

Рис. 4. Структурна схема стробоскопічного перетворювача з петлею фазової автопідстроївки частоти

При цьому пошук закінчується, а вихідна напруга фазового детектора доводить частоту генератора імпульсів до значення, при якому проміжна частота дорівнює частоті кварцового генератора і настає режим синхронізації. Фазовий зсув між вхідними напругами виявляється перенесеним на проміжну частоту, що можна бачити на четвертій та п'ятій діаграмах рис. 3. У моменти часу, позначені точками 3, 6, 9 на першій і другій діаграмах, видно зсув вхідних напруг, що дорівнює 90° . Такий же фазовий зсув мають огинаючі імпульси стробоскопічного ключа на четвертій і п'ятій часових діаграмах. Фазовий зсув на проміжній частоті вимірюється вимірювачами різниці фаз тригерного типу [3].

Висновки

Таким чином, стробоскопічний перетворювач частоти дозволяє розширити частотний діапазон роботи фазових детекторів радіоелектронних систем. При цьому забезпечується зменшення похибок перетворення у порівнянні з класичними схемами на основі змішувачів частоти. Зменшується також зона невизначеності фазового детектора за рахунок вимірювання фазового зсуву на низькій проміжній частоті. Після стробоскопічного ключа сигнал стає дискретним, що полегшує його обробку за допомогою ЕОМ. Ефективність, швидкість і точність роботи такого перетворювача залежить від програмної обробки результатів вимірювання миттєвих значень сигналу.

Література

1. Чмых М. К. Цифровая фазометрия / Чмых М. К. – М. : Радио и связь, 1993. – 184 с.
2. Галахова О. П. Основы фазометрии / О. П. Галахова, Е. Д. Колтик, С. А. Кравченко. – Л. : Энергия, 1976. – 256 с.
3. Пятін С. І. Вимірювання різниці фаз : [методичні вказівки] / С. І. Пятін, І. С. Пятін. – Хмельницький : ХТІ, 1993. – 24 с.
4. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 1108 с.

Надійшла 17.1.2011 р.

УДК 621.396.96

О.М. ШИНКАРУК, Л.В. КАРПОВА, В.М. ШВАЧІЙ
Хмельницький національний університет

ОБРОБКА ІМПУЛЬСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ

В статті досліджується питання трансформування кореляційних властивостей радіолокаційних сигналів при урахуванні недетермінованих в періоді зондування амплітудних та кутових складових. Дослідження отриманих аналітичних виразів функцій невизначеності сигналів з випадковими складовими в комплексній обвідній показало, що при оцінці їх кореляційних властивостей при прийомі відкриваються нові потенційні можливості, щодо розрізнення ехо-сигналів від групових цілей.

The article describes research issues transforming the correlation properties of radar signals at accounting period in nondeterministic sensing and relay components. Investigation of the analytical expression of uncertainty functions of signals with random components in the complex bypass showed that in assessing the correlation properties at a reception open up new potential opportunities for distinction echo of group goals.

Ключові слова: радіолокаційні засоби, ехо-сигнал, функція невизначеності, модуляція, кореляційна обробка.

Вступ

При реалізації методів активної радіолокації, основним і єдиним носієм інформації про наявність і

параметри цілей в зоні огляду є зондуючі сигнали, при цьому саме їх властивості, в першу чергу, визначають основні характеристики радіолокаційних засобів в цілому [1, 2]. З цієї причини, основні зусилля інженерів при розробці радіолокаційних засобів були спрямовані на пошук зондуючих сигналів з оптимальними характеристиками [3, 4]. В першу чергу, намагались оптимізувати кореляційні властивості сигналів, оскільки пропорційною їм є ефективність узгоджених (оптимальних) методів їх обробки. При ускладненні зондуючих сигналів, значно підвищувались вимоги до передавачів, оскільки неточність у відтворенні складних сигналів, значно сильніше знижує ефективність алгоритмів обробки ніж при використанні простих зондуючих імпульсів. Проте, незважаючи на те, що в сучасній радіолокації існує жорстке правило, відповідно якого ступінь розрізнення ехо-сигналу не може перевищувати ступінь розрізнення зондуючого [3], в ряді робіт показано, що існування різних дестабілізуючих факторів при формуванні зондуючих сигналів призводить до появи в них певних позитивних властивостей. Не зважаючи на те, що в межах періоду зондування вони є за природою не детермінованими, кореляція ехо-сигналів значно відрізняється від кореляції зондуючих, а це відкриває потенційні можливості підвищення ряду характеристик радіолокаційних засобів активного та напівактивного типу.

Ехо-сигнал по відношенню до зондуючого трансформується в декілька етапів (рис. 1). По-перше, ще при формуванні, в результаті дії ряду дестабілізуючих факторів, реальна форма сигналу з певною похибкою повторює задану, по-друге, при відбитті від поверхні цілі, за певних умов в сигнал можуть вноситись значні як амплітудні, так і кутові спотворення.

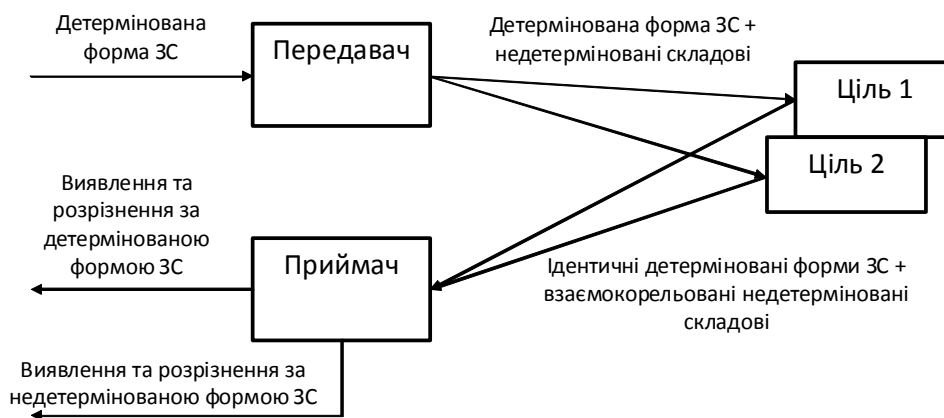


Рис. 1. Схема формування та реалізації детермінованих і недетермінованих складових радіолокаційних сигналів.

Математична модель зондуючого радіосигналу в загальному випадку може бути представлена виразом:

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0),$$

де $U(t)$ – амплітудна модулююча складова; $\varphi(t)$ – кутова модулююча складова; φ_0 – початкова фаза несучого колювання; ω_0 – частота несучого колювання.

Ця модель містить дві модулюючі складові – модулюючий сигнал по амплітуді і модулюючий сигнал за фазою або частотою, які в сукупності і визначають можливості ехо-сигналів по розрізненню. Проте, у випадку імпульсної радіолокації, коли в якості зондуючих сигналів використовуються радіоімпульси короткої тривалості з прямокутною обвідною і без внутрішньої кутової модуляції,

$$\varphi(t) = 0, U(t) = \begin{cases} U_0, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases}$$

форма комплексної обвідної, а відповідно і кореляційні властивості сигналу визначаються виключно параметрами модулюючого імпульсу $U(t)$

$$\dot{U} = \begin{cases} U_0 e^{j\varphi_0}, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases}$$

під форму якого в результаті розробляється і сам алгоритм обробки в приймачі.

Якщо врахувати дію дестабілізуючих факторів у передавачі при формуванні зондуючих сигналів, математична модель зондуючого сигналу містить ряд флуктуаційних амплітудних і кутових складових, які діють на сигнал як адитивно, так і мультиплікативно. При цьому модель сигналу можна записати у вигляді:

$$u(t) = U'(t) \cos(\omega_0 t + \varphi'(t) + \varphi_0),$$

$$U'(t) = n(t) + U(t)(1 + \xi(t)),$$

де $n(t)$ і $\xi(t)$ – відповідно адитивна і мультиплікативна амплітудні складові сигналу; $\varphi'(t)$ – флуктуаційна кутова складова.

Результати досліджень

Враховуючи алгоритми роботи імпульсних радіолокаційних засобів (наявність антенного

перемикача), і некорельованість адитивної складової (білого шуму) в амплітудно-модулюючій суміші, нею можна знехтувати. Отже, модель зондуючого радіолокаційного сигналу може бути представлена у вигляді

$$u(t) = \begin{cases} U(t)(1 + \xi(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi'(t) + \varphi_0), & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i. \end{cases}$$

Потенційні можливості такої моделі сигналу щодо розрізнення можна оцінити шляхом виведення та дослідження кореляційної функції комплексної обвідної, модуль якої в двовимірній інтерпретації називається функцією невизначеності. Комплексна обвідна моделі сигналу з урахуванням недетермінованих складових, має також недетерміновану форму, оскільки окрім закладених модуляційних складових, сигнал містить і випадкові. Вираз для комплексної обвідної такої моделі сигналу має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U'(t)\xi(t)e^{j\varphi'(t)}e^{j\varphi_0}, \\ \dot{U} &= \begin{cases} U_0(1 + \xi(t))e^{j\varphi_0}e^{j\varphi(t)}, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Враховуючи різні можливі варіації законів розподілу $\xi(t)$, $\varphi'(t)$ та велику множину значень їх параметрів, розглянемо найпритаманніші імпульсним радіолокаційним системам випадки. Враховуючи конструктивні та функціональні особливості передавачів імпульсних радіолокаційних станцій, при модуляції НВЧ коливань, форма амплітудної обвідної може бути у вигляді прямокутного імпульсу

$$\xi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases} \quad (2)$$

або гаусівського

$$\xi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_u}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_u^2}\right) \quad (3)$$

При цьому кутова модуляція через нестабільність вузлів передавача може бути у вигляді лінійної частотної модуляції

$$\varphi(t) = bt^2, \quad (4)$$

параболічної частотної модуляції

$$\varphi(t) = ct^3, \quad (5)$$

або без неї

$$\varphi(t) = 0. \quad (6)$$

За своїм визначенням, функція невизначеності сигналу представляє собою модуль кореляційної функції його комплексної обвідної [1].

$$\chi(\tau, \Omega) = \left| \frac{1}{2 \cdot E} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U^*(t) \cdot U(t - \tau) \exp(j2\pi\Omega t) dt \right|,$$

де E – повна енергія сигналу; Ω – зміщення сигналу по вісі частот; τ – зміщення сигналу по вісі часу.

Далі в роботі розглядається нормована функція невизначеності, що є відношенням поточного значення за координатами τ , Ω до максимального і визначається з виразу

$$\chi(\tau, \Omega) = \frac{\left| \frac{1}{2 \cdot E} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U^*(t) \cdot U(t - \tau) \exp(j2\pi\Omega t) dt \right|}{\chi(0, 0)}. \quad (7)$$

Отже вирази функцій невизначеності для різних комбінацій флукуаційних складових, визначаються шляхом підстановки рівнянь (2), (4) – (6) в вираз (1) з подальшим вирішенням рівняння (7).

Отже, провівши підстановки та виконавши математичні перетворення отримано вирази для функцій невизначеності сигналів [3]:

- з прямокутною обвідною без частотної модуляції:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{\sin \pi\Omega(\tau_i - |\tau|)}{\pi\Omega(\tau_i - |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i, \\ \frac{\sin \pi\Omega(\tau_i - |\tau|)}{\pi\Omega(\tau_i - |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i, \end{cases} \quad (8)$$

- з прямокутною обвідною і лінійно-частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{\sin [b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)]}{b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i, \\ \frac{\sin [b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)]}{b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i, \\ 0, & \end{cases} \quad (9)$$

- з прямокутною обвідною і параболічною частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_i} \sqrt{\frac{\pi}{6c\tau}} [(C_1 + C_2) + (S_1 + S_2)^2]^{1/2}, & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i, \\ 0 & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i, \end{cases} \quad (10)$$

де

$$C_n = \int_0^{x_n} \cos(\pi y^2) dy, \quad S_n = \int_0^{x_n} \sin(\pi y^2) dy,$$

$$\left. \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} \right\} = -\left(\frac{\pi}{6c\tau}\right)^{1/2} \Omega \pm \frac{1}{2} \left(\frac{6c\tau}{\pi}\right)^{1/2} (\tau_i - |\tau|)$$

Проте, найбільш розповсюдженим для імпульсних радіолокаційних засобів є випадок, коли амплітудна обвідна радіоімпульсу має не прямокутну, а гаусівську форму. Вирази функцій невизначеності для різних комбінацій флуктуаційних складових визначаються також шляхом підстановки рівнянь, але (3) – (6) у вираз (1) з подальшим вирішенням рівняння (7).

Отже, провівши підстановки та виконавши математичні перетворення отримано вирази для функцій невизначеності сигналів [3]:

- з гаусівською обвідною без частотної модуляції:

$$\chi(\tau, \Omega) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2 \Omega^2 \sigma_u^2 \right)\right]; \quad (11)$$

- з гаусівською обвідною і лінійно-частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2 \Omega^2 \sigma_u^2 \left(\Omega + \frac{b\tau}{\pi} \right)^2 \right)\right]; \quad (12)$$

- з гаусівською обвідною і параболічною частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \left(\frac{1}{1 + (3c\sigma_u^2)^2 \tau^2} \right)^{1/4} \exp\left[-\left(\frac{\tau^2}{\sigma_u^2} + \frac{2\pi^2 \Omega^2}{\frac{1}{\sigma_u^2} - 9c^2 \tau^2} \right)\right]. \quad (13)$$

Якщо порівнювати вирази (9) – (13) з виразом (8) то є очевидним той факт, що урахування флуктуаційних складових як по амплітуді так і по частоті, функція невизначеності значно трансформується (рис. 2) – (рис. 5)

Враховуючи, що імпульси з прямокутною амплітудною обвідною та з монотонним частотним заповненням мають найгладкішу як за часом так і за частотою поверхню невизначеності, внесення будь-якої додаткової динамічної складової призводить до оптимізації (за шириною основної пелюстки) поверхні функції невизначеності і до покращення або погіршення за рівнем бокових пелюсток.

В реальних імпульсних радіолокаційних системах величина амплітудних та частотних флуктуацій зондуючих сигналів може сягати декількох відсотків [4], що при реалізації кореляційних методів обробки ехо-сигналів відкриває потенційні можливості збільшення характеристик виявлення. Крім того, як показує аналіз отриманих виразів функцій невизначеності, властивості зондуючих сигналів значно залежать не тільки від виду законів розподілу флуктуацій, але і від параметрів цих законів.

Перспективи подальших досліджень полягають у підвищенні роздільної здатності імпульсних радіолокаційних станцій з урахуванням випадкових недетермінованих модуляційних складових.

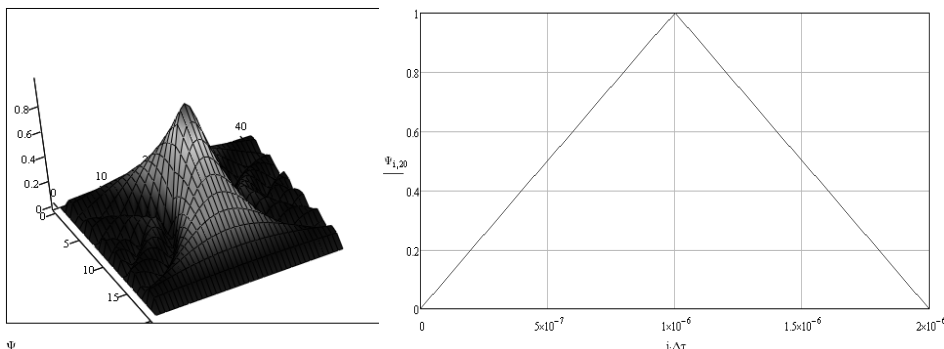


Рис. 2. Поверхня функції невизначеності прямокутного радіоімпульсу а) та її перетин площиною $\Omega = 0$ б)

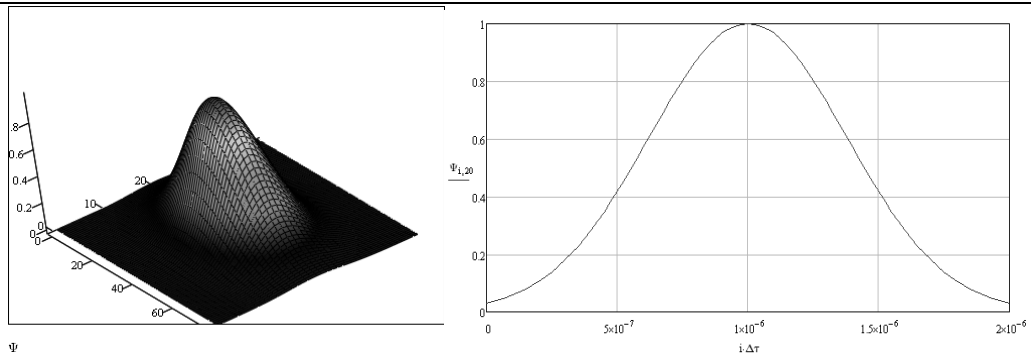


Рис. 3. Поверхня функції невизначеності гаусівського радіоімпульсу а)
та її перетин площиною $\Omega = 0$ б)

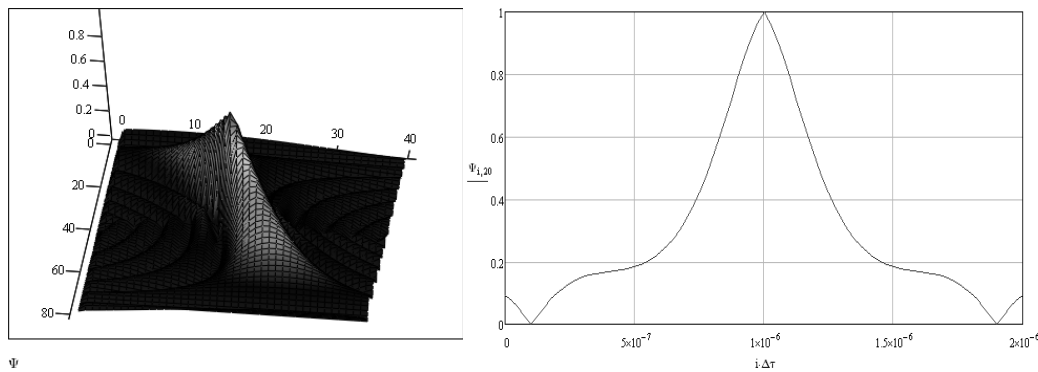


Рис. 4. Поверхня функції невизначеності прямокутного ЛЧМ-радіоімпульсу а)
та її перетин площиною $\Omega = 0$ б)

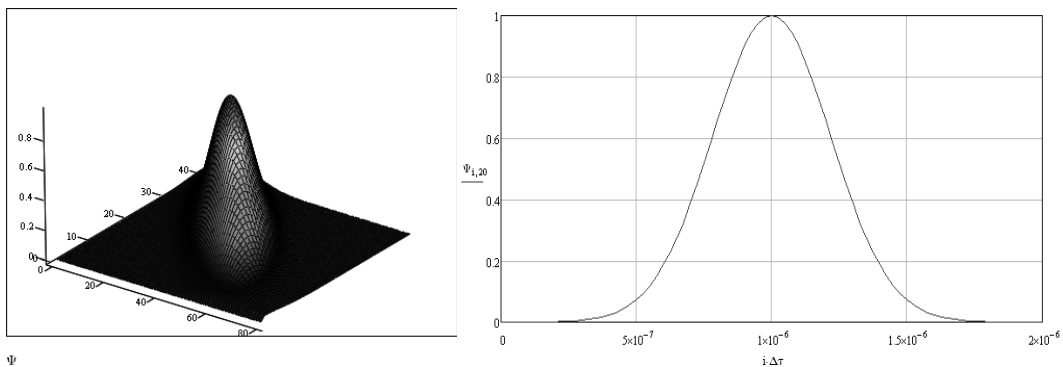


Рис. 5. Поверхня функції невизначеності гаусівського ЛЧМ-радіоімпульсу а)
та її перетин площиною $\Omega = 0$ б)

Література

1. Радиотехнические системы / [Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов, Ю.А. Коломенський]. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы : [учебник для вузов] / Гоноровский И.С. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Кук Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд ; [пер. с англ. ; под ред. В.С. Кельзона]. – М. : Советскорадио, 1971. – 568 с.
4. 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.

Надійшла 17.1.2011 р.