

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ РОЗСІЮВАЧІВ ДО ЗОНДУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Зінченко М.В., к.т.н., Зінковський Ю.Ф., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут», Київ, Україна,
zil157k@meta.ua*

EVALUATION OF NONLINEAR SCATTERERS SENSITIVITY TO PROBE RADIATION

*Zinchenko M., PhD; Zinkovskiy Y., Doctor of Engineering, Professor
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ

У правоохоронних структурах, військовій справі та сфері технічного захисту інформації добре себе зарекомендували нелінійні радіолокатори (НР), які за нелінійними продуктами (НП) сигналу відгуку (СВ) під час зондування здатні виявити, ідентифікувати і локалізувати шукані об'єкти — нелінійні розсіювачі (НРс). Актуальними залишаються питання дослідження впливу параметрів зондуючого сигналу (ЗС) НР на фізику процесів в НРс [1].

У нелінійній радіолокації типовим об'єктом пошуку є закладний пристрій (ЗП), основні елементи якого — електронні прилади, поєднані між собою друкованими або навісними провідниками. Окремі радіоелементи з нелінійними характеристиками (транзистори, діоди, конденсатори тощо) у поєднанні з провідниками можуть розглядатися як прості (елементарні) НРс. У сукупності ЗП — це складний ансамбль «різноманітних» простих НРс довільної орієнтації у просторі один відносно одного. При зондуванні ЗП НВЧ опроміненням сигналом відгуку є вторинне (розсіяне) електромагнітне поле з додатковими у спектрі НП — кратними гармоніками у випадку моногармонічного ЗС (для бігармонічного ЗС НР, крім кратних гармонік, НП також мають сигнали на комбінаційних частотах). Поява нових спектральних складових у СВ розсіювача пов'язана з нелінійними перетвореннями первинного поля у навантаженнях антенних структур ЗП.

Таким чином, прості НРс як складові ЗП при дії електромагнітних первинних випромінювань є приймальними та передавальними елементами еквівалентної «неструктурованої» нелінійної антенної решітки. Така еквівалентна решітка має свої діаграму спрямованості, вхідний опір, коефіцієнт підсилення та інші параметри, притаманні такому типу антен.

Потужність сигналу, що виділяється у простому НРс під час зондуван-

ня, може бути представлена як [2]:

$$P_c = |\mathbf{\Pi}| S_{\text{эф}} F^2(\theta_0, \phi_0) |\psi| |\zeta_{\Pi}|^2 (1 - |p_{\text{н}}|^2), \quad (1)$$

де $\mathbf{\Pi}$ — вектор Пойтінга поля ЗС НР; $S_{\text{эф}}$ — ефективна площа НРс; $F^2(\theta_0, \phi_0)$ — значення нормованої характеристики спрямованості (ДС) НРс за потужністю у напрямку на джерело випромінювання ЗС; θ_0, ϕ_0 — кути підвищення та азимуту відповідно; ψ — коефіцієнт корисної дії антенної структури НРс; ζ_{Π} — поляризаційний коефіцієнт НРс передачі за потужністю; $p_{\text{н}}$ — коефіцієнт відбиття розсіювачем ЗС.

Розсіяна ЗП потужність енергії при зондуванні залежить від рівня потужності та частоти ЗС НР, кількості простих НРс та їх взаємодії між собою, значення ДС за напрямом, коефіцієнта направленої дії та коефіцієнта корисної дії антенної структури ЗП, втрат через неузгодження між ЗС та ЗП. Всі розглянуті чинники можуть розглядатись як статистично незалежні величини, що дозволяє застосувати нормальний закон статистичного розподілу для аналізу НП СВ [3].

Постановка задачі

Відомо, що процеси поглинання (характеризуються поглиненою потужністю (1)) і перевипромінювання ЗП демаскуючого СВ безпосередньо пов'язані з рівнем потужності ЗС НР. При цьому стає важливою оцінка мінімального рівня щільності потоку потужності ЗС НР, здатного спровокувати генерацію нелінійним розсіювачем НП СВ на заданій відстані між джерелом ЗС та НРс. Така оцінка повинна враховувати внутрішні фізичні процеси в напівпровідникових структурах при впливі електромагнітного НВЧ поля НР.

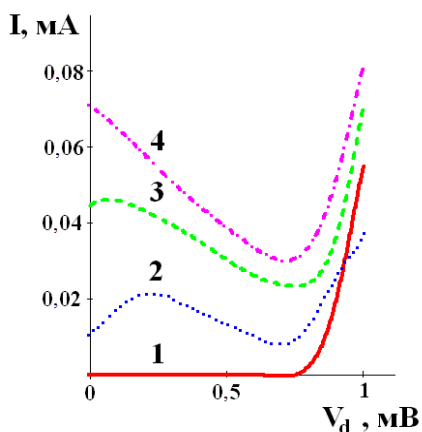


Рис. 1. Спотворення ВАХ діода типу 2А604А

Встановлено, що достатня потужність ЗС НР здатна спричинити спотворення статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових структур НРс [1, 4]. Наприклад, дія НВЧ поля на кремнієвий напівпровідниковий діод (НД) призводить до появи області з від'ємним диференціальним опором на його ВАХ (див. рис. 1), що пов'язане з детекторним ефектом та розігрівом вільних носіїв заряду [1]. На рис. 1 представлено експериментальні ВАХ НД типу 2А604А для різних значень потужності ЗС НР $P_{\text{ЗС}}$ мВт: 1 – 0; 2 – 150; 3 – 350; 4 – 500.

Еквівалентний простий НРс можна розглядати як симетричний вібратор з НД у навантаженні. Моделювання ефектів розсіювання НП СВ передбачає дослідження розподілу вторинного струму по плечах вібратора та впливу на нього ВАХ НД. У [5] запропоновано модель, що передбачає розв'язок отриманого за допомогою методу функцій Гріна інтегрального рівняння (ІР) Галена для щільності вторинного електричного струму в плечах вібратора з відомими у правій частині функціями:

$$\left(\int_{-l}^{-b} + \int_b^l \right) I_{zmn}^B(z') \tilde{K}_{mn}(z, z') dz' = \begin{cases} p_{1mn}(z), & \text{при } -l \leq z \leq -b, \\ p_{2mn}(z), & \text{при } b \leq z \leq l, \\ p_{3mn}(z), & \text{при } -b \leq z \leq b, \end{cases} \quad (2)$$

де l — довжина плеча симетричного вібратора; $2b$ — відстань між плечима симетричного вібратора; z — координата, що співпадає з віссю вібратора; z' — змінна при інтегруванні; $I_{zmn}^B(z')$ — функція розподілу складової вторинного струму з частотою $\omega_{mn} = m\omega + n\Omega$ комбінаційного на гармоніках нелінійного продукту вздовж вісі плеча вібратора (найбільш загальний випадок), $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; ω, Ω є частотами складових бігармонічного ЗС; $\tilde{K}_{mn}(z, z')$ — ядра інтегрального рівняння, що враховують перетворення енергії складової (гармоніки) вторинного струму $I_{zmn}^B(z')$ у енергію випромінювання НП з частотою ω_{mn} ; $p_{1mn}, p_{2mn}, p_{3mn}$ — векторні потенціали НП на сигналах комбінаційних частот при бігармонічному зондуванні для точки спостереження p з координатами (x, y, z) у зоні Фраунгофера.

Розв'язок ІР (2) можна отримати за допомогою методу базисних функцій

$$\sin\left(\frac{\pi(2q-1)(l-|z|)}{2l\mu_{mn}}\right), \quad q = 1, 2, \dots, N_{mn}, \quad (3)$$

які задовольняють граничній умові $I_{mn}^B(\pm l) = 0$. В (3) N_{mn} — число використаних базисних функцій, при яких вихідні розподіли мають практичне значення (число N_{mn} обирається експериментально), $\mu_{mn} = \omega/\omega_{mn}$.

Таким чином, ставиться мета на теоретичному та експериментальному рівнях виконати оцінку мінімального рівня щільності потоку потужності Π_0 ЗС НР, при якому стає можливим виявлення та ідентифікація СВ об'єкта пошуку. За критерій достовірної оцінки оберемо мінімальні рівні НП розсіяного СВ, при яких ймовірність виявлення НРс перевищує 0,5.

Основна частина

Аналітичний розв’язок системи (2) направлений на отримання в явному вигляді залежності вторинного поля вібратора від його електричних розмірів, характеристик навантаження і параметрів опромінюючої хвилі.

Еквівалентна схема простого НРС — симетричного вібратора з НД у навантаженні, представлена на рис. 2: $\varepsilon(t)$ включає складову електрорушійної сили (ЕРС) діючого ЗС НР (\tilde{E}_0) та створені під час нелінійного перетворення у НД ЕРС V_n , кожна з яких відповідає певній n-ій гармоніці; \dot{Z}_n — вхідний опір антенної структури НРС; R_0 — активний опір НД; C_{p-n} — бар’єрна ємність p-n-переходу; C_k — ємність «корпус-діод»; L_s — індуктивність контактів.

Врахування спотворення ВАХ НД можна здійснити шляхом апроксимації експериментальних даних поліномом третього ступеня:

$$i = \frac{1}{R_0} [u + \beta_2 u^2 + \beta_3 u^3],$$

де β_n — коефіцієнти нелінійності. Потужність НП СВ поля задовольняє умові квазігармонічного балансу, тому струми гармонік $i_n(z)$ визначаються без урахування взаємного впливу.

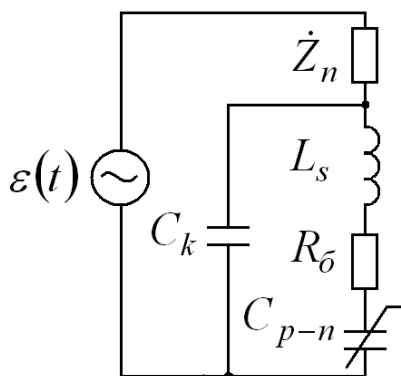


Рис. 2. Еквівалентна схема НРС

Опір антенної структури НРС \dot{Z}_n та ЕРС V_n на n-ій гармоніці в (2) знаходяться з аналізу еквівалентної електричної схеми. При вмиканні навантаження в розрив між плечима вібратора повний вхідний опір НРС $\dot{Z}_{вх}$ не містить додаткової реактивної складової, обумовленої статичною ємністю кінцевого розриву випромінюючої поверхні. У квазілінійному режимі збудження згідно [6]:

$$\dot{Z}_n = \frac{R_n}{1 + j\omega_0 n C_k R_0}, \quad V_2 = \frac{\beta_2 V_1^2}{2}, \quad V_3 = \frac{\beta_3 V_1^3 R_3}{R_0},$$

де R_n — активний опір НД на n-ій гармоніці, R_0 — активний опір НД на частоті ЗС; для другої та третьої гармонік:

$$R_2 = R_0, \quad R_3 = R_0 (1 + 0,75 \beta_3 V_1^2),$$

$V_1^2 = \frac{[\tilde{E}_0 / (1 + \dot{Z}_{\text{вх}} / R_0)]^2}{1 + f_0 / f_k}$ — квадрат амплітуди ЕРС, що породжує струми з частотою f_0 опромінюючого поля ЗС НР; f_k — критична частота НД. Значення \tilde{E}_0 знаходиться інтегруванням дотичної складової падаючої хвилі по z у межах довжини вібратора.

Для розв'язку системи ІР (2) використано метод Кінга-Міддлтона [7]. З лівої та правої частин рівняння віднімемо скалярну функцію

$$\tilde{U}_n = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 i_n(z') G_n(l, z') dz',$$

де $G_n(z, z') = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\exp(-jk_n r_0)}{r_0}$ — функція Гріна для розподілу струмів у тонкому вібраторі; $k_n = kn$ — хвильове число для n -ї гармоніки; $r_0 = \sqrt{(z - z')^2 + a^2}$; a — діаметр перерізу плеча симетричного вібратора.

Для моногармонічного ЗС НР шуканий розподіл струмів у простому НРС $i_n(z)$ наведемо у вигляді [7, 8]

$$i_n(z) = \hat{\alpha}_n [\cos(k_n z) - \cos(k_n l)] + \hat{\eta}_n \sin(k_n |z|), \quad (4)$$

де $\hat{\alpha}_n$ та $\hat{\eta}_n$ — вагові коефіцієнти, знаходження котрих передбачає підставку (4) у сформоване ІР (2) з різницеvim ядром $K_n(z, z') = G_n(z, z') - G_n(l, z')$ і приведення коефіцієнтів до однакових тригонометричних функцій $[\cos(k_n z) - \cos(k_n l)]$ та $\sin(k_n |z|)$.

Розсіювання електромагнітних хвиль вібратором з безінерційним навантаженням, включеним в розрив між плечима, еквівалентне випромінюванню поля, створюваного еквівалентним генератором сторонньої ЕРС V_n . Тому потужність розсіяного поля може бути розрахована як

$$P_n = \frac{1}{8R_{\text{НРс}_0}} [V_n + i_n(0)R_{\text{НРс}_n}]^2, \quad (6)$$

де $R_{\text{НРс}_0}$ — опір простого НРС на частоті ЗС НР; $R_{\text{НРс}_n}$ — опір простого НРС на n -ій гармоніці частоти ЗС [9, 10].

Підставляючи струм $i_n(z)$ в (6), знайдемо потужність вторинного випромінювання на n -ній гармоніці P_n .

Скористаємося також виразом

$$P_n = 4\pi r^2 \Pi_n, \quad (7)$$

де Π_n — щільність потоку потужності поля на n -ній гармоніці, що відповідає відстані r від НРС.

Таким чином, щільність потоку потужності розсіяного поля на другій та третій гармоніках:

$$\Pi_2 = \frac{\beta_2^2 \tilde{K}_2^2 \operatorname{Re} \dot{Z}_{\text{вх}}}{4\rho_2} \cdot \left[\hat{\alpha}_2 (1 - \cos(k_2 l)) + \hat{\eta}_2 \sin(k_2 l) \right]^2 \Pi_0^2, \quad (8)$$

$$\Pi_3 = \frac{\beta_3^2 \tilde{K}_3^2 R_3 \operatorname{Re} \dot{Z}_{\text{вх}}}{4R_0 \rho_3} \cdot \left[\hat{\alpha}_3 (1 - \cos(k_3 l)) + \hat{\eta}_3 \sin(k_3 l) \right]^2 \Pi_0^3, \quad (9)$$

де ρ_n — коефіцієнт, що враховує вплив на нелінійне перетворення для n -ї гармоніки щільності потоку потужності ЗС, визначається з граничних умов під час розв'язку (4).

Згідно отриманим залежностям (8) та (9) щільності потоку потужності поля, розсіяні на другій та третій гармоніках, змінюються за квадратичним та кубічними законами відповідно при варіюванні щільності потоку потужності падаючої хвилі Π_0 . Величини Π_2 та Π_3 визначаються коефіцієнтом нелінійності β_n ВАХ НД та дійсною частиною вхідного опору антенної структури НРС на частоті ЗС НР. При фіксованому значенні Π_0 щільність потоку потужності поля на n -ій гармоніці зростає зі збільшенням коефіцієнта нелінійності за законом β_n^2 , що дозволяє оцінити у процесі зондування спотворення ВАХ НД нелінійного розсіювача.

Результати розрахунку залежності заданої щільності потоку потужності вторинного випромінювання від щільності потоку потужності падаючої хвилі на основі розв'язку IP (5) збігаються з залежностями, обчисленими за формулами (8) і (9). Відповідно до проведених розрахунків $\Pi_{0\min} = 23$ (дБ·Вт/м²) при $r = 1$ м (відстань між джерелом ЗС та НРС).

Оцінимо експериментальне значення рівня мінімальної щільності потоку потужності ЗС $\Pi_{0\text{гр}}$ (граничне значення), при якому виникає розсіювання закладним пристроєм НП СВ. Для цього проведено натурні дослідження, суть яких полягає у наступному. В екранованій радіопоглинаючим матеріалом «КВАРЦ» камері визначається чутливість ЗП до випромінюваного ЗС нелінійним радіолокатором «NRμ» з такими характеристиками [11]: робоча частота $f_0 = 850$ МГц, номінальна потужність в імпульсі $P_{\text{імп}} = 600$ Вт (в логарифмічному масштабі $P_{\text{імп}} = 27$ дБ·Вт). Рівень мінімально випромінюваної потужності ЗС складає $P_{\min} = -10$ дБ·Вт.

У якості макетів ЗП обрано 10 конструкцій «радіобагів» – мікропередавачів, радіус дії котрих не перевищує декількох сотень метрів. Кожен мікропередавач має чутливий мікрофонний підсилювач на базі біполярних транзисторів та передавач УКХ діапазону. Напруга живлення від 1,5 до 4,5

В. За габаритними розмірами макети ЗП однакові (відповідні коробці з під сирників).

Для всіх макетів ЗП проводились дослідження на відстані $r = 1$ м від НР при варіюванні рівня ЗС з подальшою фіксацією НП СВ на другій та третій гармоніках. За допомогою (7) розраховувалася щільність потоку потужності поля на n -й гармоніці. Оцінку граничних параметрів ЗС проводили згідно виразів:

$$\langle G_{ЗП} \rangle = \frac{4\pi \langle S_{\text{еф}} \rangle}{\lambda^2}, \quad \langle \Pi_2 \rangle = \langle \Pi_0 \rangle \langle S_{\text{еф}} \rangle \langle \xi_2 \rangle \frac{\langle G_{ЗП} \rangle}{4\pi r^2},$$

$$\langle \Pi_3 \rangle = \langle \Pi_0 \rangle \langle S_{\text{еф}} \rangle \langle \xi_3 \rangle \frac{\langle G_{ЗП} \rangle}{4\pi r^2},$$

де $\langle \cdot \rangle$ — позначення усереднення по вибірці; $G_{ЗП}$ — коефіцієнт підсилення антенної структури ЗП; λ — довжина хвилі ЗС НР; $S_{\text{еф}}$ — площа друкованої плати макета ЗП; ξ_n — коефіцієнт перетворення поглиненої ЗП енергії ЗС НР у перевипромінюваний сигнал на n -й гармоніці.

Ймовірність виявлення ЗП перевищуватиме 0,5, якщо $\xi_n > 0$ та має кореляційну залежність від Π_0 . Таким чином, кожному макетові відповідатиме свій діапазон експериментально отриманих граничних значень $\Pi_{0\text{поч}_i} \dots \Pi_{0\text{кін}_i}$, при яких має місце поява кореляційної залежності у відповідності до виконаного повторного виміру НП СВ, $i = \overline{1,10}$. Звідки

$$\langle \Pi_{0\text{поч}} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Pi_{0\text{поч}_i}}{10} = 20 \text{ (дБ} \cdot \text{Вт/м}^2 \text{)},$$

$$\langle \Pi_{0\text{кін}} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Pi_{0\text{кін}_i}}{10} = 25 \text{ (дБ} \cdot \text{Вт/м}^2 \text{)}.$$

Для забезпечення адекватності експериментально отриманих результатів проведемо статистичну перевірку з довірчою ймовірністю 0,95.

При $\xi_n = 0$ середнє значення розсіяної ЗП щільності потоку потужності під час зондування дорівнює нулю $m_{\Pi_p} = 0$, тоді середнє значення поглиненої ЗП щільності потоку потужності ЗС становить

$$m_{\Pi_{ЗП}} = \zeta \left(\sigma_{\Pi_{\text{вн}}} + \sigma_{\Pi_p} \right)$$

де $\sigma_{\Pi_{\text{вн}}}$ — середнє квадратичне відхилення частини Π_0 на дисипативні втрати; σ_{Π_p} — середнє квадратичне відхилення частини Π_0 на розсію-

вання НП СВ; $\zeta = 1, 2, \dots, 3$ — коефіцієнт, що враховує вплив невідомих чинників на ймовірність генерування закладним пристроєм НП СВ під час зондування.

Статистичну оцінку граничного значення $\Pi_{0гр}$ доцільно виконувати шляхом розв'язку нерівності:

$$\Pi_{0гр} \leq m_{ПЗП} - m_{ПР} + \zeta(\sigma_{ПВН} + \sigma_{ПР}) \quad (10)$$

Ймовірність відсутності НП у спектрі СВ при $\Pi_{0зр}$ має вигляд [12]:

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y-\zeta\left(1+\frac{\sigma_{ПЗП}}{\sigma_{ПР}}\right)}{2}} dx dy,$$

де $x = \frac{A}{\sigma_{П0}}$; $y = \frac{B}{\sigma_{ПР}}$; $dx = \frac{dA}{\sigma_{П0}}$; $dy = \frac{dB}{\sigma_{ПР}}$; A — значення граничних рівнів

щільностей потоку потужності ЗС НР, B — значення, які характеризують величину щільностей потоку потужності розсіяних ЗП сигналів.

Якщо позначити $\gamma = \sigma_{ПЗП} / \sigma_{ПР}$, то вираз прийме вигляд:

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y-\zeta(1+\gamma))^2}{2}} dx dy.$$

Отже, ймовірність відсутності НП у спектрі СВ при $\Pi_{0зр}$ залежить від параметрів γ і ζ .

Результати обчислень ймовірності взаємодії ЗС з НРс для різних ξ і ζ представлено в табл. 1, довірча ймовірність становить 0,95.

Згідно табл. 1 на $\phi(x, y)$ суттєво впливає лише ζ , причому найбільш несприятливі випадки будуть при $\zeta = 1, 0$. Рівень граничної щільності потоку потужності ЗС буде дорівнювати за (10)

$$\Pi_0 = m_{ПЗП} - m_{ПР},$$

оскільки при $\zeta = 1, 0$ $\langle \phi(x, y) \rangle \approx 0, 5$.

Виходячи з експериментальних досліджень макетів ЗП:

$$m_{ПЗП} = -31 \text{ (дБ} \cdot \text{Вт/м}^2\text{)}, \quad m_{ПР} = -10 \text{ (дБ} \cdot \text{Вт/м}^2\text{)}.$$

Таблиця 1.

ζ	$\gamma = 1$	$\gamma = 2$	$\gamma = 3$	$\gamma = 4$	$\gamma = 5$
1,0	0,493	0,508	0,506	0,494	0,495
1,1	8,384E-02	9,346E-02	0,105	0,110	0,116
1,2	2,588E-03	3,872E-03	5,908E-03	7,361E-03	9,160E-03
1,3	1,156E-05	2,343E-05	4,435E-05	1,035E-04	1,946E-04

Таблиця 1 (продовження)

ζ	$\gamma = 6$	$\gamma = 7$	$\gamma = 8$	$\gamma = 9$	$\gamma = 10$
1,0	0,481	0,515	0,562	0,571	0,492
1,1	0,117	0,109	0,103	9,848E-02	9,403E-02
1,2	9,676E-03	1,461E-02	1,182E-02	7,596E-03	5,651E-03
1,3	1,905E-04	2,245E-04	5,515E-04	3,819E-04	1,388E-04

Тоді довірча гранична щільність потоку потужності ЗС дорівнює:

$$P_{0гр} = 21 \text{ (дБ} \cdot \text{Вт/м}^2\text{)}.$$

Так як довірче значення входить до інтервалу експериментально отриманих значень, тоді останні можна вважати статистично значимими з довірчою ймовірністю 0,95.

Отже, генерування розсіяного сигналу відбудеться в межах $P_0 = 20...25 \text{ дБ} \cdot \text{Вт/м}^2$, що узгоджується з результатами теоретичних розрахунків.

Висновки

Щільності потоку потужності поля, розсіяні на другій та третій гармоніках, змінюються за квадратичним та кубічними законами відповідно при варіюванні щільності потоку потужності падаючої хвилі. При фіксованому значенні P_0 щільність потоку потужності поля на n -й гармоніці зростає із збільшенням коефіцієнта нелінійності за законом β_n^2 , що дозволяє оцінити у процесі зондування спотворення ВАХ НД нелінійного розсіювача.

Проведені експериментальні дослідження показали, що граничний рівень щільності потоку потужності діючого ЗС при якому з'являється від НРС корисний сигнал відгуку знаходиться в межах $P_0 = 20...25 \text{ дБ} \cdot \text{Вт/м}^2$, що узгоджується з результатами теоретичних розрахунків.

Перелік посилань

1. Зінченко М. В. Ідентифікація напівпровідників засобами нелінійної локації за двома гармоніками / М.В. Зінченко, Ю.Ф. Зінковський // [Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування](#). – 2009. – № 38. – с. 102-111.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов – М. : Высшая школа, 1988. – 432 с.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин - М. : Советское радио, 1975. - 391 с.
4. Зиньковский Ю. Ф. Искажение картины рассеивания в нелинейной радиолокации / Ю. Ф. Зиньковский, М. В. Зинченко // [Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського](#). – 2011. – Вип. 1 (66). – С. 38–42.
5. Зінченко М. В. Розсіювання плоских хвиль симетричним вібратором з нелінійним навантаженням при дії нелінійного радіолокатора / М.В. Зінченко, Ю.Ф. Зінковський // [Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування](#). – 2010. – № 40.

– с. 131-140.

6. Горбачев А. А. Влияние границы раздела двух сред на структуру электромагнитного поля, рассеянного нелинейной полуволновой рамкой / А.А. Горбачев, Т.М. Заборонкова, С.П. Тараканков // Известия вузов. Радиофизика. – 1995. – Т. 38. – № 9. – С. 961-968.

7. Кинг Р. [Антенны в материальных средах](#) / Р. Кинг, Г. Смит ; пер. с англ. под ред. В.Б. Штейншлейгера. – М. : Мир, 1984. – 824 с.

8. Беляев В. В. Исследование плотности потока энергии электромагнитного поля, рассеянного вибратором с нелинейной нагрузкой / Беляев В.В., Маюнов А.Т., Михайлов Г.Д., Разиньков С. Н. // Метрология (Приложение к журналу «Измерительная техника»). – 1999, №6. – С. 21-31.

9. Айзенберг Г. З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберга, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко, Г.А. Клигер, А.Г. Курашов ; под ред. Г.З. Айзенберга. – М. : Радио и связь, 1985. – 536 с.

10. Ашихмин А. В. Математическое моделирование вибраторных антенных решеток пеленгаторных программно-аппаратных комплексов с учетом электродинамического взаимодействия / А. В. Ашихмин. ; Дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж : ВГТГУ, 2004. – 214 с.

11. Переносной детектор нелинейных переходов «NRμ» / Руководство по эксплуатации ЮТДН 468 165 003 РЭ ; ЗАО «Группа защиты – ЮТТА».

12. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Сов. радио, 1950. – 752 с.

References

1. Zinchenko, M. V., Zinkovskiy, Yu. F. (2009) Identification of a semiconductor by facility of the nonlinear location on two harmonicas. [Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.](#), no. 38, pp. 102-111. (in Ukrainian)

2. Sazonov D. M. (1988) Antenny i ustroystva SVCh [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 432 p.

3. Levin B. R. (1975) Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 391 p.

4. Zinkovskij J. F. and Zinchenko M. V. (2011) Distortion of a picture of dispersion in a non-linear junction detector. [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University](#), No. 66, pp. 38-42. (in Russian)

5. Zinchenko, M. V., Zinkovskiy, Yu. F. (2010) Scattering of the flat waves by symmetrical vibrator with nonlinear load in process work of nonlinear radio locator. [Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.](#), no. 40, pp. 131-140. (in Ukrainian).

6. Gorbachev A.A., Zaboronkova T.M. and Tarakankov S.P. (1995) The influence of the interface between two media on the structure of the electromagnetic field scattered by a nonlinear half-wave loop. [Radiophysics and Quantum Electronics](#), Vol. 38, Issue. 9, pp. 625-630.

7. King R.W.P., Smith G.S., Owens, M. and Wu, T. T. (1981) [Antennas in matter: Fundamentals, Theory, and Application](#). Cambridge, Mass., The MIT Press, 880 p.

8. Belyaev V. V., Mayunov A.T., Mikhailov G.D. and Razin'kov S. N. (1999) Issledovanie plotnosti potoka energii elektromagnitnogo polya, rasseyannogo vibratom s nelineinoi nagruzkoi. [Metrologiya](#), no. 6. pp. 21-31.

9. Aizenberg G. Z. eds., Belousov S.P., Zhurbenko E.M., Kliger G.A. and Kurashov A.G. (1985) Korotkovolnovye anteny [Shortwave antennas]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 536 p.

10. Ashikhmin A. B. (2004) *Matematicheskoe modelirovanie vibratornykh antennykh reshetok pelengatornykh programmno-apparatnykh kompleksov s uchetom elektrodinamicheskogo vzaimodeistviya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling of dipole antenna arrays DF software and hardware systems with the electrodynamic interaction]. Voronezh, VGTGU Publ., 214 p.

11. Perenosnoi detektor nelineynykh perekhodov «NR μ » : rukovodstvo po ekspluatatsii YuTDN 468165003 RE [Portable detector nonlinear transitions «NR μ » : Manual YUTDN 468,165, 003].

12. Levin B. R. (1950) *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 752 p.

Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф. Оцінка чутливості нелінійних розсіювачів до зонduючого випромінювання. Робота присвячена дослідженню впливу параметрів зонduючого сигналу (ЗС) нелінійного радіолокатора (НР) на фізику процесів у нелінійних розсіювачах (НРс). Запропоновано аналітичний підхід на основі розв'язку системи інтегральних рівнянь Галена, що дозволяє врахувати вплив характеристик НРс на параметри розсіювання нелінійних продуктів сигналу відгуку під час зондування. Виконано оцінку мінімального рівня щільності потоку потужності ЗС НР, при якому стає можливим виявлення об'єкту пошуку. Приведені результати натурних досліджень, що узгоджуються з розрахованими значеннями.

Ключові слова: нелінійна радіолокація, нелінійний розсіювач, інтегральні рівняння Галена, нелінійні продукти сигналу відгуку.

Zinchenko M. V., Zinkovskiy Yu. F. Otsenka chuvstvitel'nosti nelineynykh rasseivatel'ey k zondiruyushchemu izlucheniyu. Rabota posvyashchena issledovaniyu vliyaniya parametrov zondiruyushchego signala (ZS) nelineynogo radiolokatora (NR) na fiziku protsessov v nelineynykh rasseivatel'ях (NRс). Predlozhenno analiticheskiy podkhod na osnove resheniya sistemy integral'nykh uravneniy Galena, pozvol'yayushiy uchet vliyaniya kharakteristik NRс na parametry rasseyeniya nelineynykh produktov signala otzlika vo vremya zondirovaniya. Vypolneno otsenku minimal'nogo urovnya plotnosti potoka mozhnosti ZS NR, pri kotorom stanovitsya vozmozhnym obnaruzheniye ob'ekta poiska. Privedeny rezultaty naturnykh issledovaniy, chto soglasuyutsya s rasschitannymi znacheniyami.

Ключевые слова: нелинейная радиолокация, нелинейный рассеиватель, интегральные уравнения Галена, нелинейные продукты сигнала отклика.

Zinchenko M., Zinkovskiy Y. Evaluation of nonlinear scatterers sensitivity to probe radiation

Introduction. The nonlinear radar (NR) usage efficiency links with parameters influence of probe signal (PS) on the processes physics in nonlinear scatterers (NS). It is known that the variation of the PS power level of NS affects the distortion level of characteristics of NS semiconductor structures.

The main part. Analytical modeling of scattering processes the response signal by NS on harmonics assumes usage the experimental semiconductor devices CVC for different power levels of PS. Using this data the approximation of semiconductor devices CVC by polynomial is done with subsequent finding the appropriate coefficients of nonlinearity β_n . As a criterion of assessing the minimum of density of power flux level Π_0 continuous PS of NS the minimum levels of nonlinear products of scattered signal are advisable to be chosen, for which the probability of detection and identification of NS exceed the value of 0.5. Analytical studies

have shown that the density of power flux of the field, which scattered on the second and third harmonics, changes by a quadratic and cubic laws by varying the density of power flux of the incident wave. At fixed values Π_0 of field density of power flux on n -th harmonic increases with the coefficient of nonlinearity by the law β_n^2 .

Conclusion. According to the analytical calculations, $\Pi_0 = 23 \text{ (dB} \cdot \text{W/m}^2\text{)}$ at $r = 1 \text{ m}$ (distance between the source of PS and the NS). Experimental studies have shown that the generation of the desired response signal will take place within $\Pi_0 = 20..25 \text{ dB} \cdot \text{W/m}^2$ which consistent with the results of the theoretical calculations.

Keywords: nonlinear radar, nonlinear scatterer, integral equations of Galen, nonlinear products of response signal.