можуть працювати в двох режимах: осьовому (направленому) і ненаправленому випромінюванні. Якщо дві гілки спіралі збуджуються в протифазі, то виникає режим осьового випромінювання, при якому головна пелюстка діаграми спрямованості розташована уздовж осі спіралі. Режим ненаправленого випромінювання, при якому поле максимальне в площині спіралі, має місце при синфазному збудженні її гілок.

Аналіз роботи плоскої антени, виконаної з архімедової спіралі, базується на твердженні, що її випромінювання визначається в основному тим витком, де струми в суміжних елементах спіралі майже синфазні. За межами основного випромінюючого витка існують додаткові витки, параметри яких кратні параметрам основного. Однак експериментальні дані показують, що ці смужки випромінюють лише малу частину енергії. При зміні довжини хвилі основний випромінюючий виток автоматично переміщується уздовж радіуса спіралі, зберігаючи постійність своєї електричної довжини.

Спіральні антени з коефіцієнтом перекриття по частоті від 1,5 до 10 дозволяють формувати односпрямовані ДС шириною ($90^\circ \dots 180^\circ$) з коефіцієнтом спрямованої дії (КСД) (2...8).

Для ПСА вхідний опір і розподіл струму на провідниках розраховується із застосуванням методу узагальнених наведених ЕРС. Для аналізу поляризаційної структури поля випромінювання ПСА використовується метод векторного потенціалу [14]:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V JG(R) dV,$$

де A – векторний потенціал у довільній точці спостереження, який визначається на підставі відомого (попередньо обчисленого) розподілу збуджуючого струму; J – вектор комплексної амплітуди об'ємної щільності стороннього електричного струму; $G(R) = \exp(-jkR)/R$ – функція Гріна для вільного простору; R – відстань між точками спостереження та інтегрування; V – об'єм, заповнений струмами випромінюючої системи; k – хвильове число; μ_0 – абсолютна магнітна проникність середовища.

Для поляризаційних досліджень двозаходової ПСА широко використовуються два методи, які визначені видом розкладання електромагнітної хвилі: на дві хвилі з ортогональними лінійними поляризаціями і на дві хвилі з круговими поляризаціями протилежного напрямку обертання [14].

Розглянемо в якості антенної структури імітатора НРС двозаходову ПСА з нелінійним навантаженням. Для проведення розрахунків обрано діапазон частот (0,8...3) ГГц. Двозаходова ПСА з максимальним радіусом 26 мм, виконана з фольгованого текстоліту і навантажена на діод типу КД-522А в точках А і В (рис. 1).

Геометричні параметри випромінюючої структури: кількість входів – 2; початковий радіус (22...26) мм; кількість витків 2...3. У смузі частот (0,8...3) ГГц діаграма спрямованості зазнає змін (рис. 2, 3). Коефіцієнт спрямованої дії на частоті 1 ГГц становить (6,5...2,5) за шириною головної пелюстки ДС ($90^\circ \dots 120^\circ$).

КСД на частоті 2 ГГц становить (2,0...0,5) дБ за шириною головної пелюстки ДС ($120^\circ \dots 160^\circ$). На частотах понад 2 ГГц спостерігається зниження КСД, обумовлене розширенням головної пелюстки ДС і зростанням ширини випромінювання.

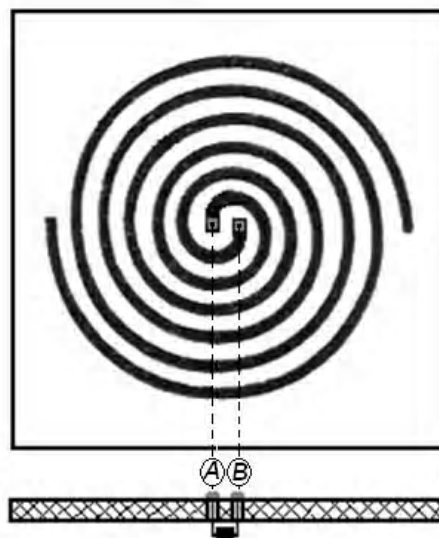


Рисунок 1 – Імітатор НРС на базі плоскої двозаходової спіральної антени

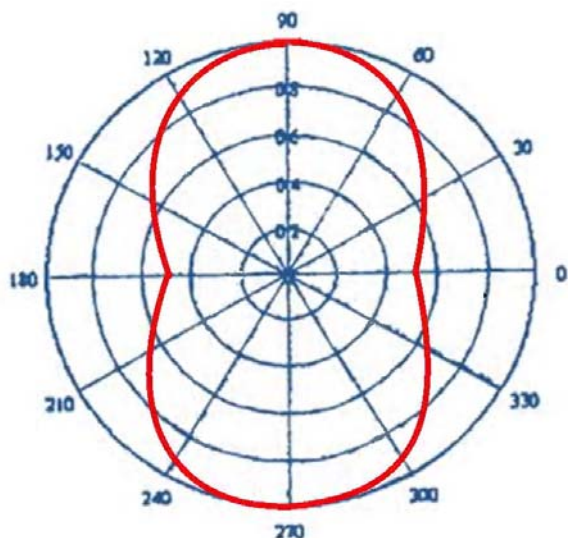


Рисунок 2 – ДС ПСА, розрахована в наближенні заданого струму в Matchcad 13 для частоти 1 ГГц

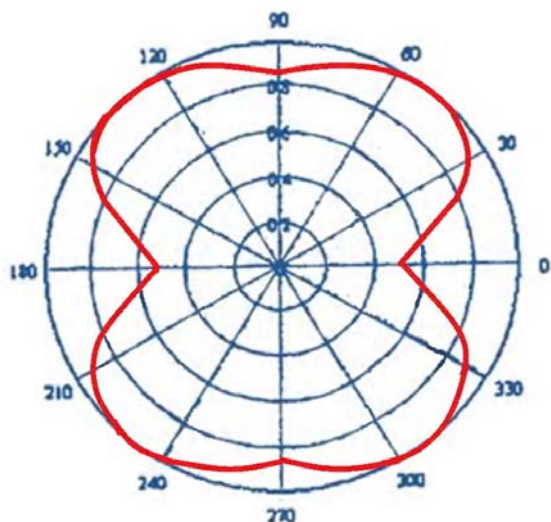


Рисунок 3 – ДС ПСА, розрахована в наближенні заданого струму в Matchcad 13 для частоти 2 ГГц

4 ЕКСПЕРИМЕНТ

Для підтвердження ефективності розробленого імітатора були проведені експериментальні дослідження у реальних умовах трьох зразків розсіювачів (одного на базі ПСА та двох на базі симетричного вібратора) нелінійним радіолокатором «NR-μ», антени якого мають кругову поляризацію (кругова поляризація антен є характерною для більшості НР, оскільки її застосування суттєво покращує спроможність виявлення радіоелектронних об'єктів), максимальна потужність сигналу зондування в імпульсі становить 250 Вт на частоті 848 МГц, а чутливість приймачів не перевищує – 140 дБ/Вт. Дослідження проводилися за схемою, представленою на рис. 4. Зазначимо, що в експерименті резонансні імітатори НРС на базі симетричного вібратора мали різну довжину пліч (на рис. 4 а довжина пліч штатного імітатора НРС співрозмірна з довжиною хвилі ЗС НР, а на рис. 4 б – на порядок менша).

Виміри проводилися для рівнів другої та третьої гармонік сигналу відгуку у шістьох точках згідно рис. 4. При-

чому основна площина досліджуваних зразків була розміщена перпендикулярно до осі, на якій лежать точки спостереження 1, 2 та 3.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати дослідження співрозмірного з довжиною хвилі ЗС НР симетричного вібратора з узгодженим у навантаженні діодом КД522А (рис. 4а) у вигляді гістограм співвідношень рівнів другої та третьої гармонік сигналу відгуку в дБ, приведені на рис. 5, 6, де AR – рівень послаблення зондуючого сигналу в дБ, BR – чутливість приймачів другої і третьої гармонік в дБ (ці позначення використані і на рис. 7–10).

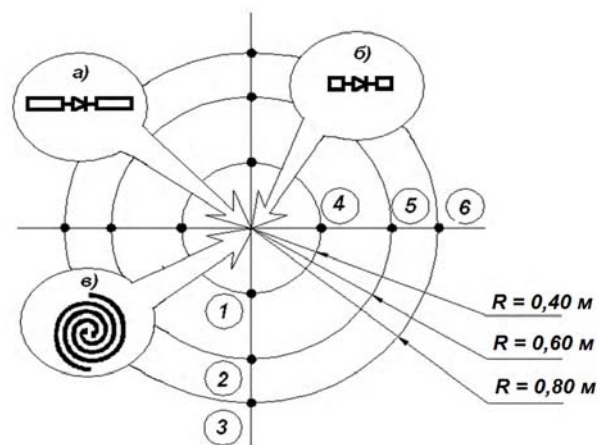


Рисунок 4 – Схема дослідження ефективності ідентифікації НРС

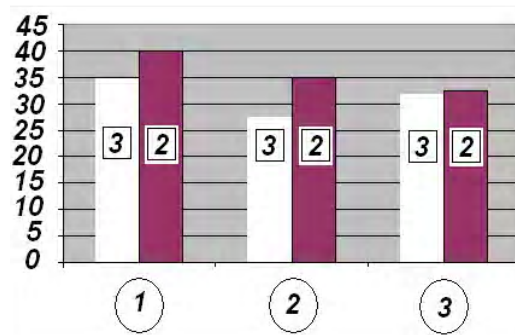


Рисунок 5 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 1, 2 і 3, згідно з рис. 4 при $AR=0$ дБ, $BR=0$ дБ

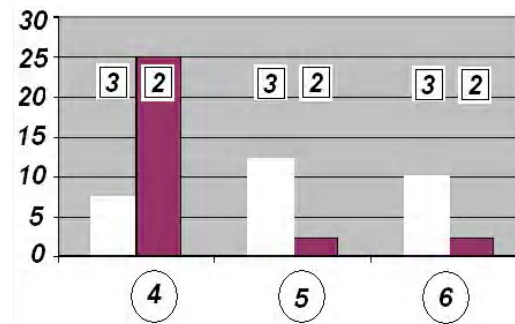


Рисунок 6 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 4, 5 і 6, згідно з рис. 4 при $AR=-5$ дБ, $BR=0$ дБ

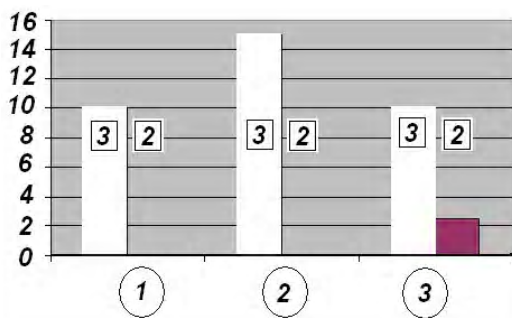


Рисунок 7 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 1, 2 і 3, згідно з рис. 4 при $AR = -5$ дБ, $BR = 0$ дБ

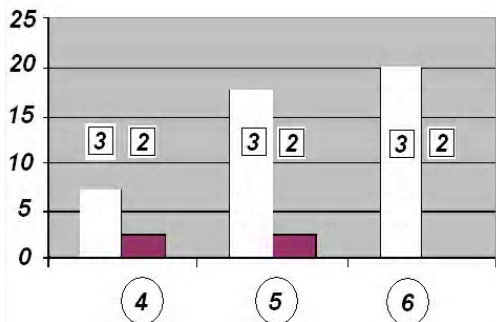


Рисунок 8 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 4, 5 і 6, згідно з рис. 4 при $AR = -5$ дБ, $BR = 0$ дБ

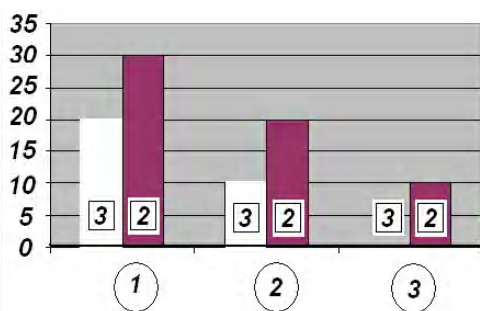


Рисунок 9 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 1, 2 і 3, згідно з рис. 4 при $AR = -10$ дБ, $BR = -30$ дБ

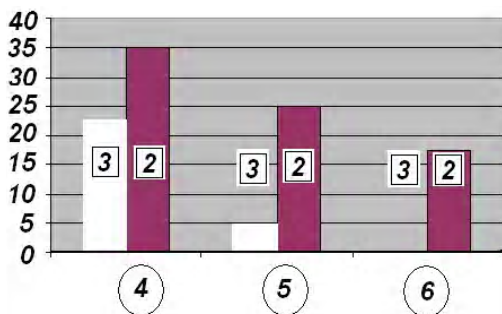


Рисунок 10 – Рівні гармонік, дБ, виміряних в точках 4, 5 і 6, згідно з рис. 4 при $AR = -10$ дБ, $BR = -20$ дБ

На рис. 7, 8 представлені дослідження для штатного НРС з «електрично малою» антеною з узгодженим у навантаженні діодом КД522А (рис. 4 б).

На рис. 9, 10 приведені результати дослідження двозаходової ПСА з узгодженим у навантаженні діодом КД522А (рис. 4 в).

У табл. 1, для п'яти різних типів серійних НРС: y_1 – «ОНЕГА 3»; y_2 – «NR 900М»; y_3 – «NR 900Е»; y_4 – «РОДНИК 23»; y_5 – «ЦИКЛОН М1А», приведені результати дослідження максимальної відстані виявлення зразків імітатора НРС на базі двозаходової ПСА з узгодженим у навантаженні діодом КД522А (виміри здійснювались перпендикулярно основній площині досліджуваних зразків).

6 ОБГОВОРЕННЯ

З рис. 9–10 видно, що імітатор на базі двозаходової ПСА з узгодженим нелінійним навантаженням за рахунок широкосмуговості та еліптичної поляризації перевипромінює досить вагомий рівень нелінійних продуктів сигналу відгуку у порівнянні з резонансними калібрувальними розсіювачами. Це дає можливість у реальних умовах чітко його ідентифікувати апаратурою нелінійної радіолокації на досить великих відстанях при будь-якій його просторовій орієнтації відносно дії ЗС, оскільки маємо ефективне поглинання енергії зондуючого сигналу з подальшим перевипромінюванням вагомим за рівнем нелінійних продуктів, що значимо переважають наявні випромінювання вузькосмугових сторонніх джерел та спектральних складових відгуків структур «метал-окисел-метал» [15, 16].

Значний вплив оточуючого середовища підтверджує хибна ідентифікація штатного резонансного НРС з «електрично малою» антеною з узгодженим нелінійним навантаженням як МОМ-структури, оскільки рівень третьої гармоніки суттєво перевищував рівень другої (див рис. 7, 8).

Чітка ідентифікація співрозмірного з довжиною хвилі ЗС НРС симетричного вібратора з узгодженим навантаженням на великих для нелінійної радіолокації відстанях можлива лише за умови перпендикулярної орієнтації основної площини досліджуваного зразка дії ЗС НРС (рис. 5). У випадку опромінення «збоку» зі збільшення відстані значимим стає вплив оточуючого середовища, тому резонансний імітатор НРС ідентифікується за співвідношенням рівнів другої та третьої гармонік як МОМ-структура (рис. 6).

Дослідження максимальної відстані виявлення імітаторів НРС на базі двозаходової ПСА з узгодженим нелінійним навантаженням проводилися для восьми зразків з метою перевірки якості відтворення їх параметрів (табл. 1).

На рис. 11 згідно результатів табл. 1 представлена кумулятивна функція розподілу максимальної відстані виявлення розробленого імітатора НРС серійними нелінійними радіолокаторами [17]. З якісного візуального аналізу представленої кумулятивної функції можна зробити висновок, що закон розподілу з високою довірчою вірогідністю є нормальним.

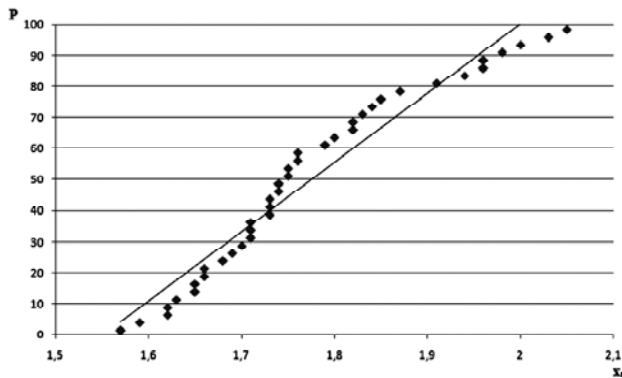
Перевірка гіпотези щодо виду функції розподілу за критерієм Шапіро-Уїлка згідно ISO 5479-97 теж підтвердила, що розподіл у вибірці є нормальним, не відхиляється при рівні значимості $\alpha = 0,05$.

Нормальний закон розподілу та мінімальні розходження середніх значень максимальної відстані виявлення по зразкам широкосмугових імітаторів НРС (відповідність критеріям Фішера за довірчої ймовірності 99,8% [17]) свідчить про високу якість відтворення параметрів імітаторів НРС на базі двозаходової ПСА з узгодженим нелінійним навантаженням, а тому їх можна вважати за еталонні.

За середніми значеннями максимальної відстані виявлення еталонних зразків нелінійними радіолокаторами можна здійснити впорядкування типів НРС за ефективністю використання. Так, кращим є «ЦИКЛОН М1А», а гіршим «ОНЕГА 3». Причому відносно середнього значення по всій вибірці значень максимальної відстані

Таблиця 1 – Дослідження максимальної відстані виявлення зразків імітатора НРС

Досліджувані пристрій, на базі ПСА	Максимальна відстань виявлення об'єкта за видами НР, м					Середні значення по імітаторам НРС
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
Зразок №1	1,73	1,80	1,76	1,62	2,00	1,78
Зразок №2	1,68	1,76	1,83	1,59	2,05	1,78
Зразок №3	1,62	1,82	1,85	1,66	1,98	1,79
Зразок №4	1,65	1,73	1,74	1,71	1,96	1,76
Зразок №5	1,66	1,82	1,71	1,70	1,94	1,77
Зразок №6	1,71	1,75	1,73	1,57	2,03	1,76
Зразок №7	1,74	1,87	1,84	1,63	1,91	1,80
Зразок №8	1,69	1,79	1,75	1,65	1,96	1,77
Середні значення по НР	1,69	1,79	1,78	1,64	1,98	

Рисунок 11 – Кумулятивна функція P розподілу максимальної відстані виявлення імітатора НРС на базі двозаходової ПСА серійними нелінійними радіолокаторами

виявлення еталонів (1,77 м), показник якості для «ЦИКЛОН М1А» на 11% кращий, а для «ОНЕГА 3» відповідно на 14% гірший.

ВИСНОВКИ

Сертифікація нелінійних радіолокаторів вимагає впровадження єдиного імітатора нелінійного розсіювача (НРс). Штатні калібрувальні розсіювачі, відносно яких виконується налаштування в «польових» умовах нелінійних радіолокаторів (НР), у більшості випадків є резонансними та налаштовані на конкретну частоту зондуючого сигналу (ЗС). Тому їх не можна обрати для об'єктивного порівняння приладів через широкий діапазон частот зондування (600...1000) МГц існуючих видів НР. Адже необхідно забезпечити ефективне поглинання енергії ЗС НР і перевипромінювання достатньо вагомим за рівнем нелінійних продуктів у порівнянні з випромінюваннями вузькосмугових сторонніх джерел та спектральних складових відгуків структур «метал-окисел-метал». Для об'єктивного порівняння в якості єдиного імітатора НРС доцільно використати двозаходову плоску спіральну антену (ПСА) з узгодженим нелінійним навантаженням, оскільки він задовольняє пред'явленим вимогам: широкосмуговий; має еліптичну поляризацію; конструктивно здатний до високої відтворюваності параметрів; забезпечує спрямовану передачу потужності; володіє високим коефіцієнтом корисної дії; забезпечує заданий рівень узгодження з нелінійним елементом. Експериментальні дослідження показали, що запропонований імітатор за рахунок широкосмуговості та еліптичної поляризації перевипромінює досить вагомий рівень нелінійних продуктів сигналу відгуку у порівнянні з резонансними калібрувальними розсіювачами. Що дає можливість у польових умовах чітко його ідентифікувати апаратурою нелінійної радіолокації на досить великих відстанях при будь-якій просторовій орієнтації відносно дії ЗС. Дослідження максимальної відстані виявлення різними НР зразків широкосмугового імітатора НРС підтвердили прогнозовані

мінімальні розходження результатів, що свідчить про високу якість відтворення параметрів розсіювачів, а отже, можливість їх використання в якості еталонних. Це забезпечує отримання значень показників ефективності використання НР, які легко співставляються з нормативами документа технічного захисту інформації НД ТЗІ 1.4.–002–08 «Радіолокатори нелінійні. Класифікація. Рекомендовані методи та засоби випробувань».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Вернигоров Н. С. Нелинейный локатор – эффективное средство обеспечения безопасности в области утечки информации / Н. С. Вернигоров // Конфидент. – 1996. – № 1. – С. 67.
- Вернигоров Н. С. Практические применения нелинейного радиолокатора / Н. С. Вернигоров // Безопасность от А до Я. – 1998. – № 2–3. – С. 14–15.
- Вернигоров Н. С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами / Н. С. Вернигоров // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42, № 10. – С. 1181–1185.
- Беляев В. В. Состояние и перспективы развития нелинейной радиолокации / В. В. Беляев, А. Т. Маюнов, С. Н. Разиньков // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 6. – С. 59–78.
- Помехи в системах нелинейного зондирования / [А. А. Горбачев, С. В. Лавцов, С. П. Тараканков, Е. П. Чигин] // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 1. – С. 71–76.
- Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации / В. А. Хорошко, А. А. Чекатков. – К.: «Юниор», 2003. – 504 с.
- Распознавание нелинейных рассеивателей, содержащих несовершенные металлические контакты или полупроводниковые радиокомпоненты / [А. П. Колбанов, А. А. Потапов, Е. Е. Степанов, Е. П. Чигин] // Нелинейный мир. – 2005. – Т. 3, № 4. – С. 239–244.
- Калабухов В. А. Нелинейная радиолокация: принципы сравнения / В. А. Калабухов, Д. В. Ткачев // Специальная техника. – 2001. – № 2. – С. 28.
- Вернигоров Н. С. К вопросу о принципе сравнения в нелинейной радиолокации / Н. С. Вернигоров, Т. В. Кузнецов // ИНФОРМОСТ Радиоэлектроника и Телекоммуникации. – 2002. – № 3(21). – С. 7–14.
- Авдеев В. Б. Методический аппарат для оценки эффективности средств нелинейной радиолокации и противорадиолокации / В. Б. Авдеев, С. Н. Паньчев, Д. В. Сенькевич // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2007. – Т. 3, № 4. – С. 115–119.
- Зыонг Дык Тхиен. Исследование возможностей и методов построения аппаратуры для нелинейной радиолокации: дис. ... к.т.н. : 05.12.04 / Зыонг Дык Тхиен. – М., 2007. – 153 с.
- Захаров А. В. Методика работы с различными моделями нелинейных локаторов / А. В. Захаров // Конфидент. Защита информации. – 2001. – № 4. – С. 43–47.
- Вернигоров Н. С. Влияние антенно-фидерного тракта нелинейного объекта на дальность обнаружения в нелинейной локации / Н. С. Вернигоров, В. Б. Харин // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42, № 12. – С. 1267.
- Юрцев О. А. Спиральные антенны / О. А. Юрцев, А. В. Рунов, А. Н. Казарин. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.

15. Козлов А. И Эффективная площадь рассеяния нелинейных отражателей / А. И. Козлов, Д. В. Колядов // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2004. – № 79. – С. 36–40.
16. Зинченко М. В. Рассеивание плоских волн системой симметричных вибраторов с нелинейными нагрузками при воздействии нелинейного радиолокатора / М. В. Зинченко, Ю. Ф. Зиньковский // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ». – 2010. – Том 53, № 10. – С. 24–34.

17. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С. Г. Радченко. – К. : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2015.
Після доробки 02.12.2015.

Зинченко М. В.¹, Зиньковский Ю. Ф.²

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры радиоконструирования и производства радиоаппаратуры Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиоконструирования и производства радиоаппаратуры Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ РАССЕИВАТЕЛИ В ЗАДАЧАХ НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Решена задача внедрения единого имитатора нелинейного рассеивателя для определения показателей назначения нелинейных радиолокаторов. Показано, что для объективного сравнения нелинейных радиолокаторов по показателям назначения в реальных условиях необходимо учитывать влияние на рассеиваемый нелинейным объектом сигнал излучения узкополосных сторонних источников и откликов структур «металл-окисел-металл». Штатные имитаторы рассеивателей, входящие в комплект нелинейных радиолокаторов, нельзя использовать в качестве эталонных, поскольку они являются резонансными. Предложено использовать имитатор нелинейного рассеивателя на базе двохвостовой плоской спиральной антенны с согласованной нелинейной нагрузкой, поскольку за счет широкополосности и эллиптической поляризации будем иметь эффективное поглощение энергии зондирующего сигнала с последующим переизлучением весомых по уровню нелинейных продуктов по сравнению с излучениями узкополосных сторонних источников и спектральных составляющих откликов структур «металл-окисел-металл». Проведенные в «полевых» условиях экспериментальные исследования подтвердили указанные преимущества предложенного имитатора над штатными калибровочными рассеивателями. Измерения для нелинейных радиолокаторов максимального расстояния обнаружения выборки имитаторов на базе двохвостовой плоской спиральной антенны с согласованной нелинейной нагрузкой показали высокую воспроизводимость параметров рассеивателей, что позволяет использовать их в качестве эталонов.

Ключевые слова: ближняя радиолокация, нелинейный радиолокатор, зондирующий сигнал, имитатор нелинейного рассеивателя, двохвостовая плоская спиральная антенна.

Zinchenko M. V.¹, Zinkovskiy Yu. F.²

¹PhD., Department of Radio Design and Electronic Radio Equipment Manufacture of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine

²DrSc., Professor, Department of Radio Design and Electronic Radio Equipment Manufacture of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine

BROADBAND SCATTERERS IN NONLINEAR RADAR

The problem of a single nonlinear scatterer simulator introduction for the detection of appointment parameters of nonlinear radars is solved. It is shown that for an objective comparison of nonlinear radars by appointment parameters in the real world it is necessary to take into account the narrowband off-site sources and response of structures «metal-oxide-metal» radiation effect on the dissipated by nonlinear object signal. The regular simulators of scatterers included in the assembly of nonlinear radar, can not be used as reference because they are resonant. It is proposed to use a simulator of a nonlinear scatterer based on flat double-spiral antenna with non-linear matched load, as by broadband and elliptical polarization be effective absorption of the energy of the probing signal with subsequent re-emission weighty in terms of non-linear products as compared with the radiation of a narrowband off-site sources and spectral components of the response of structures «metal-oxide-metal». Carried out in the «field» conditions, experimental studies have confirmed these benefits over the regular imitator of the proposed calibration scatterers. The measurement for nonlinear radar maximum distance detection of simulators sampling based on flat double-spiral antenna with matched nonlinear load shown a high reproducibility of parameters of scatterers, so one can use them as references.

Keywords: short-range radar, nonlinear radar, probing signal, the nonlinear scatterer simulator, flat double-spiral antenna.

REFERENCES

1. Vernigorov N. S. Nelineyniy lokator – effektivnoe sredstvo obespecheniya bezopasnosti v oblasti utechki informatsii, *Konfident*, 1996, No. 1, pp. 67.
2. Vernigorov N. S. Prakticheskie primeneniia nelineynogo radiolokatora, *Bezopasnost ot A do Ya.*, 1998, No. 2–3, pp. 14–15.
3. Vernigorov N. S. Protseess nelineynogo preobrazovaniia i rasseianiia elektromagnitnogo polia elektricheski nelineynymi obektami, *Radiotekhnika i elektronika*, 1997, Vol. 42, No. 10, pp. 1181–1185.
4. Beliaev V. V., Maiunov A. T., Razinkov S. N. Sostoianie i perspektivy razvitiia nelineynoi radiolokatsii, *Zarubezhnaia radioelektronika. Uspehi sovremennoi radioelektroniki*, 2002, No. 6, pp. 59–78.
5. Gorbachev A. A., Lavtsov S. V., Tarakankov S. P., Chigin E. P. Pomehi v sistemah nelineynogo zondirovaniia, *Radiotekhnika i elektronika*, 1998, Vol. 43, No. 1, pp. 71–76.
6. Horoshko V. A., Chekatkov A. A. Metody i sredstva zaschity informatsii. Kiev, «Yunior», 2003, 504 p.
7. Kolbanov A. P., Potapov A. A., Stepanov E. E., Chigin E. P. Raspoznavanie nelineynih rasseivatelei, sodержaschih nesovershennye metallicheskie kontakty ili poluprovodnikovye radiokomponenty, *Nelineyniy mir*, 2005, Vol. 3, No. 4, pp. 239–244.
8. Kalabuhov V. A., Tkachev D. V. Nelineynaia radiolokatsiia: printsipy sravneniia, *Spetsialnaia tekhnika*, 2001, No. 2, pp. 28.
9. Vernigorov N. S., Kuznetsov T. V. K voprosu o printsipe sravneniia v nelineynoi radiolokatsii, *INFORMOST Radioelektronika i Telekommunikatsii*, 2002, No. 3(21), pp. 7–14.
10. Avdeev V. B., Panychev S. N., Senkevich D. V. Metodicheskii apparat dlia otsenki effektivnosti sredstv nelineynoi radiolokatsii i protivoradiolokatsii, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, Vol. 3, No. 4, pp. 115–119.
11. Zyong Dyk Thien. Issledovanie vozmozhnostei i metodov postroeniia apparatury dlia nelineynoi radiolokatsii: dis. ... k.t.n. : 05.12.04 / Zyong Dyk Thien. M, 2007, 153 p.
12. Zaharov A. B. Metodika raboty s razlichnymi modeliami nelineynih lokatorov, *Konfident. Zashita informatsii*, 2001, No. 4, pp. 43–47.
13. Vernigorov N. S., Harin V. B. Vliianie antenno-fidernogo trakta nelineynogo obekta na dalnost obnaruzheniia v nelineynoi lokatsii, *Radiotekhnika i elektronika*, 1997, Vol. 42, No. 12, pp. 1267.
14. Yurtsev O. A., Runov A. V., Kazarin A. N. Spiralnye anteny. Moscow, Sov. radio, 1974, 224 p.
15. Kozlov A. I., Kolyadov D. V. Effektivnaia ploschad rasseianiia nelineynih otrazhatelei, *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Radiofizika i radiotekhnika*, 2004, No. 79, pp. 36–40.
16. Zinchenko M. V., Zinkovskii Yu. F. Rasseivanie ploskih voln sistemoi simmetrichnykh vibratorov s nelineynymi nagruzkami pri vozdeystvii nelineynogo radiolokatora, *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika. NTUU «KPI»*, 2010, Vol. 53, No. 10, pp. 24–34.
17. Radchenko S. G. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroeni. Kiev, ZAO «Ukrspetsmontazhproekt», 1998, 274 p.