

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ШИРИНИ СПЕКТРУ ВУЗЬКОСМУГОВОГО ІМПУЛЬСНОГО СИГНАЛУ В УМОВАХ НЕЛІНІЙНОЇ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

В статті досліджується питання трансформування функції спектральної щільності імпульсного радіолокаційного сигналу в умовах частотної модуляції носійної гармонійним коливанням з малими значеннями коефіцієнта глибини модуляції. Отримано ряд аналітичних виразів залежності функції спектральної щільності від коефіцієнта глибини модуляції, при гармонійній (полігармонійній) модулюючій функції, дослідження яких показало, що навіть за незначної частотної модуляції вибір смуги пропускання приймача має здійснюватися з інших міркувань. Отримані результати дають змогу встановити критичну межу доцільності застосування узгодженої обробки таких сигналів в приймачі.

Ключові слова: радіолокаційний сигнал, імпульс, модуляція, гармонійний, полігармонійний, виявлення, спектр, смуга пропускання.

O.M. SHINCARUK, I.I. CHESANOVSKYY,

National Academy of State Borderguard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi

L.V. KARPOVA

Khmelnytsky National University

RESEARCH ON EFFECTIVE SPECTRUM WIDTH OF THE NARROW-BAND PULSE SIGNAL IN A NON-LINEAR FREQUENCY MODULATION

The article investigates the transformation function of the spectral density of the pulsed radar signal in terms of frequency carrier modulation harmonic oscillations with small values of the coefficient of modulation depth. Obtained some analytical expressions of the dependence of the spectral density function of ratio modulation depth at harmonic (polarmarine) of the modulating function the research of which it is shown that even with a slight frequency modulation, the choice of the bandwidth of the receiver must be carried out for other reasons. The obtained results enable to determine the critical line the feasibility of using coherent processing of such signals in the receiver.

Keywords: radar signal, pulse, modulation, harmonic, polarmarine, identification, spectrum, bandwidth.

Наявність нелінійної частотної модуляції в імпульсних радіолокаційних сигналах [1, 2] відкриває нові перспективи побудови високоефективних алгоритмів прийому та розрізнення, при цьому, вимагає принципово іншого підходу при виборі ширини смуги пропускання приймача. З однієї сторони, розширення спектру, за рахунок частотної модуляції, є недостатнім для того, щоб розглядати зондуючий сигнал як широкосмуговий, з відповідними підходами, щодо «організації» преселектора, з іншої сторони її неврахування може призвести до серйозних наслідків, аж до втрати стійкості прийому через «особливий» збіг параметрів паразитної модуляції і параметрів смуги пропускання. Цим випадком, є частотна модуляція сигналу гармонійним коливанням, що при незначній глибині модуляції (1.3) може кординально трансформувати спектральну щільність в смугі основної пелюстки, відносно якої налаштовується приймач.

Відомо, що при розрахунку оптимальної смуги пропускання (СП) приймального тракту в імпульсних радіолокаційних системах (РЛС), зазвичай припускається, що носійне коливання має постійну частоту протягом тривалості всього імпульсу. Очевидно, що в такому випадку, спектр сигналу повністю визначається амплітудною обвідною і ширина СП приймального тракту розраховується виключно із тривалості імпульсу, з певними варіаціями як в сторону звуження (урахування різних згладжуючих ефектів), так і в сторону розширення (урахування нестабільності генератора, розмиття спектру фронтів імпульсу, тощо) з метою забезпечення найвищої ефективності процесу виявлення сигналів. Якщо ж частота носійного коливання за тривалість імпульсу змінюється не лінійно, то спектр радіосигналу визначається характером цієї зміни і як показують дослідження [1,2], саме характер цієї зміни є визначальним при трактуванні сигналу з позиції широкосмуговості для побудови узгодженого алгоритму.

Практичне значення запропонованого дослідження обумовлена необхідністю перегляду фундаментальних положень теорії узгодженої фільтрації з огляду на останні досягнення в галузі цифрової обробки сигналів.

Відомо, що будь-який імпульсний сигнал можна представити у вигляді інтегралу Фур'є:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

де $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$ – спектральна щільність сигналу.

Розглянемо випадок, коли частота носійного коливання в середині імпульсу змінюється за гармонійним законом (присутні пульсації на вершині імпульсу)

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{d(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \phi) + \phi_0)}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega t + \phi), \quad (2)$$

де $\Delta\omega$ – девіація частоти; Ω – частота модулюючої по частоті складової; ϕ, ϕ_0 – початкові фази модулюючого та носійного коливання відповідно.

Спектральна щільність сигналу з такою повною фазою може бути визначена із формули [2, 3]

$$S(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \int_0^{\tau} U(t) \sin((\omega_0 + n\Omega)t + n\phi) e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

де $J_n(m)$ – функція Бесселя n -го порядку аргументу m ; m – індекс частотної модуляції; τ – тривалість імпульсу. Враховуючи, що $\omega_0 \gg 2\pi/\tau$, а за рахунок вузькосмуговості сигналу ω одного порядку ω_0 отримуємо вираз

$$S(\omega) = \frac{1}{2j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) e^{jn\phi} \int_0^{\tau} U(t) e^{-j(\omega - (\omega_0 + n\Omega))t} dt, \quad (4)$$

в якому спектральна щільність сигналу визначається як сума спектральних щільностей імпульсів з обвідними $U(t)$. Відповідно отриманого виразу, амплітуди складових кожного із часткових спектрів множаться на функції Бесселя відповідного прядку, а фази складових кожного спектру отримують додатковий зсув $n\phi$. Для випадку, коли амплітудна модуляція відсутня

$$U(t) = \begin{cases} a = \text{const}, & 0 \leq t \leq \tau; \\ 0, & t < 0, t > \tau, \end{cases}$$

інтегрування у виразі (4) дає результат

$$S(\omega) = \frac{a\tau}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) e^{jn\phi} \frac{\sin\left((\omega - (\omega_0 + n\Omega))\frac{\tau}{2}\right)}{(\omega - (\omega_0 + n\Omega))\frac{\tau}{2}}. \quad (5)$$

Отриманий вираз дає змогу в повній мірі оцінити вплив частотних «коливань» носійної на спектральні характеристики радіолокаційного сигналу. На рис. 1 приведено результати моделювання даного виразу для наступних вихідних умов: $f_0 = 9 \cdot 10^9$ Гц, $\Delta f = 1 \cdot 10^6$ Гц, $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$ с, $a = 1$ В.

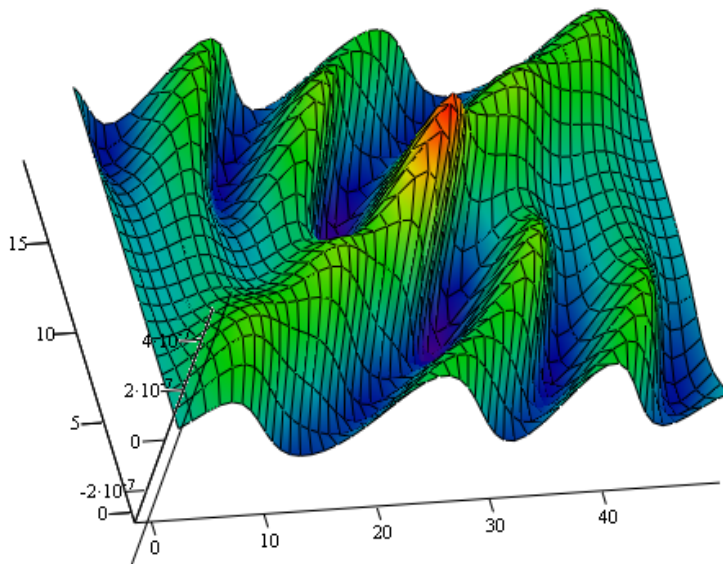


Рис. 1. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу при наявності частотної пульсації носійної з різною глибиною

Як видно з рис. 1, при незначній гармонійній зміні частоти носійного коливання, що відповідає значенням коефіцієнта модуляції на рівні від 1 до 3, спектральна щільність радіолокаційного сигналу набуває достатньо серйозних трансформацій. А це може призвести до того, що в смугу пропускання приймача потрапить лише частина енергії сигналу, яка при певних (особливих) значеннях коефіцієнта глибини частотної модуляції може бути дуже малою. На рис. 2 та рис. 3 приведено спектральні щільності сигналу в різних перерізах значень коефіцієнта глибини модуляції.

Як видно з рис. 2, вже при невеликому значенні коефіцієнта глибини модуляції ($m=1.6$) в центрі основної пелюстки спектральної щільності з'являється впадина, а сама пелюстка зміщується відносно свого центру. При подальшому збільшенні

коефіцієнта глибини модуляції (рис. 3) спостерігається ще більше (майже критичне) трансформування основної пелюстки, що з огляду обмеженість смуги пропускання приймача може призвести до втрати стійкості прийому.

Достатньо типовим є випадок частотної модуляції вузько смуговим полігармонійним сигналом, що притаманно багатьом імпульсним генераторам НВЧ. Для визначення та дослідження спектральної щільності радіосигналу, що містить таку модуляцію, розглянемо випадок двочастотної модуляції носійної, при чому кратно частотної модуляції, щоб в подальшому розширити отриманий результат на довільні полігармонійні, вузькосмугові модулюючі сигнали.

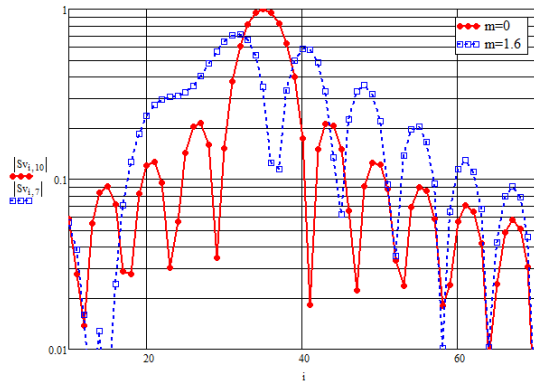


Рис. 2. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу в перерізі різної глибини частотної модуляції

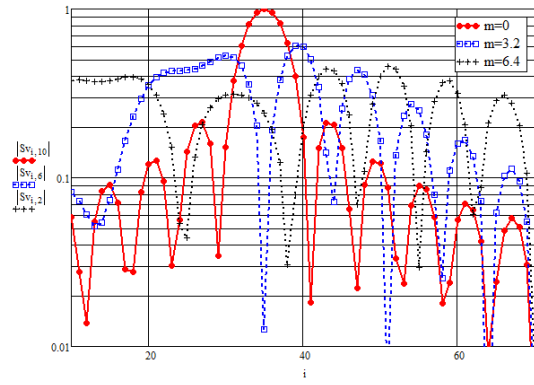


Рис. 3. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу в перерізі різної глибини частотної модуляції

У випадку двочастотної модуляції, миттєва частота може бути записана у вигляді

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_1 \cos(\Omega_1 t + \phi_1) + \Delta\omega_2 \cos(\Omega_2 t + \phi_2), \quad (6)$$

де $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2$ – девіація частоти першої і другої гармоніки відповідно; Ω_1, Ω_2 – частота першої і другої гармоніки відповідно, при цьому $\Omega_2 = k \Omega_1$, де k – будь-яке ціле число.

Спектральна щільність імпульсного радіосигналу з такою частотною модуляцією може бути визначена з виразу

$$S(\omega) = \int_0^\tau U(t) \sin((\omega_0 t + m_1 \sin(\Omega_1 t + \phi_1) + m_2 \sin(\Omega_2 t + \phi_2))) e^{-j\omega t} dt. \quad (7)$$

В результаті вирішення інтегралу в (7) для випадку прямокутного імпульсу з амплітудою a , отримується

$$S(\omega) = \frac{a\tau}{2j} e^{j(\omega - \omega_0)\tau/2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j(m\phi_1 + n\phi_2 - (m+kn)\pi)} \times \frac{\sin\left[\left(\omega - (\omega_0 + (m+kn)\Omega)\right) - \frac{\tau}{2}\right]}{\left[\left(\omega - (\omega_0 + (m+kn)\Omega)\right) - \frac{\tau}{2}\right]} \times J_m(m_1) J_n(m_2). \quad (8)$$

Як і в попередньому випадку, отриманий вираз дає змогу в повній мірі оцінити вплив частотної модуляції носійної сумою двократно частотних гармонік на спектральні характеристики радіолокаційного сигналу.

На рис.1 приведено результати моделювання даного виразу для наступних вихідних умов:
 $f_0 = 9 \cdot 10^9$ Гц,
 $\Omega_1 = 1 \cdot 10^6$ Гц, $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$ с,
 $a = 1$ В, $k = 2$.

Як видно з рисунку, при незначній гармонійній зміні частоти носійного коливання, що відповідає значенням коефіцієнта модуляції вже на рівні від 0 до 2.5, спектральна щільність радіолокаційного сигналу набуває значно більших трансформацій ніж в попередньому випадку при тих самих значеннях коефіцієнта глибини модуляції. А це означає, що вибір смуги пропускання приймача та

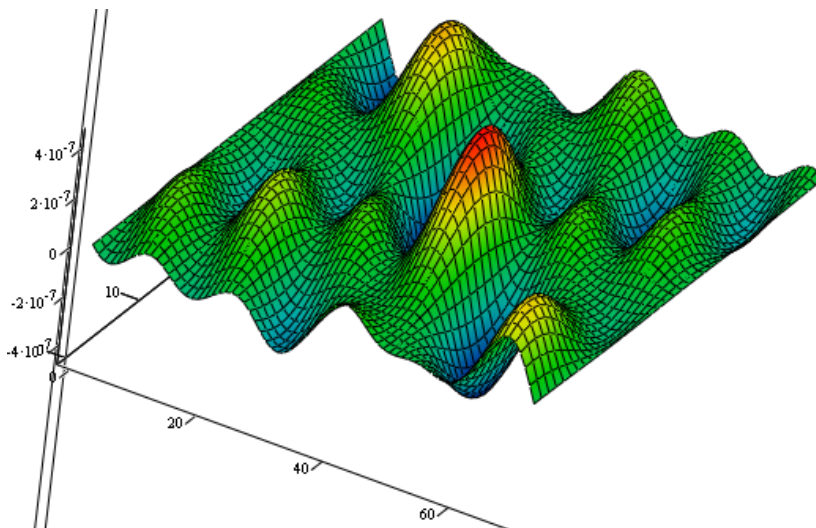


Рис. 4. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу при наявності частотної пульсації носійної з різною глибиною

передавальної характеристики тракту попередньої селекції мають здійснюватися з урахуванням можливого значення коефіцієнта глибини модуляції. На рис. 5 та рис. 6 наведено спектральні щільності сигналу в різних перерізах значень коефіцієнта глибини модуляції.

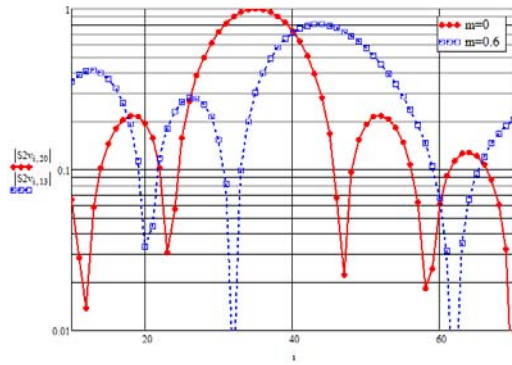


Рис. 5. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу в перерізі різної глибини частотної модуляції

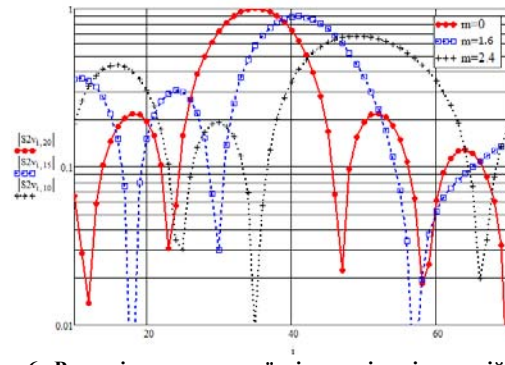


Рис. 6. Розподіл спектральної щільності радіолокаційного сигналу в перерізі різної глибини частотної модуляції

Як видно з рис. 5, вже при значенні коефіцієнта глибини модуляції $m=0.6$ в основній пелюстці спектральної щільності залишається близько 50 % енергії, що є неприйнятним для прийому таких сигналів. При подальшому збільшенні коефіцієнта глибини модуляції (рис. 6) до значення $m=2.4$ смуга пропускання приймача «захоплює» мінімум спектральної щільності сигналу.

Таким чином, при конструюванні прийомо-передавачів імпульсних радіолокаційних систем, критично важливо враховувати дію різних негативних явищ, що проявляються при формуванні радіолокаційних сигналів, особливо, якщо вони проявляються у вигляді паразитної кутової модуляції. Менш критичною, є ситуація, коли паразитна кутова модуляція відбувається за лінійним законом (електронне зміщення частоти при спаді плоскої вершини імпульсу), оскільки вона призводить лише до розширення спектральної щільності сигналу і її легко компенсувати. Проте, зовсім іншою є ситуація, що розглянута в даному дослідженні – коли частотна модуляція здійснюється за гармонійним (синусоїдальним) законом. В цьому випадку, навіть при незначній глибині модуляції, відбувається значна трансформація спектральної щільності, особливо якщо гармонійна складова не одна. Виходячи з цього, стає очевидним, що компенсувати таку зміну функції спектральної щільності простими засобами не можливо. В таких випадках необхідно застосовувати більш складні підходи узгодженої обробки.

Література

1. Вамберский М.В. Передающие устройства СВЧ : учебное пособие для радиотехнических спец. вузов / Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А. ; под ред. М.В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.
2. Вакман Д.Е. Асимптотические методы в линейной радиотехнике / Вакман Д.Е. – М. : Сов. Радио, 1962. – 247 с.
3. Бычков С.И. Спектры одиночных радиоимпульсов при изменении несущей частоты / Бычков С.И. // Радиотехника. – 1950. – № 1. – С. 42–54.

Рецензія/Peer review : 20.2.2016 р.

Надрукована/Printed : 19.4.2016 р.

Рецензент : д.т.н., професор В.В. Мартинюк