

ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВИХІДНОГО СИГНАЛУ КОРЕЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАНЬ ПРИ ФЛЮКТУЮЧОМУ СПЕКТРІ СИГНАЛІВ

Результати роботи орієнтовані на широкий клас аналізованих сигналів джерел випромінювання перш за все, з точки зору спектральних характеристик коливань, що пеленгуються. Показано, що наявність флюктуацій енергетичного спектру сигналу призводить до згладжування огинаючої вихідного сигналу корелятора, ступінь якого залежить від дисперсії флюктуацій, яке призводить до деякого зниження коефіцієнту придушення бокових пелюстків діаграми направленості.

Ключові слова: радіотехнічний пристрій, діаграма направленості, флюктуація.

Результаты работы ориентированы на широкий класс анализируемых сигналов источников излучения прежде всего, с точки зрения спектральных характеристик колебаний, которые пеленгуются. Показано, что наличие флюктуаций энергетического спектра сигнала приводит к сглаживанию огибающей выходного сигнала коррелятора, степень которого зависит от дисперсии флюктуаций, которое приводит к некоторому снижению коэффициента подавления боковых лепестков диаграммы направленности.

Ключевые слова: радиотехническое устройство, диаграмма направленности, флюктуация.

The results of this work focused on a wide range of sources of radiation signals considered primarily in terms of the spectral characteristics of Processed hesitation. Is shown that the fluctuations of the energy of the signal leads to a smoothing of the envelope of the output signal of the correlator, the extent of which depends on the variance of the fluctuations, which leads to some reduction in the coefficient of side lobe suppression pattern.

Keywords: radioelectronic devices, radiation pattern, fluctuation.

Вступ та постановка завдання. У більшості досліджень з питань систем пасивної пеленгації джерел випромінювань спектральні характеристики прийнятих коливань приймаються вузькосмуговими, а форма спектра апроксимується прямокутною або гаусовою залежністю [1].

Такий підхід до аналізу звужує сферу застосування його результатів, а в ситуаціях складної зовнішньої обстановки призводить до некоректності оцінок і знижує їх достовірність.

Основні положення дослідження. Як відомо, на борту сучасних аеродинамічних засобів застосовується велике число (більше 25) випромінюючих радіотехнічних пристроїв (РП) різноманітного призначення [2], при цьому слід розглядати широкий діапазон часо-частотних характеристик випромінюваних сигналів.

Просторово-частотні характеристики сигналів випромінювання залежать як від цільового призначення кожного РП, так і від чинників нестабільностей, таких як: нелінійність амплітудно-частотних характеристик генераторів, нелінійна залежність коефіцієнта стоячої хвилі фідерних трактів від частоти і ряду інших.

Дефекти спектрів випромінюваних сигналів, особливо щодо широкосмугових, виражаються в наявності нерівномірностей і в окремих випадках провалів. Спектр реальних коливань, випромінюваних РП, слід розглядати як сукупність регулярної з випадковою складових.

Нестационарність і дефекти спектру джерел випромінювань, що пеленгуються, найбільш істотно впливають на характеристики пеленгаційних каналів з кореляційним алгоритмом обробки. Тому в роботі розглядаються радіотехнічні системи (канали) пеленгації, побудовані на основі двох антен (основної та допоміжної) і взаємкореляційною обробкою прийнятих сигналів.

При виборі методу оцінки [3] використано положення статистичної теорії антен, зокрема результати, отримані в монографії [4]. Вибір методу статистичної оцінки вихідного сигналу системи обробки при нерегулярній (випадковій в загальному випадку) формі енергетичного спектру сигналу заснований на властивості дуальності перетворення двох пар характеристик, що мають різний фізичний зміст, але визначаються одним і тим же математичним апаратом у вигляді пари перетворень Фур'є.

Такими характеристиками є:

- з одного боку, розподіл поля в розкриві антени $\dot{A}(x)$ і діаграми направленості (ДН) антени $F(z)$;

- з іншого боку, енергетичний спектр $\dot{G}(w)$ випадкового процесу і його взаємкореляційна функція $R(\tau)$.

Формули, що визначають однозначний взаємозв'язок цих характеристик, мають вигляд:

$$F(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{A}(x) e^{izx} dx, \quad (1)$$

де x – координата розкриву;

z – узагальнена кутова координата,

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{G}(w) e^{jw\tau} dw. \quad (2)$$

У системі пеленгації, яка розглядається, вихідний сигнал $R_{01}(t', t'')$ при використанні в якості аргументу кутової координати (θ) визначає вид результуючої діаграми направленості (РДН) системи прийому (за термінологією антен – множника системи), яку позначимо як $\psi(\theta)$.

Середній за потужністю множник системи має вигляд:

$$m_1\{\psi^2(\theta)\} = \sum_{m,p=-n}^n m_1 \left\{ \vec{g}_m \vec{g}_p^* \right\} \exp\{j[m\Omega_\Gamma\tau(\theta) - p\Omega_\Gamma\tau(\theta)]\}, \quad (3)$$

де $\vec{g}_{m,p} = g_{m,p} e^{j\varphi_{m,p}}$ – комплексні випадкові величини, в яких середні значення $\vec{g}_{m,p}$ визначають вибірки регулярної складової взаємного спектра;

Ω_Γ – частота генератора.

Введемо нормовану до середнього випадкову величину

$$\vec{B}_{m,p} = \frac{\vec{g}_{m,p}}{g_{m,p}} \quad (4)$$

і використаємо представлення випадкових коефіцієнтів у вигляді

$$g_{m,p} = \bar{g}_{m,p} e^{j\eta_{m,p}}, \quad (5)$$

де $\eta_{m,p} = \ln B_{m,p}$.

Співвідношення (3) і (5) дозволяють представити вираз (3) у вигляді

$$m_1\{\psi^2(\theta)\} = \sum_{m,p=-n}^n \bar{g}_m \bar{g}_p^* \exp\{j(\eta_m + \eta_p + j(\varphi_m - \varphi_p))\} \exp\{j\Omega_\Gamma\tau(m-p)\}. \quad (6)$$

Введемо безрозмірний кутовий параметр

$$z = \frac{n\Omega_\Gamma}{c b \sin\theta}, \quad (7)$$

а також наведений індекс

$$x_m = \frac{m}{n}. \quad (8)$$

Зробивши операцію усереднення і враховуючи (5) і (6), отримаємо

$$m_1\{\psi^2(z)\} = \sum_{x_m=-1}^1 \sum_{x_p=-1}^1 \bar{g}_m \bar{g}_p^* Q(-j, j, 1, -1) e^{jz(x_m - x_p)}, \quad (9)$$

$$Q(-j, j, 1, -1) = \exp\left\{ \overline{\eta_m + \eta_p + j\varphi_m - j\varphi_p} \right\}, \quad (10)$$

де $Q(-j, j, 1, -1)$ – чотиривимірна характеристична функція випадкових величин $\eta_m, \eta_p, \varphi_m, \varphi_p$.

Для проведення подальшого аналізу прийемо наступні умови:

- закони розподілу $\eta_{m,p}$ і $\varphi_{m,p}$ нормальні з середніми значеннями $\bar{\eta}_{m,p} = 0$, $\bar{\varphi}_{m,p} = 0$ та дисперсіями σ_η^2 і σ_φ^2 відповідно;

- флюктуації в межах смуги прийому $\Delta f_{\text{пр}}$ стаціонарні.

За аналогією з отриманим в [4] результатом, вираз (10) може бути представлено у вигляді

$$Q(v_1, v_2, v_3, v_4) = \exp\left\{ j \sum_{k=1}^4 \xi_k v_k - \frac{1}{2} \sum_{k,L=1}^4 \sigma_k \sigma_L \rho_{kL} v_k v_L \right\}, \quad (11)$$

де $v_1 = -j, v_2 = -j, v_3 = 1, v_4 = -1, \xi_1 = \eta_m, \xi_2 = \eta_p, \xi_3 = \varphi_m, \xi_4 = -\varphi_p$;

ρ_{kL} – коефіцієнт (нормований) кореляції даних величин.

У показнику виразу (9) позитивна певна квадратична форма, яка повністю визначається матрицею

$$\begin{pmatrix} -\sigma_\eta^2 & -\sigma_\eta^2 \rho_\eta(m,p) & -j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}^{(0)} & j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) \\ -\sigma_\eta^2 \rho_\eta(m,p) & -\sigma_\eta^2 & -j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) & j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) \\ -j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}^{(0)} & -j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) & \sigma_\varphi^2 & -\sigma_\eta^2 \rho_\varphi(m,p) \\ j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) & j\sigma_\eta \sigma_\varphi \rho_{\eta\varphi}(m,p) & -\sigma_\eta^2 \rho_\varphi(m,p) & \sigma_\varphi^2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Величина $\rho_{\eta\varphi}^{(0)}$ в загальному випадку не дорівнює 1.

Приймаючи незалежність флюктуацій фази (флюктуації фази характерні тільки для взаємкореляційної функції) і потужності (оскільки вони обумовлені різними механізмами походження) і враховуючи (11) та (12), вираз (3) можна записати у вигляді

$$m_1\{\psi^2(z)\} = \exp\left\{2\bar{\eta} + \sigma_{\eta}^2 - \sigma_{\varphi}^2\right\} \sum_{m,p=-n}^n \bar{g}_m \bar{g}_p \exp\left\{\sigma_{\eta}^2 \rho_{\eta}(x_m - x_p) + \sigma_{\varphi}^2 \rho_{\varphi}(x_m - x_p)\right\} \exp\{jz(x_m - x_p)\} \quad (13)$$

При розкладанні експоненти, що містять параметри флюктуацій в ряд отримаємо

$$\begin{aligned} m_1\{\psi^2(\theta)\} = & \exp\left\{2\bar{\eta} + \sigma_{\eta}^2 - \sigma_{\varphi}^2\right\} \left[\sum_{m,p=-n}^n \bar{g}_m \bar{g}_p \exp\{jz(x_m - x_p)\} + \right. \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sigma_{\eta}^{2k}}{k!} \sum_{m,p=-n}^n \rho_{\eta}^k(x_m - x_p) \exp\{jz(x_m - x_p)\} + \\ & + \sum_{L=1}^{\infty} \frac{\sigma_{\varphi}^{2L}}{L!} \sum_{m,p=-n}^n \rho_{\varphi}^L(x_m - x_p) \exp\{jz(x_m - x_p)\} + \\ & \left. + \sum_{k,L=1}^{\infty} \sum_{m,p=-n}^n \frac{\sigma_{\eta}^{2k} \sigma_{\varphi}^{2L}}{k! L!} \times \sum_{m,p=-n}^n \rho_{\eta}^k(x_m - x_p) \rho_{\varphi}^L(x_m - x_p) \exp\{jz(x_m - x_p)\} \right]. \quad (14) \end{aligned}$$

Отриманий вираз є загальним і дозволяє досліджувати середній за потужністю множник системи, що визначає РДН, у функції узагальненої кутової координати z при довільній (задається для аналізу) статистиці флюктуацій енергетичного спектру сигналу.

Проведемо аналіз виразу (14). Перший співмножник є масштабним коефіцієнтом, який позначимо через $M(\bar{\eta}, \sigma_{\eta}, \sigma_{\varphi})$,

$$M(\bar{\eta}, \sigma_{\eta}, \sigma_{\varphi}) = \exp\left\{2\bar{\eta} + \sigma_{\eta}^2 - \sigma_{\varphi}^2\right\}. \quad (15)$$

Перший член у квадратних дужках виразу (14) являє собою функцію множника системи при відсутності флюктуацій (дефектів спектру сигналу). Решта членів розкладання в квадратних дужках характеризують спотворення форми множника системи (відносно середнього) за рахунок нестабільностей енергетичного спектра перешкоди.

Таким чином, у відповідності з поставленим завданням, отримано вираз для множника системи (нормованої РДН), проведений аналіз спотворень множника в залежності від заданих статистичних характеристик реальних спектрів, не враховуючи при цьому аргументу взаємного спектра за рахунок неідентичності фазо-частотних характеристик тракту прийому.

Враховуючи, що кількісний аналіз множника у вигляді (14) є громіздким, доцільно дискретну систему подання (отриману розкладанням в ряд Фур'є) представити безперервною функцією

$$\lim_{\substack{k \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \sum_{m,p=-n}^n \rho^k(x_m - x_p) \exp\{jx(x_m - x_p)\} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho^k(x_1 - x_2) e^{jx(x_1 - x_2)} dx_1 dx_2. \quad (16)$$

Таке подання дозволяє скористатися для кількісного аналізу табульованими інтегральними функціями, отриманими в [4].

З врахуванням (16) вираз середнього по потужності множника системи при $\sigma_{\varphi}^2 = 0$ набуде вигляду

$$m_1\{\psi^2(\theta)\} = M(\bar{\eta}, \sigma_{\eta}^2) \left[\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \bar{g}(x_1) \bar{g}(x_2) e^{jz(x_2 - x_1)} dx_1 dx_2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sigma_{\eta}^{2k}}{k!} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \bar{g}(x_1) \bar{g}(x_2) \rho_{\eta}^k(x_1 - x_2) e^{jz(x_1 - x_2)} dx_1 dx_2 \right]. \quad (17)$$

Приймаючи регулярну складову спектру прямокутною ($\bar{g}(x) = g_0$) та з метою нормування $g_0 = 1/2$, отримаємо

$$m_1\{\psi^2(\theta)\} = M(\bar{\eta}, \sigma_{\eta}^2) \left\{ \left(\frac{\sin z}{z} \right)^2 + \frac{1}{\eta} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sigma_{\eta}^2}{k} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho_{\eta}^k(x_1 - x_2) e^{jz(x_1 - x_2)} dx_1 dx_2 \right\}. \quad (18)$$

Функцію $\rho_{\eta}(x)$ прийемо гаусової форми (найбільш вживаною), тоді

$$\rho_{\eta}(x) = e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^2},$$

де x_0 – радіус кореляції в відносних одиницях.

При цьому вираз (18) визначається через табульовані функції $I_{\Gamma}(\rho_{\eta}, -z, z)$:

$$m_1\{\psi^2(\theta)\} = M(\bar{\eta}, \delta_{\eta}^2) \left\{ \left(\frac{\sin z}{z} \right)^2 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\delta_{\eta}^2}{k!} I_{\Gamma}(\rho_{\eta k}, -z, z) \right\}, \quad (19)$$

$$\text{де } I_{\Gamma}(\rho_{\eta k}, -z, z) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 e^{-k(x_1 - x_2)^2 / x_0^2 + jz(x_1 - x_2)} dx_1 dx_2. \quad (20)$$

Вираз (19) з врахуванням табличного інтеграла (20) є аналітичним виразом множника системи обробки, який дозволяє провести аналіз РДН для заданих параметрів енергетичного спектру випромінюваного сигналу з нерівномірним широкосмуговим спектром, що мають, крім регулярної, флюктуаційну складову.

На рис. 1 наведені залежності середнього нормованого по потужності множника системи (нормованої РДН) при апроксимації регулярної складової спектру прямокутною формою і декількох значеннях (зазначених на рис. 1) параметрів флюктуацій спектра. Залежності охоплюють області перших трьох бічних пелюсток функції $(\sin x / x)^2$.

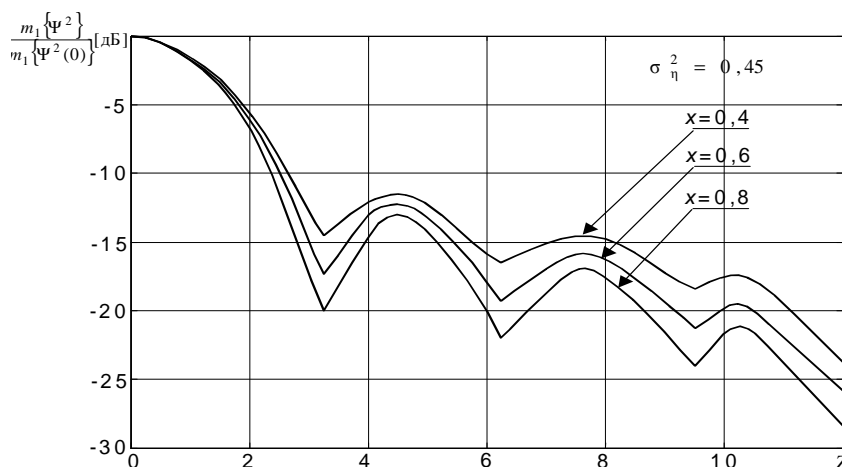


Рис. 1

Висновок. З аналізу рис. 1 випливає, що наявність флюктуацій енергетичного спектру сигналу призводить до згладжування огинаючої вихідного сигналу корелятора, ступінь якого залежить від дисперсії флюктуацій. Ефект згладжування при оцінці якості придушення бічного прийому призводить до деякого зниження коефіцієнту придушення бокових пелюстків.

1. Малышкин Е.А. Пассивная радиолокация. – М. Воениздат. 1961г. – 70 с. 2. Николаев А.Г. Перцов С.В. Радиотеплокация (пассивная радиолокация). Под ред. А.А. Красовского. – М.: Сов.радио, 1964 – 335с. 3. Зимин Г. В. Справочник с противовоздушной обороны. – М.: Воениздат, 1987 – 314 с. 4. А.Б.Сергиенко. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003.

Надійшла до редколегії 11.12.12