

УДК 621.396.96

**Андрій Васильович ІВАНОВ**,  
старший викладач кафедри зв'язку, автоматизації та захисту  
інформації Національної академії Державної прикордонної служби  
України імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький

## **ПІДВИЩЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІМПУЛЬСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ В КОМПЛЕКСНІЙ ОБВІДНІЙ**

*У статті досліджуються питання підвищення кореляційних властивостей радіолокаційних сигналів при урахуванні випадкових амплітудних та кутових модулюючих складових. Отримані аналітичні вирази функцій невизначеності моделей радіолокаційних сигналів з урахуванням детермінованих модуляційних складових випадкової форми в комплексній обвідній. Дослідження даних аналітичних виразів показало, що при урахуванні флуктуаційних складових при реалізації узгодженої обробки сигналів дає змогу отримати значний енергетичний виграв і підвищити потенційні можливості щодо розрізнення луна-сигналів від групових цілей.*

**Ключові слова:** радіолокаційні системи, імпульсна радіолокація, когерентність, узгоджена фільтрація, амплітудна модуляція, кутова модуляція, кореляційна обробка.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Реалізація імпульсних методів радіолокації передбачає значну обмеженість у показниках якості й ефективності функціонування радіолокацій-

© Іванов А. В.

них систем [1; 2]. Оскільки передбачається використання некогерентних методів прийому та обробки радіолокаційних сигналів, інформаційні показники радіолокаційної системи визначаються виключно енергетикою та тривалістю зондуючих радіосигналів. Це в простому випадку можна пояснити низкою загальновідомих співвідношень, що витікають із тривіальної за своєю суттю задачі імпульсної радіолокації. Проте основною причиною низької ефективності імпульсних методів радіолокації є застосування простих (без внутрішньої модуляції) радіолокаційних сигналів, в яких розширення частотного спектра призводить до значно більших енергетичних втрат, ніж у разі застосування складних радіолокаційних сигналів, через неможливість реалізації узгоджених алгоритмів обробки і, відповідно, забезпечення ефективного “збирання” частотно-розподіленої енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор.** Одним з ефективних показників потенційних можливостей виявлення та розрізнення сигналів для задач радіолокації є кореляційні властивості сигналу або, урахувавши вузькосмуговість імпульсних радіолокаційних сигналів, кореляційні властивості його комплексної обвідної [2]. Проведено багато наукових досліджень у даному напрямку, які показали, що розширення спектра імпульсних радіолокаційних сигналів шляхом скорочення їх тривалості через непропорційні енергетичні втрати є недоцільним. Це пов'язано, у першу чергу, з низькою фазовою та частотною стабільністю несучого коливання імпульсних радіолокаційних сигналів, що унеможливорює реалізацію узгоджених алгоритмів їх обробки. Проте особливості реалізації імпульсних методів радіолокації дають можливість дещо змінити підхід до побудови алгоритмів узгодженої обробки сигналів. Урахувавши, що імпульсні радіолокаційні системи є жорстко синхронізованими з розмежованими тактами випромінювання і прийому зондуючих сигналів, існує потенційна можливість оперативного узгодження приймача в кожному такті. Отже, розширення смуги частот зондуючого радіолокаційного сигналу може бути реалізо-

ване відповідним узгодженим алгоритмом незалежно від причини появи і її природи (штучної чи флуктуаційної). У цьому випадку кореляційні властивості сигналу, навіть повністю недетермінованого, будуть визначати ефективність радіолокаційної системи, оскільки система буде реалізована за когерентною схемою з відповідними можливостями [3; 4].

**Мета статті.** Для оцінки потенційного виграшу від реалізації даного підходу необхідно оцінити, яким чином змінюються кореляційні властивості радіолокаційного сигналу при урахуванні можливих типів та допустимої множини параметрів недетермінованих змін форми комплексної обвідної радіолокаційного сигналу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Математична модель зонduючого радіосигналу з урахуванням недетермінованої форми модуляційних складових у загальному випадку може бути подано у вигляді [3]:

$$u(t) = F(U(t), \xi_u(t)) \cos(\omega_0 t + G(\phi(t), \xi_\phi(t)) + \phi_0), \quad (1)$$

де  $U(t)$  – амплітудна модулююча складова;  $\phi(t)$  – кутова модулююча складова;  $\phi_0$  – початкова фаза несучого коливання;  $\omega_0$  – частота несучого коливання;  $\xi_u(t)$ ,  $\xi_\phi(t)$ ,  $F(\cdot)$ ,  $G(\cdot)$  – відповідно амплітудна, частотна недетерміновані складові та функціонали їх комбінування з детермінованими модуляційними складовими.

Дана модель містить дві модулюючі складові – за амплітудою і за фазою або частотою, які в сукупності і визначають кореляційні властивості зонduючих сигналів. У випадку імпульсної радіолокації як зонduючі сигнали використовуються радіоімпульси короткої тривалості з прямокутною обвідною і без внутрішньої кутової модуляції, а отже модуляційні складові мають вигляд:

$$\phi(t) = 0, U(t) = \begin{cases} U_0, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases} \quad (2)$$

а функціонали взаємодії недетермінованих складових зводяться до квадратурної комбінації з несучим коливанням. Комплексна обвідна

імпульсного зонduючого радіосигналу з урахуванням нульової початкової фази і одиничної, нормованої амплітуди, приймає вигляд:

$$\dot{U} = \xi_u(t)e^{j\xi_\phi(t)}. \quad (3)$$

Спектральна щільність такої моделі сигналу, а відповідно і ефективна смуга частот визначається не його тривалістю, а, у першу чергу, формою модуляційних складових

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi_u(t)e^{j\xi_\phi(t)} e^{-j\omega t} dt.$$

З урахуванням взаємозв'язку енергетичного спектра з кореляційною функцією кореляційні властивості зонduючого радіосигналу можуть бути оцінені як

$$B(\tau) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |U(\omega)| e^{j\omega\tau} d\omega.$$

Як нормовану оцінку відносного виграшу у випадку імпульсної радіолокації доцільно використати інтервал автокореляції, який, допускаючи абсолютну реалізацію узгодженого алгоритму, визначається як

$$\Delta\tau = \frac{1}{B(0)} \int_{-\tau_V}^{\tau_V} |B(\tau)| d\tau.$$

Виходячи із поставленої задачі, оцінка потенційного виграшу можлива при встановленні можливих форм і варіацій параметрів недетермінованих складових у комплексній обвідній радіолокаційного сигналу  $\xi_u(t)$ ,  $\xi_\phi(t)$ . Для цього було проведено низку експериментів з різними генераторами НВЧ і імітацією затягувань фронтів імпульсів через інертність імпульсних модуляторів (рис. 1).

Результати експериментальних досліджень були апроксимовані до аналітичних виразів, що наведені в таблиці.

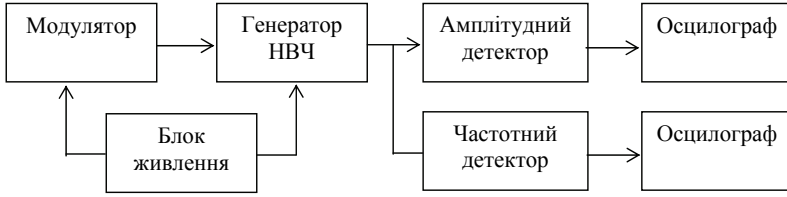


Рис. 1. Схема експериментальної установки

**Аналітичні вирази флукутаційних модуляційних складових сигналу**

Тип генератора	$\xi_o(k_1t)$	$\xi_\phi(k_2t)$	$k_1$	$k_2$
Ідеалізований	1	0	-	-
Магнетрон	$k_1 \exp(-\pi k_1^2 t^2)$	$k_2 t$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$	$-\beta t$
Стабілотрон	$k_1 \exp(-\pi k_1^2 t^2)$	$k_2 t$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$	$-(0.1...0.05)\beta t$
Підсилювач зі схрещеними полями	1	$k_2 t$	-	$\Delta\varphi_{\max} \sin(2\pi / \tau_i) / t$
Клістрон	$\exp(k_1 t)$	$k_2 t$	$(0.3...0.4)\tau_i$	$ct^2$
ЛБВ	$k_1 \exp(-\pi k_1^2 (t - 0.3\tau_i)^2)$	0	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$	-

Підставлення виразів із таблиці у вираз (3) дає змогу отримати аналітичний вираз для комплексної обвідної зондуєчого радіосигналу, сформованого будь-яким із перерахованих приладів.

Для генератора магнетронного типу комплексна обвідна визначається з виразу

$$\dot{U}(t) = k_1 \exp(-\pi k_1^2 t^2) \exp(j\beta t^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(-\frac{t^2}{2\sigma^2}) \exp(j\beta t^2);$$

кореляційна функція

$$B(\tau) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau^2}{2\pi\sigma^2} + \beta^2\tau^2\sigma^2 2\pi\right)\right].$$

Для передавача на основі клістрону комплексна обвідна визначається з виразу

$$\dot{U}(t) = \exp\left(\frac{T_i}{3}t\right) \exp(jct^3);$$

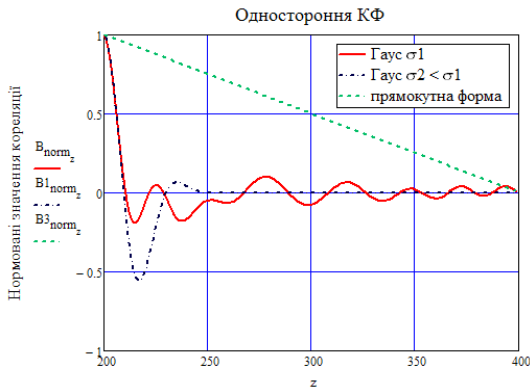
кореляційна функція

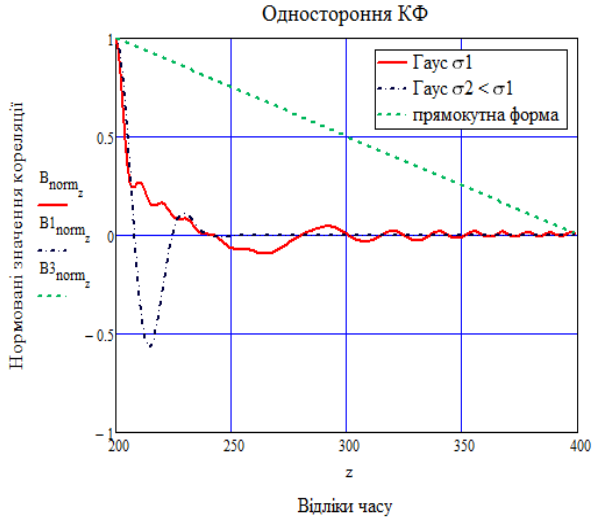
$$B(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2c\tau} [(C_1 + C_2)^2 + (S_1 + S_2)^2]},$$

де  $C_1, C_2, S_1, S_2$  – інтеграли Френеля по аргументах  $c\tau(\tau_i - |\tau|)$ , відповідно позитивних і від’ємних.

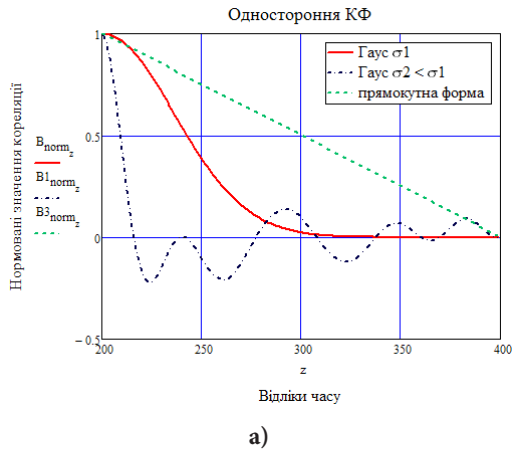
Проведене моделювання отриманих таким чином виразів показало, що в дійсності кореляційні властивості сигналів з такими комплексними обвідними залежать не тільки від розмаху флуктуацій, але і від їх комбінації.

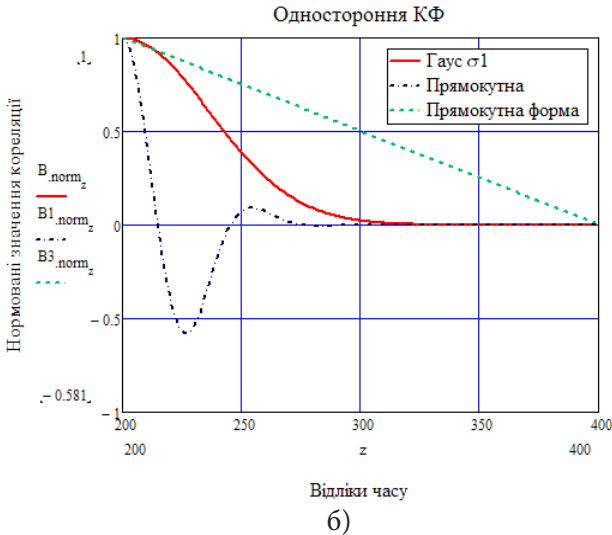
На рис. 2–3 приведено результати моделювання у вигляді односторонніх кореляційних функцій сигналів при різних розподілах і значеннях параметрів флуктуаційних складових на прикладі генератора магнетронного типу, в якого гаусівська амплітудна обвідна, обумовлена різними реактивностями, і лінійна частотна модуляція, обумовлена електронним зміщенням частоти через нерівномірність вершини модулюючого імпульсу.





**Рис. 2.** Однобічні кореляційні функції радіосигналів:  
 а – з гаусівською амплітудною модуляцією і монотонним частотним заповненням;  
 б – з гаусівською амплітудною модуляцією і ЛЧМ





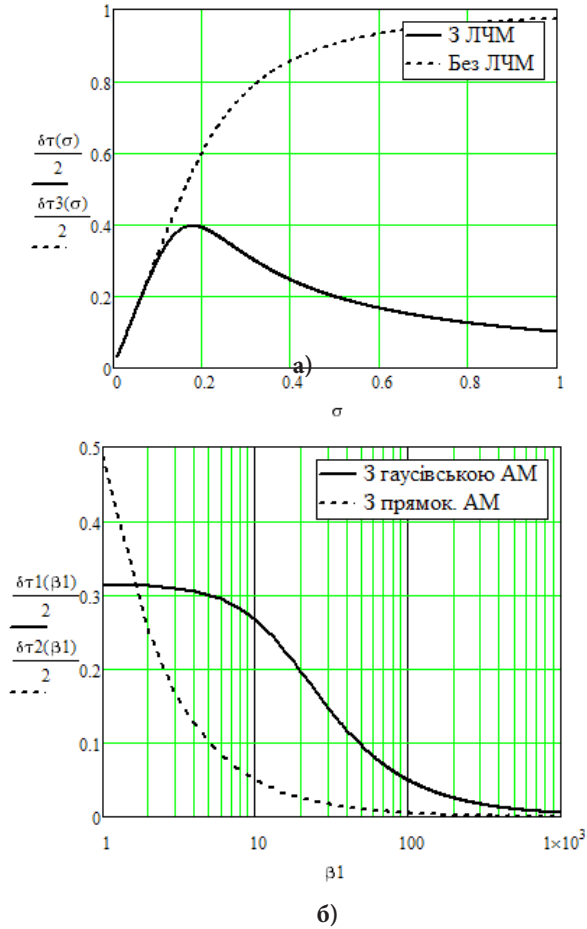
**Рис. 3.** Однобічна кореляційна функція комплексної обвідної радіосигналу: а – монотонне частотне заповнення та різних амплітудних – гаусівська і прямокутна; б – ЛЧМ і різних амплітудних – гаусівська і прямокутна

На рис. 4 приведено залежності інтервалу кореляції комплексної обвідної зонduючого радіосигналу від параметрів модуляційних складових. Як видно з графіків, наявність і урахування випадкової модуляції зонduючих сигналів призводить до значного зменшення значення інтервалу кореляції, а отже, потенційно радіолокаційний сигнал у разі застосування відповідного узгодженого алгоритму обробки, є більш інформативним.

**Висновки.** Аналіз отриманих залежностей показав, що нестабільність імпульсних генераторів надвисоких частот, яка в основному виникає внаслідок електронного зміщення частоти, є достатньо ефективною основою для побудови узгодженого алгоритму обробки низько-стабільних імпульсних радіолокаційних сигналів. Як видно із залежностей інтервалу кореляції (рис. 4), існують певні оптимальні й неоптимальні значення параметрів модуляційних складових, за яких спостерігаються екстремуми на графічних залежностях.



тях, що свідчить про необхідність вирішення оптимізаційної задачі при побудові узгодженого алгоритму.



**Рис. 4.** Залежність нормованого інтервалу кореляції від значень параметрів модуляційних складових: а – нормованого СКВ гаусівської АМ; б – нормованого коефіцієнта ЛЧМ

### Список використаної літератури

1. Передающие устройства СВЧ : учебное пособие для радиотехнических специальных вузов / М. В. Вамберский, В. И. Казанцев, С. А. Шелухин // под ред. М. В. Вамберского. – М. : Высшая школа, 1984. – 448 с.
2. Вопросы перспективной радиолокации : коллективная монография / под ред. А. В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
3. Чесановський І. І. Трансформування функції невизначеності радіосигналів з урахуванням внутрішньоімпульсної фазочастотної нестабільності / І. І. Чесановський // Зб. наук. праць Нац. акад. Держприкордонслужби України ім. Б. Хмельницького / за ред. В. О. Балашова. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2009. – Вип. 50. – С. 58–62.
4. Шинкарук О. М. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей / О. М. Шинкарук, І. І. Чесановський // Зб. наук. пр. Військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка / за ред. С. В. Ленкова. – К. : Вид-во ВІКНУ, 2009. – Вип. 17. – С. 89–92.

*Рецензент – кандидат технічних наук Прокопенко Є.В.*

*Стаття надійшла до редакції 16.10.2014.*

**Иванов А. В. Повышение корреляционных свойств импульсных радиолокационных сигналов с учетом амплитудно-частотных флуктуаций в комплексной огибающей**

В статье исследуются вопросы повышения корреляционных свойств радиолокационных сигналов с учетом случайных амплитудных и угловых модулирующих составляющих. Получены аналитические выражения функций неопределенности моделей радиолокационных сигналов с учетом детерминированных модуляционных составляющих случайной формы в комплексной огибающей. Исследование данных аналитических выражений показало, что с учетом флуктуационных составляющих при реализации согласованной обработки сигналов позволяет получить значительный энергетический выигрыш и повысить потенциальные возможности отличить эхо-сигналы от групповых целей.

**Ключевые слова:** *радиолокационные системы, импульсная радиолокация, когерентность, согласованная фильтрация, амплитудная модуляция, угловая модуляция, корреляционная обработка.*

**Ivanov A. V. An increase of cross-correlation properties of impulsive radiolocation signals taking into consideration amplitude-frequency fluctuations in complex by-pass**

In the article the questions of increase of cross-correlation properties of radiolocation signals are investigated taking into consideration casual amplitude and angular modulating constituents.

Realization of impulsive methods of radio-location, envisages considerable limit nature in the indexes of quality and efficiency of functioning of the radiolocation systems. As the use of non-coherent methods of reception and treatment of radiolocation signals is envisaged, the informative indexes of the radiolocation system are determined exceptionally by energy and duration of sounding radio signals. However, by principal reason of subzero efficiency of impulsive methods of radio-location, there are applications of simple (without internal modulation) radiolocation signals, in that expansion of frequency spectrum results in considerably anymore power losses, than at application of difficult radiolocation signals, from impossibility of realization of the concerted algorithms of treatment and accordingly providing of effective “collection” of the up-diffused energy.

Many scientific studies are undertaken, in this direction, which showed that expansion of spectrum of impulsive radiolocation signals, by reduction of their duration, through disproportionate power losses, is inadvisable. Taking into account, that the impulsive radiolocation systems are hardly synchronized with the delimited times of radiation and reception of sounding signals, there is potential possibility of operative concordance of transceiver in every time. Thus, expansion of stripe of frequencies of sounding radiolocation signal can be realized by the corresponding concerted algorithm regardless of reason of appearance and his nature (artificial or fluctuation). In this case, cross-correlation properties of signal even fully nondeterministic will determine efficiency

of the radiolocation system, as a system will be realized on a coherent chart with corresponding possibilities.

For the estimation of the potential winning from realization of this approach, it is necessary to estimate how cross-correlation properties of radiolocation signal change, at taking into account of possible types and possible great number of parameters of nondeterministic changes of form complex by-pass of radiolocation signal.

We got analytical expressions of functions of vagueness of models of radiolocation signals, taking into account the determined modulation constituents of casual form in complex by-pass.

Research of these analytical expressions showed that at taking into account of fluctuation constituents during realization of the concerted treatment of signals gave an opportunity to get the considerable power winning and promote potential possibilities, in relation to distinction of signals of echo from group aims.

**Keywords:** *radiolocation systems, impulsive radio-location, coherent, concerted filtration, amplitude modulation, angular modulation, cross-correlation treatment.*