

## **ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДНЬОГО НЕЛІНІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ В НЕЛІНІЙНІЙ РАДІОЛОКАЦІЇ**

*Зінченко М. В., аспірант; Зіньковський Ю. Ф., д.т.н., професор  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

На сьогоднішній день актуальним є питання ефективності застосування нелінійних радіолокаторів (НР) [4, 5]. НР відрізняються між собою за принципом дії, випромінюваною потужністю, чутливістю приймачів, конструктивними та схемотехнічними рішеннями тощо. Останнє визначає ефективність застосування даних засобів технічного захисту інформації та відповідно їх досить високу собівартість. Відомо, що ефективність використання засобів нелінійної радіолокації суттєво погіршують присутні в досліджуваному середовищі завадові нелінійні розсіювачі (НРс) на основі структур «метал-окисел-метал» (МОМ-структури) [6]. Тому доцільною стає оцінка щільності даних структур в досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі та її вплив на ефективність застосування конкретного пристрою нелінійної радіолокації. Питання оцінки щільності завадових НРс потребує розробки спеціалізованої системи попереднього нелінійного зондування (СПНЗ). Дана система повинна провокувати під час зондування досліджуваного середовища такий сигнал відгуку (СВ) від завадових НРс, щоб, на основі аналізу його спектральної картини, можливо було виконати з відповідною ймовірністю оцінку щільності завадових нелінійних об'єктів. Таким чином, задача вирішення основних питань концепції функціонування СПНЗ потребує численних теоретичних та експериментальних досліджень.

Розглянемо фазомодульований (ФМ) сигнал. Амплітуда ФМ сигналу завжди залишається постійною. Інформаційна складова сигналу пов'язана з відхиленням миттєвої фази. У загальному випадку вираз для ФМ - коливання має вигляд

$$A(t) = A \cdot \cos \left[ \Omega \cdot t + k \cdot m(t) + \varphi_0 \right],$$

де  $A$  – амплітуда високочастотного коливання;  $\Omega$  – опорна (несуча) кругова частота високочастотного коливання;  $t$  – поточний час;  $\varphi_0$  – початкова фаза, є постійною величиною;  $m(t)$  – інформаційний сигнал;  $k$  – крутість модуляційної характеристики фазового модулятора.

Відомо, що ФМ сигнал розкладається на два коливання з частотою  $\Omega$ , причому останні зсунуті між собою по фазі на  $\pi/2$ . Враховуючи, що інфо-

рмацийний сигнал  $m(t)$  змінюється за синусоїдальним законом в часі, часові функції амплітуд приймуть вид

$$A \cdot \cos(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]), \quad (1)$$

$$A \cdot \sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]), \quad (2)$$

де  $\beta$  – індекс модуляції складових інформаційного сигналу.

Кожна із цих функцій може бути розкладена в ряд Фур'є [1]:

$$\cos(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]) = J_0(\beta) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cdot \cos[2n \cdot \Omega \cdot t], \quad (3)$$

$$\sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta) \cdot \sin[(2n-1) \cdot \Omega \cdot t].$$

Коефіцієнти  $J_n(\beta)$  є функціями Беселя 1-го роду та  $n$ -го порядку ( $n=1, 2, \dots, m, \dots$ ).

У якості зонduючого сигналу системи попереднього нелінійного зондування виберемо складову (2) інформаційного сигналу задаючого генератора ФМ сигналу

$$U_{3C}(t) = U_m \cdot \sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]), \quad (4)$$

де  $U_m$  – амплітуда другої складової інформаційного сигналу після поділу.

У реальності випромінюваний СПНЗ ЗС представляє адитивну суміш другої складової інформаційного сигналу задаючого генератора та «білого» гаусового шуму

$$U_{3C}^{\text{II}}(t) = U_{3C}(t) + U_{\text{ш}}(t). \quad (5)$$

Шум  $U_{\text{ш}}(t)$  – це стаціонарний (у широкому змісті) випадковий процес із рівномірним енергетичним спектром і нормальною (гаусовою) щільністю розподілу ймовірності.

Нехай, енергетичний спектр і кореляційна функція «білого» шуму на вході випромінюючої антени системи попереднього нелінійного зондування відповідно рівні

$$F_n(\Omega) = \begin{cases} 2N_0, & |\Omega| \leq \Delta\Omega_{\text{ПМФ}}/2, \\ 0, & |\Omega| > \Delta\Omega_{\text{ПМФ}}/2; \end{cases} \quad (6)$$

$$B_n^{\text{III}}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}/2}^{+\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}/2} F_n(\Omega) \cdot \cos \Omega \tau d\Omega = \frac{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}} \cdot N_0}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\tau \cdot \Delta\Omega_{\text{ПМФ}}}{2}}{\frac{\tau \cdot \Delta\Omega_{\text{ПМФ}}}{2}}, \quad (7)$$

де  $N_0$  – амплітуда спектральних складових білого шуму;  $\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}$  – смуга пропускання підсилувача модулюючої функції.

Спектр адитивної суміші зонduючого сигналу (4) і «білого» гаусового шуму (6) на вході випромінюючої антени системи попереднього нелінійно-

го зондування ( $\beta \approx \pi$ ) має вигляд, представлений на рис. 1.

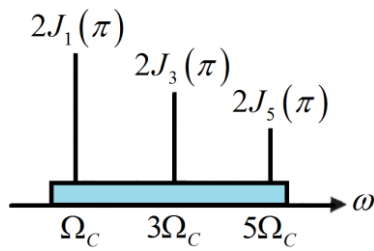


Рис. 1

Для визначення енергетичного спектра вторинного процесу, який представляє перевипромінений нелінійним розсіювачем сигнал або його кореляційної функції, недостатньо знати тільки спектр (або кореляційну функцію) первинного процесу – діючий на завадовий НРС зондує сигнал, а необхідно мати, принаймні, вираз для двовимірної функції розподілу діючо-

го (первинного) процесу [7].

Нехай, відома вольт-амперна характеристика (ВАХ) нелінійного елемента завадового нелінійного розсіювача, яку математично можливо описати функцією  $y = f(x)$ , та існує двовимірний функція розподілу  $w_2(x_1, x_2, \tau)$  випадкового стаціонарного первинного процесу  $\xi(t)$ , що діє на завадовий НРС. Якщо  $\xi(t)$  випадковий стаціонарний процес, то стаціонарним є також і вторинний процес  $\zeta(t) = f[\xi(t)]$ , перевипромінюваний завадовим НРС, а його кореляційна функція рівна [3]

$$B_\zeta(\tau) = m_1 \{ f[\xi(t)] \cdot f[\xi(t+\tau)] \} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot w_2(x_1, x_2, \tau) dx_1 dx_2. \quad (8)$$

Знайшовши кореляційну функцію вторинного процесу, можна, використовуючи теорему Вінера - Хінчіна, тобто виконавши перетворення Фур'є, одержати енергетичний спектр цього процесу [2]. Однак безпосереднє обчислення інтеграла (8), як правило, дуже складне. Тому доцільно попередньо перетворити вираз для кореляційної функції вторинного процесу до такого виду, для якого змінні інтегрування в подвійному інтегралі розділяються. Методи обчислення інтегралів виду (8) приведені в [2, 3].

Якщо первинний процес  $\xi(t)$  представляє суму шуму  $N(t)$  та, принаймні, частково детермінованого сигналу  $S(t)$  при додаткових умовах статистичної незалежності й ергодичності  $S(t)$  та  $N(t)$ , як правило легше обчислити інтеграл в (8), використавши явно характер сигналу. Представимо згідно [2]

$$B_\zeta(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(S_1 + N_1) \cdot f(S_2 + N_2) \cdot w_2(S_1, N_1; S_2, N_2; \tau)_{S+N} dS_1 \dots dN_2,$$

де  $(w_2)_{S+N}$  – спільна двовимірний щільність імовірності  $S(t)$  та  $N(t)$ , причому,  $S(t)$  і  $N(t)$  незалежні, тому  $(w_2)_{S+N}$  представляється добутком двох співмножників  $(w_2)_{S+N} = (w_2)_S \cdot (w_2)_N$ . Застосовуючи ергодичну теорему [7], можна замінити статистичне середнє по безлічі сигнальних складових еквівалентним середнім за часом, отриманим безпосередньо з функціональ-

ного виразу сигналу. Остаточний результат представляється у вигляді змішаного виразу, що містить статистичне середнє по реалізаціях шуму та середнє за часом сигналу

$$B_{\zeta}(\tau) = \left\langle \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(S_1 + N_1) \cdot f(S_2 + N_2) \cdot w_2(N_1, N_2; \tau)_{S+N} dN_1 dN_2 \right\rangle_S,$$

де знак  $\langle \rangle$  означає операцію усереднення за часом.

Якщо сигнал  $S(t)$  детермінований, тоді діюча на завадовий НРс сукупність  $\xi(t) = S(t) + N(t)$  і відповідна сукупність  $\zeta(t) = f[\xi(t)]$  перевипромененого даним НРс сигналу вже не будуть стаціонарними [7], а, отже, не ергодичними. У цьому випадку не можна обчислити кореляційну функцію (ні для  $\xi$ , ні для  $\zeta$ ) апіорі зі статистичних властивостей  $\xi$  і перетворення  $f$ , можна знайти лише середнє цієї кореляційної функції на визначеній множині

$$\overline{B_{\zeta}(\tau)} = \left\langle \overline{f(S_1 + N_1) \cdot f(S_2 + N_2)}^{(N)} \right\rangle_S, \quad (9)$$

де використана та обставина, що при фіксованих епохах  $(t')$  модулюючого процесу, підмножина, утворена сигналом плюс шум, тобто  $\xi(t') = S(t') + N(t')$  ( $t'$  – постійно), ергодична. Наприкінці, використовуючи детермінований характер сигналу, виконується усереднення за часом по епохах  $t'$  модуляції, що позначене дужками  $\langle \rangle_S$  в (9). Таким чином, у випадку нестационарних процесів для одержання результатів, що не залежать від окремої реалізації сукупності, необхідні обидва види усереднення на відміну від повністю ергодичних випадків, де необхідно лише одне усереднення. Знак « $\overline{\phantom{x}}$ » позначає операцію усереднення по ансамблю реалізацій.

Під час попереднього нелінійного зондування, випроменена адитивна суміш сигналу та шуму, діє на завадовий НРс, нелінійний елемент якого представляє структуру «метал-окисел-метал», вольт-амперна характеристика якої відповідає закону  $y = \arcsin x$ . У разі апроксимації ВАХ нелінійного елемента ступеневим багаточленом, вираз  $y = \arcsin x$  можна записати у вигляді

$$y = \arcsin x \approx x + \frac{x^3}{6} \text{ при } |x| \leq 1, \quad (10)$$

інші члени в розкладанні (10) не враховуються через їхню малість.

Вираз (10) досить точно апроксимує характеристику  $y = \arcsin x$  тільки в області її головних значень  $[-0.5\pi; +0.5\pi]$ . Область визначення функції  $y = \arcsin x$  відповідає області зміни аргументу цієї функції  $|x| \leq 1$ .

Може трапитися так, що амплітуда модулюючої функції буде більше

одиниці, і це може призвести до того, що значення виразу (5), яке є аргументом функції  $y = \arcsin x$ , перевищить значення одиниці. Щоб цього не відбулося, накладемо на (5) вимогу, щоб  $|U_{3C}^{\Pi}(t)| < 1$  у будь-який момент часу.

Скористаємося (10) і знайдемо вираз для вторинного процесу, що представляє перевипромінений сигнал нелінійним розсіювачем під час зондування СПНЗ

$$U_{вих}(t) = \arcsin[\sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]) + \xi(t)] \approx \frac{9}{8} \sin(\beta \cdot \sin \Omega t) + \frac{5}{4} \xi(t) - \frac{1}{24} \sin(3\beta \cdot \sin \Omega t) - \frac{1}{4} \cos(2\beta \cdot \sin \Omega t) \xi(t) + \frac{1}{2} \sin(\beta \cdot \sin \Omega t) \xi^2(t) + \frac{1}{6} \xi^3(t). \quad (11)$$

При  $\beta = \pi$  розкладання модулюючої функції  $\sin(\beta \cdot \sin \Omega t)$  у гармонічний ряд дасть спектр діючого на завадовий НРс сигналу (5), див. рис. 1,

$$\sin(\pi \cdot \sin \Omega t) \approx 2 \cdot (J_1(\pi) \cdot \sin \Omega t + J_3(\pi) \cdot \sin 3\Omega t + J_5(\pi) \cdot \sin 5\Omega t). \quad (12)$$

При  $\beta = 3\pi$  одержимо спектр перевипроміненого завадовим НРс сигналу, що є результатом нелінійного перетворення спектра ЗС СПНЗ

$$\sin(3\pi \cdot \sin \Omega t) \approx 2 \cdot [J_1(3\pi) \cdot \sin \Omega t + J_3(3\pi) \cdot \sin 3\Omega t + J_5(3\pi) \cdot \sin 5\Omega t + J_7(3\pi) \cdot \sin 7\Omega t + J_9(3\pi) \cdot \sin 9\Omega t + J_{11}(3\pi) \cdot \sin 11\Omega t] \quad (13)$$

При  $\beta = 2\pi$  розкладання функції  $\cos(\beta \cdot \sin \Omega t)$  в гармонічний ряд (3), дасть парні гармоніки вихідних компонентів перевипроміненого сигналу (12). До виразу (11) парні гармоніки входять для нелінійної взаємодії з вихідним шумом

$$\cos(2\pi \cdot \sin \Omega t) = J_0(2\pi) + 2 \cdot [J_2(2\pi) \cdot \cos 2\Omega t + J_4(2\pi) \cdot \cos 4\Omega t + J_6(2\pi) \cdot \cos 6\Omega t + J_8(2\pi) \cdot \cos 8\Omega t]. \quad (14)$$

Підставивши (12) - (14) в (11), одержимо вираз для вторинного процесу

$$\begin{aligned} \arcsin[\sin(\beta \cdot \sin \Omega t) + \xi(t)] \approx & \frac{9}{4} \cdot [J_1(\pi) \cdot \sin \Omega t + J_3(\pi) \cdot \sin 3\Omega t + J_5(\pi) \cdot \sin 5\Omega t] + \\ & + \frac{5}{4} \cdot \xi(t) - \frac{1}{12} \cdot [J_1(3\pi) \cdot \sin \Omega t + J_3(3\pi) \cdot \sin 3\Omega t + J_5(3\pi) \cdot \sin 5\Omega t + \\ & + J_7(3\pi) \cdot \sin 7\Omega t + J_9(3\pi) \cdot \sin 9\Omega t + J_{11}(3\pi) \cdot \sin 11\Omega t] - \frac{1}{4} \cdot [J_0(2\pi) + \\ & + 2 \cdot [J_2(2\pi) \cdot \cos 2\Omega t + J_4(2\pi) \cdot \cos 4\Omega t + J_6(2\pi) \cdot \cos 6\Omega t + J_8(2\pi) \cdot \cos 8\Omega t]] \cdot \xi(t) + \\ & + [J_1(\pi) \cdot \sin \Omega t + J_3(\pi) \cdot \sin 3\Omega t + J_5(\pi) \cdot \sin 5\Omega t] \cdot \xi^2(t) + \frac{1}{6} \xi^3(t). \quad (15) \end{aligned}$$

Як видно з виразу (15), у результаті викривлень, внесених у первинний процес завадовим НРс, створюється новий спектр, що відрізняється від спектра зондуючого сигналу СПНЗ.

Спектральні складові перевипроміненого сигналу є продуктами перех-

ресної модуляції й утворюються внаслідок взаємних биттів складових первинного процесу, причому їх число й інтенсивність визначаються видом перетворення та статистичними характеристиками самого первинного процесу. Серед цих продуктів перехресної модуляції можна розрізнити три головні групи залежно від того, які частотні складові ЗС СПНЗ створюють їх.

Згідно (15), маємо три групи продуктів перехресної модуляції:

1. Шум ЗС і шум СВ. Ці продукти є результатом перехресної модуляції вихідних складових шуму (шостий доданок у виразі (15)), і дають безперервний спектр.

2. Сигнал СВ і шум СВ. Ці продукти виходять при перехресній модуляції вихідних складових сигналу (модуючої функції (12)) і їх гармонік з вихідним шумом. У виразі (15) ці продукти представлені п'ятим і четвертим (взаємодія парних гармонік вихідних компонентів сигналу з шумом) доданками. У результаті буде також безперервний спектр.

3. Сигнал ЗС і сигнал СВ. Ці продукти виходять внаслідок биттів вихідних компонентів сигналу та їх гармонік один з одним і завжди представляються дискретним або «лінійчатим» спектром. У виразі (15) ця взаємодія обумовлена наявністю сьомої, дев'ятої та одинадцятої гармонік перевипромененого завадовим НРс сигналу (третій доданок в (15)).

Знаючи характеристику нелінійного елемента завадового НРс  $y = f(x)$ , кореляційну функцію вторинного процесу можна обчислити за виразом (8), якщо відома двовимірна функція розподілу ймовірності випадкового первинного процесу. Якщо первинним процесом є сума сигналу  $U_{ЗС}(t)$  та «білого» гаусового шуму  $\xi(t)$ , то двовимірна функція розподілу цього процесу згідно [1] має вигляд

$$w_2(x_1, x_2, t, \tau) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot \sqrt{1-R^2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x_1 - a_1)^2 - 2 \cdot R \cdot (x_1 - a_1) \cdot (x_2 - a_2) + (x_2 - a_2)^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot (1 - R^2)} \right\}, \quad (16)$$

де  $a_1 = U_{ВІХ}(t)$ ,  $a_2 = U_{ВІХ}(t + \tau)$ , а  $R = R(\tau) = B_{n.ВІХ}(\tau) / B_{n.ВІХ}^{III}(0)$  – коефіцієнт кореляції та  $\sigma^2 = B_{n.ВІХ}^{III}(0)$  – дисперсія «білого» гаусового шуму (7) діючого на завадовий НРс у складі зондуючого сигналу СПНЗ;

$$R = R_{n.ВІХ}(\tau) = \frac{\sin \frac{\tau \cdot \Delta\Omega_{ПМФ}}{2}}{\tau \cdot \Delta\Omega_{ПМФ}}; \quad (17)$$

$$\sigma^2 = B_{n.ВІХ}^{III}(0) = \frac{N_0 \cdot \Delta\Omega_{ПМФ}}{U_m^2 \cdot \pi}; \quad (18)$$

$$\begin{cases} a_1 = \sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot t]), \\ a_2 = \sin(\beta \cdot \sin[\Omega \cdot (t + \tau)]). \end{cases} \quad (19)$$

Підставивши (10) і (16) в (8), одержимо вираз для кореляційної функ-

ції вторинного процесу

$$B_{ВИХ}(\tau, t) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot \sqrt{1-R^2}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(x_1 + \frac{x_1^3}{6}\right) \cdot \left(x_2 + \frac{x_2^3}{6}\right) \times \\ \times \exp\left\{-\frac{(x_1 - a_1)^2 - 2 \cdot R \cdot (x_1 - a_1) \cdot (x_2 - a_2) + (x_2 - a_2)^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot (1-R^2)}\right\} dx_1 dx_2. \quad (20)$$

Обчисливши інтеграл (20) і провівши необхідні перетворення, остаточно одержимо вираз для кореляційної функції вторинного процесу

$$B_{ВИХ}(\tau, t) = \sigma^4 R + \sigma^2 \cdot a_2 \cdot a_1 + \sigma^2 R + \frac{1}{2} \sigma^2 \cdot R \cdot a_2^2 + a_2 \cdot a_1 + \frac{1}{6} \cdot a_1 \cdot a_2^3 + \\ + \frac{1}{4} \cdot \sigma^4 \cdot a_2 \cdot a_1 + \frac{1}{4} \cdot \sigma^4 \cdot R \cdot a_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \sigma^4 \cdot R^2 \cdot a_2 \cdot a_1 + \frac{1}{4} \cdot \sigma^6 \cdot R + \frac{1}{6} \cdot R^3 \cdot \sigma^6 + \\ + \frac{1}{12} \cdot \sigma^2 \cdot a_2 \cdot a_1^3 + \frac{1}{12} \cdot \sigma^2 \cdot a_1 \cdot a_2^3 + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot R \cdot a_1^2 + \frac{1}{4} \cdot \sigma^2 \cdot R \cdot a_2^2 \cdot a_1^2 + \\ + \frac{1}{4} \cdot \sigma^4 \cdot R \cdot a_2^2 + \frac{1}{6} \cdot a_1^3 \cdot a_2 + \frac{1}{36} \cdot a_2^3 \cdot a_1^3. \quad (21)$$

Зазначимо, що членами зі  $\sigma^6$  із-за їх малості можна знехтувати.

Оскільки в загальному випадку кореляційна функція (21) залежить від  $t$  і  $\tau$ , то необхідно зробити усереднення цієї кореляційної функції за часом  $t$ :

$$B_{ВИХ}(\tau) = \langle B_{ВИХ}(\tau, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{+T/2} B_{ВИХ}(\tau, t) dt. \quad (22)$$

Підставивши обчислені значення інтегралів в (22), запишемо загальний вид виразу без врахування постійних коефіцієнтів перед доданками

$$B_{ВИХ}(\tau) = B_{ВИХ.С \times С}(\tau) + B_{ВИХ.Ш \times Ш}(\tau) + B_{ВИХ.С \times Ш}(\tau), \quad (23)$$

де  $B_{ВИХ.С \times С}(\tau)$  – кореляційна функція продуктів перехресної модуляції складових модулюючої функції (19),

$$B_{ВИХ.С \times С}(\tau) = \sum_{\substack{n=1,3,5, \\ 7,9}} \sum_{\substack{k=0,1,2, \\ 3,4,6}} \sum_{\substack{m=0,2,3, \\ 4,5,6}} J_1^m \cdot J_3^k \cdot \cos n\Omega\tau. \quad (24)$$

$B_{ВИХ.Ш \times Ш}(\tau)$  – кореляційна функція продуктів перехресної модуляції складових шуму випромінюваного ЗС СПНЗ,

$$B_{ВИХ.Ш \times Ш}(\tau) = \sum_{n=1,3} \sum_{m=2,4,6} \sigma^m \cdot R^n. \quad (25)$$

$B_{ВИХ.С \times Ш}(\tau)$  – кореляційна функція продуктів перехресної модуляції вихідних складових модулюючої функції (19) та їх гармонік з вихідним шумом,

$$B_{ВИХ.С \times Ш}(\tau) = \sum_{p=2,4} \sum_{q=0,1,2} \sum_{m=0,2} \sum_{\substack{k=0,1, \\ 2,4}} \sum_{\substack{n=0,1,2, \\ 3,4,6}} \sigma^p \cdot R^q \cdot J_1^m \cdot J_3^k \cdot \cos n\Omega\tau. \quad (26)$$

Як видно з виразу (23), вторинний процес містить усі основні групи продуктів перехресної модуляції вихідних складових модулюючої функції та «білого» гаусового шуму: (24)-(26).

Таким чином, можна привести декілька попередніх зауважень щодо структури вторинного процесу, зроблених на основі отриманого виразу для його кореляційної функції:

- Структура перевипромененого завадовим НРС сигналу відрізняється від структури зонduючого сигналу наявністю складових із частотами  $7\Omega$  та  $9\Omega$ . Причому середня потужність складових сигналу на частотах  $\Omega$  та  $3\Omega$  менше, чим середня потужність складових сигналу (12) з тими ж частотами в ЗС СПНЗ.

- Шум також перетерпів нелінійне перетворення, про що свідчать доданки виду (25). Причому середня коливальна потужність перевипромененого завадовим НРС шуму обумовлена значеннями  $\sigma^4$  та  $\sigma^6$ , менше, чим середня коливальна потужність «білого» гаусового шуму в ЗС СПНЗ (18).

- Серед доданків, обумовлених виразом (26), необхідно зазначити про наявність продуктів перехресної модуляції парних гармонік складових ЗС СПНЗ із вихідним шумом.

Застосовуючи теорему Вінера - Хінчіна, тобто виконавши перетворення Фур'є над виразом (23), одержимо вираз для енергетичного спектра вторинного процесу.

Використовуючи вирази (17), обчислимо енергетичний спектр вторинного процесу

$$F_{ВИХ}(\Omega) = \pi\delta(\Omega + \Omega_c) \cdot C_2 + \pi\delta(\Omega + 3\Omega_c) \cdot C_3 + \left\{ \frac{\pi}{\Delta\Omega_{ПМФ}} \left[ C_1 + C_4 + \frac{1}{2} C_5 \right] - \frac{\pi C_4}{\Delta\Omega_{ПМФ}^2} \cdot \Omega - \frac{2}{3} \frac{\pi C_5}{\Delta\Omega_{ПМФ}^3} \cdot \Omega^2 \right\} + a'_1 \pi\delta(\Omega + \Omega_c) + a'_3 \pi\delta(\Omega + 3\Omega_c) + a'_5 \pi\delta(\Omega + 5\Omega_c) + a'_7 \pi\delta(\Omega + 7\Omega_c) + a'_9 \pi\delta(\Omega + 9\Omega_c), \quad (27)$$

де

$$\begin{aligned} a'_1 &= 4J_1^2 + 2J_1^4 - 2J_1^3 J_3 + 4J_3^2 J_1^2 + 2J_1^4 - 2J_1^3 J_3 + 4J_3^2 J_1^2 + J_1^6 - \\ &\quad - 2J_1^5 J_3 + 5J_1^4 J_3^2 - 4J_1^3 J_3^3 + 4J_1^2 J_3^4. \\ a'_3 &= 4J_3^2 - \frac{2}{3} J_3 J_1^3 + 4J_1^2 J_3^2 + 2J_3^4 - \frac{2}{3} J_3 J_1^3 + 4J_1^2 J_3^2 + 2J_3^4 + \frac{1}{9} J_1^6 - \\ &\quad - \frac{4}{3} J_1^5 J_3 - \frac{2}{3} J_1^3 J_3^3 + 4J_1^4 J_3^2 + 4J_1^2 J_3^4 + J_3^6. \\ a'_5 &= J_1^4 J_3^2 - 2J_1^3 J_3^3 + J_1^2 J_3^4; \quad a'_7 = J_1^2 J_3^4; \quad a'_9 = \frac{1}{9} J_3^6. \\ C_1 &= 4\sigma^4 + 4\sigma^2 + 8\sigma^2 J_1^2 + 8\sigma^2 J_3^2 + 4\sigma^4 J_1^2 + 4\sigma^4 J_3^2 + \sigma^6 + 6\sigma^2 J_1^4 + \\ &\quad + 24\sigma^2 J_1^2 J_3^2 - 8\sigma^2 J_1^3 J_3 + 6\sigma^2 J_3^4. \\ C_2 &= 4\sigma^2 J_1^2 + \sigma^4 J_1^2 + 2\sigma^2 J_1^4 - 2\sigma^2 J_1^3 J_3 + 4\sigma^2 J_1^2 J_3^2. \\ C_3 &= 4\sigma^2 J_3^2 + \sigma^4 J_3^2 - \frac{2}{3} \sigma^2 J_3 J_1^3 + 4\sigma^2 J_1^2 J_3^2 + 2\sigma^2 J_3^4. \end{aligned}$$



$$C_4 = 4\sigma^4 J_1^2 + 4\sigma^4 J_3^2. \quad C_5 = \sigma^6.$$

Енергетичний спектр вторинного процесу зображений на рис. 2. На даному рисунку  $A_1, A_3, A_5, A_7, A_9, A_{11}$  – амплітуди перевипроменених завадовим НРС гармонік.

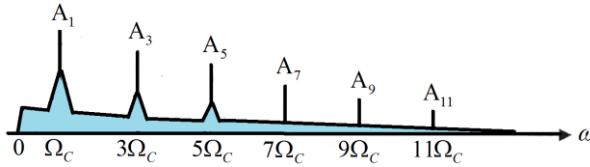


Рис. 2. Спектральна діаграма вторинного процесу

Аналізуючи вираз (27), отримаємо спектр перевипромененого сигналу при впливі на завадовий НРС суми зонduючого сигналу та «білого» гаусового шуму.

Даний спектр має складну структуру, у якій можна виділити три основні частини:

1. Дискретна частина спектра відповідає биттям між вихідними компонентами сигналу та їх гармоніками. Ця частина представлена п'ятою, сьомою і дев'ятою гармоніками:  $a_5\pi\delta(\Omega+5\Omega_c)$ ,  $a_7\pi\delta(\Omega+7\Omega_c)$ ,  $a_9\pi\delta(\Omega+9\Omega_c)$ .

2. Одна частина безперервного спектра обумовлена биттями між вихідними компонентами сигналу та шуму. Ця частина спектра утворюється за рахунок доданків в (27), які можна представити у вигляді:

$$\sum_{\substack{k=0,1,2 \\ m=2,3,4 \\ n=2,4}} \sigma^n J_1^m J_3^k \pi \delta(\Omega + \Omega_c) + \sum_{\substack{k=1,2,4 \\ m=0,2,3 \\ n=2,4}} \sigma^n J_1^m J_3^k \pi \delta(\Omega + 3\Omega_c) + \\ + \sum_{\substack{k=0,2 \\ m=0,2 \\ n=4}} \sigma^n J_1^m J_3^k \frac{\pi}{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}^2} \cdot [\Delta\Omega_{\text{ПМФ}} - \Omega]. \quad (28)$$

3. Інша частина безперервного спектра утворюється за рахунок биттів між вихідними складовими «білого» гаусового шуму. Ця частина спектра представлена доданком:

$$\sigma^6 \frac{\pi}{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}} \cdot \left[ \frac{1}{2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Omega^2}{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}^2} \right]. \quad (29)$$

Дискретна частина спектра доповнюється спектральною лінією при  $\Omega=0$ , що представляє постійну складову перевипромененого шуму, яка визначається биттями між вихідними компонентами шуму, а також биттями між вихідними компонентами сигналу й шуму. Постійна складова в (27) представлена доданками виду:

$$\sum_{n=2,4,6} \sigma^n \cdot \frac{\pi}{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}^2} + \sum_{\substack{n=2,4 \\ m=0,2,3,4 \\ k=0,1,2,4}} \sigma^n J_1^m J_3^k \cdot \frac{\pi}{\Delta\Omega_{\text{ПМФ}}}. \quad (30)$$

У результаті нелінійного перетворення вихідних компонентів модулюючої функції (першої та третьої гармонік в (12)) утворюються гармоніки

вихідних компонентів сигналу  $n \cdot \Omega_c$ ,  $m \cdot 3\Omega_c$  і комбінаційні складові виду  $\pm n \cdot \Omega_c \pm m \cdot 3\Omega_c$ , де  $n$  і  $m$  – цілі числа. Після відповідних перетворень будуть утворюватися як парні, так і непарні гармоніки. Наприклад, у найпростішому випадку, коли  $m = n = 1$  утворюються друга та четверта гармоніки. Четверта гармоніка дасть із першою гармонікою третю та п'яту, друга гармоніка дасть із першою гармонікою першу та третю гармоніки і т.д. Тобто парні гармоніки утворюються, як проміжні продукти нелінійного перетворення, щоб потім дати з вихідними компонентами сигналу і їх же гармоніками непарні гармоніки перевипромєненого заводовим НРс сигналу. Така особливість нелінійного перетворення парних гармонік пояснюється, особливою ВАХ нелінійного елемента. Проаналізувавши вирази для середніх потужностей гармонік перевипромєненого заводовим НРс сигналу, зазначимо, що вони представляють суму середніх потужностей продуктів перехресної модуляції вихідних компонентів сигналу (12) і їх гармонік:

$$A_i = \sum_{\substack{m=0,2,3,4,5,6 \\ n=0,1,2,3,4,6}} J_1^m J_3^n, \quad i = 1, 3, 5, 7, 9, 11. \quad (31)$$

Порівнюючи спектр сигналу та шуму ЗС СПНЗ (рис. 1) зі спектром вторинного процесу (рис. 2) можна зробити ряд важливих висновків:

1. Спектр перевипромєненого заводовим НРс (на основі МОМ-структури) сигналу став ширше, про що свідчить наявність сьомої, дев'ятої і одинадцятої гармонік сигналу в спектрі (27).

2. Середні потужності першої та третьої гармонік перевипромєненого заводовим НРс сигналу стали менше, чим середні потужності відповідних гармонік ЗС СПНЗ (4) і (12). Це пояснюється тим, що частина енергії ЗС СПНЗ, зосереджена в амплітудах його компонентів (12), у результаті нелінійної взаємодії із шумом перетворилася в енергію п'ятої, сьомої і дев'ятої гармонік сигналу, енергію шуму (28), а також в енергію постійної складової шуму (31).

3. Спектр перевипромєненого заводовим НРс шуму став ширше через взаємні биття між складовими шуму ЗС СПНЗ (31). Крім того, перевипромєнений заводовим НРс шум втратив характеристику «білого» шуму, тобто його спектр став не рівномірним, а спадаючим з ростом частоти (27). Навколо першої, третьої та п'ятої гармонік перевипромєненого сигналу з'явилися «основи», як результат нелінійної взаємодії вихідних компонентів сигналу (12) і шуму (28).

4. У спектрі вторинного процесу з'явилася постійна складова шуму (30), що свідчить про нелінійний характер взаємодії сигналу та шуму в заводовому НРс.

5. Якщо зондуєчий сигнал (4) і «білий» гаусовий шум (6) під час безпосередньої дії на заводовий НРс статистично незалежні, а тому не корельовані, то після перевипромєнювання заводовим НРс вони стають статистично залеж-

ними, а тому взаємно корельованими, оскільки частина енергії вхідного сигналу перетворилася в енергію шуму.

Дані особливості нелінійного перетворення суміші складової ФМ сигналу та «білого» гаусового шуму під час зондування СПНЗ дозволяє виконувати оцінку щільності присутніх у досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі завадових нелінійних розсіювачів.

### **Висновки**

Для збільшення ефективності нелінійних радіолокаторів актуальною є оцінка щільності завадових нелінійних розсіювачів (НРс) на основі структур «метал-окисел-метал» в досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі. Питання оцінки щільності завадових НРс потребує розробки спеціалізованої системи попереднього нелінійного зондування (СПНЗ).

Для СПНЗ в якості зондуючого сигналу (ЗС) доцільно використовувати адитивну суміш складової фазомодульованого (ФМ) сигналу та «білого» гаусового шуму.

Спектр перевипроменого завадовими НРс сигналу стає ширше під час зондування СПНЗ, про що свідчить наявність сьомої, дев'ятої і одинадцятої гармонік сигналу відгуку. Середні потужності першої та третьої гармонік перевипроменого завадовим НРс сигналу стають меншими, ніж середні потужності відповідних гармонік ЗС СПНЗ. Спектр перевипроменого завадовим НРс шуму стає ширше через взаємні биття між складовими шуму ЗС СПНЗ. Крім того, перевипромений завадовим НРс шум втрачає характеристику «білого» шуму, тобто його спектр стає не рівномірним, а спадаючим з ростом частоти. Навколо першої, третьої та п'ятої гармонік перевипроменого сигналу з'являються «основи», як результат нелінійної взаємодії вихідних компонентів сигналу та шуму. У спектрі вторинного процесу з'являється постійна складова шуму, що свідчить про нелінійний характер взаємодії сигналу та шуму в завадовому НРс.

У випадку, якщо складова ФМ сигналу і «білий» гаусовий шум під час безпосередньої дії на завадовий НРс статистично незалежні, а тому не корельовані, то після перевипромінювання завадовим НРс вони стають статистично залежними, а тому взаємно корельованими, оскільки частина енергії вхідного сигналу перетворилася в енергію шуму.

Особливості перетворення під час зондування СПНЗ завадових НРс сумішшю складової ФМ сигналу та «білого» гаусового шуму дозволяє виконувати за допомогою СПНЗ оцінку щільності присутніх у досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі завадових нелінійних розсіювачів.

### **Література**

- 1 Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. – М.: Сов. Радио, 1977. – 608 с.
- 2 Давенпорт В.Б., Рут В.Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. – М.: Изд-во Иностранной Лит-ры, 1960. – 468 с.

3 Деч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Сов. Радио, 1965. – 208 с.

4 Зінченко М. В., Зіньковський Ю. Ф. Випромінювання некротних гармонік в нелінійній радіолокації // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011. – Вип. 45. – С. 159-169.

5 Зінченко М. В., Зіньковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Значущість рівня потужності зонduючого сигналу в нелінійній радіолокації // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Науково-технічний збірник. – 2010. – Вип. 1(20). – С. 102-113.

6 Каргашин В.Л., Ткач В.Н., Ткачев Д.В. Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств // Специальная Техника, ОАО «Электрозавод», Москва, №6, 2006. – С. 42–48.

7 Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. – М.: Сов. Радио, 1974. – 552 с.

*Зінченко М.В., Зіньковський Ю.Ф. **Особливості системи попереднього нелінійного зондування в нелінійній радіолокації.** Робота присвячена актуальній на сьогоднішній день проблематиці оцінки впливу на ефективність застосування пристрою нелінійної радіолокації щільності завадових нелінійних розсіювачів (НРс) на основі структур «метал-окисел-метал» в досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі. Розглянуто особливості оцінки щільності завадових НРс спеціалізованою системою попереднього нелінійного зондування (СПНЗ). Показано доцільність використання для СПНЗ в якості зонduючого сигналу адитивної суміші складової фазомодульованого (ФМ) сигналу та «білого» гаусового шуму. Обґрунтовано, що перевипромінений завадовим НРс шум втрачає характеристику «білого» шуму, тобто його спектр стає не рівномірним, а спадаючим з ростом частоти. Навколо першої, третьої та п'ятої гармонік перевипроміненого сигналу з'являються «основи», як результат нелінійної взаємодії вихідних компонентів сигналу та шуму. У випадку, якщо складова ФМ сигналу і «білий» гаусовий шум під час безпосередньої дії на завадовий НРс статистично незалежні, а тому не корельовані, то після перевипромінювання завадовим НРс вони стають статистично залежними, а тому взаємно корельованими, оскільки частина енергії вхідного сигналу перетворилася в енергію шуму. Також зазначено, що наявність розглянутих особливостей перетворення завадовим НРс зонduючого сигналу СПНЗ дозволяє виконувати оцінку щільності присутніх у досліджуваному нелінійними радіолокаторами середовищі завадових нелінійних розсіювачів.*

**Ключові слова:** нелінійна радіолокація, нелінійний розсіювач, фазова модуляція, «білий» гаусовий шум.

*Зинченко М.В., Зиньковский Ю.Ф. **Особенности системы предварительного нелинейного зондирования в нелинейной радиолокации.** Работа посвящена актуальной на сегодняшний день проблематике оценки влияния на эффективность применения устройства нелинейной радиолокации плотности мешающих нелинейных рассеивателей (НРс) на основе структур «металл-окисел-металл» в исследуемом нелинейными радиолокаторами пространстве. Рассмотрены особенности оценки плотности мешающих НРс специализированной системой предварительного нелинейного зондирования (СПНЗ). Показана целесообразность использования для СПНЗ в качестве зондирующего сигнала аддитивной смеси составляющей фазомодулированного (ФМ) сигнала и «белого» гауссового шума. Обосновано, что переизлученный мешающим НРс шум те-*

рять характеристику «білого» шуму, то єсть єго спектр становить не рівномірним, а спадаючим з ростом частоти. Вокруг першої, третьої і п'ятої гармонік переизлученного сигналу з'являються «основания», як результат нелінійного взаємодіяння вихідних компонентів сигналу і шуму. В випадку, якщо складаюча ФМ сигналу і «білий» гауссовий шум в час безпосереднього діяння на мешаючий НРС статистично незалежні, а тому не корреліровані, то після переизлучення мешаючими НРС вони становлять статистично залежними, а тому взаємно коррелірованными, оскільки частинка енергії вхідного сигналу перетворилась в енергію шуму. Також вказано, що наявність розглянутих особливостей перетворення мешаючими НРС зондуємого сигналу СПНЗ дозволяє виконувати оцінку густоти присутніх в досліджуємому нелінійними радіолокаторами просторі мешаючих нелінійних розсіювачів.

**Ключевые слова:** нелінійна радіолокація, нелінійний розсіювач, фазова модуляція, «білий» гауссовий шум.

Zinchenko M.V., Zinkovskiy Y.F. **Features of the system of preliminary nonlinear probing in nonlinear radar.** The work is devoted to actual problem of estimation of the impact of density the obstructing nonlinear scatterers (NS) based on the structures "metal-oxide-metal" in the nonlinear radar space on the efficiency of usage particular devise in nonlinear radar. The features of density estimation of the obstructing NS by specialized system of preliminary nonlinear probing (SPNP) are observed. The expediency of usage an additive mixture of the second component of phase-modulated (FM) signal and the "white" Gaussian noise as a probe signal for SPNP is shown. It is proved that the noise, which was re-emitted by obstructing NS, loses the characteristic of "white" noise, i.e. its spectrum becomes not uniform, but decreasing with frequency increasing. The "skirts" are appeared around the first, third and fifth harmonics of the re-emitted signal as a result of nonlinear interaction of initial components of signal and noise. If the component of the FM signal and the "white" Gaussian noise during the direct action on the obstructing NS are statistically independent, and therefore they are not correlated, then after re-emission by obstructing NS they becomes statistically dependent, and therefore they are mutually correlated, because the part of the energy of input signal transformed into a noise energy. It is also pointed out that the expression of these features of transforming the probing signal by obstructing NS SPNP allows to estimate the density of the obstructing nonlinear scatterers in the nonlinear radar space which is under study of nonlinear radars.

**Keywords:** nonlinear radar, nonlinear scatterer, phase modulation, "white" Gaussian noise.