

11. ASHRAE Handbook – HVAC Applications. Chapter 23: Museums, Galleries, Archives and Libraries. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.

12. Camuffo, D. Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments. – Elsevier, 2019.

## ВПЛИВ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ КОДОМ АДАМАРА НА ФУНКЦІЮ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОГЕРЕНТНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ІМПУЛЬСІВ

Ткачук А. В.<sup>1</sup>, Гула І. В.<sup>2</sup>

Хмельницький національний університет, Україна

E-mail: <sup>1</sup>tkachukandriiv@gmail.com, <sup>2</sup>holmenetwork@gmail.com

***Анотація.** В роботі наведені результати дослідження складних сигналів, що являють собою послідовність когерентних імпульсів. Одним із методів обробки таких послідовностей імпульсів є фазова модуляція комплементарними кодами. На прикладі коду Адамара за допомогою математичного моделювання визначено вплив такої обробки на кореляційні властивості послідовності і її функцію невизначеності.*

***Ключові слова:** кореляційна функція, комплементарні коди, фазова модуляція, функція невизначеності.*

У сучасній радіолокації застосовується багато різних типів складних сигналів [1, 2]. Досить розповсюдженими є когерентні послідовності імпульсів. Такі послідовності дають змогу використовувати різні методи модуляції окремих імпульсів, що вносить певне різноманіття між імпульсами сигналу. В свою чергу, це дозволяє покращити кореляційні властивості сигналу – зменшити рівень бічних пелюсток, знизити рекурентні сплески, і більш того, добитись майже рівномірного розподілу функції невизначеності в зоні ненульових доплерівських зміщень. Крім того, когерентність імпульсів в послідовності дозволяє збільшити ефективну тривалість сигналу, наслідком чого є покращення роздільної здатності за доплерівським зміщенням.

Досить розповсюдженим методом обробки когерентних послідовностей імпульсів є фазова модуляція комплементарними кодами [2, 3]. Комплементарними називають дві послідовності, якщо сума їх автокореляційних функцій дорівнює нулю для будь яких зміщень окрім нульових. З огляду на те, що комплементарні послідовності

володіють нульовим рівнем бічних пелюсток функції автокореляції, їх можна використати для фазової модуляції когерентних послідовностей імпульсів. Для цього кожен імпульс послідовності розбивають на окремі частинки і фаза цієї частинки змінюється відповідним значенням. Окремий імпульс перетворюється на пакет імпульсів з фазовою маніпуляцією відповідною комплементарною послідовністю. В даній роботі досліджувався вплив такого кодування на функцію невизначеності сигналу.

Прийемо наступні позначення:  $t_i$  – тривалість парціального імпульсу (кодованої частинки);  $T$  – тривалість одного імпульсу;  $T_r$  – період повторення пакетів в когерентній послідовності (рис. 1). Для прикладу в даній статті використовувалась послідовність з  $P=8$  імпульсів тривалістю  $T$  частота повтору яких  $T_r = 3T$ . Кожен імпульс розбивався на  $M=8$  частинок тривалістю  $t_i$ . Для кодування використовувались послідовності Адамара.

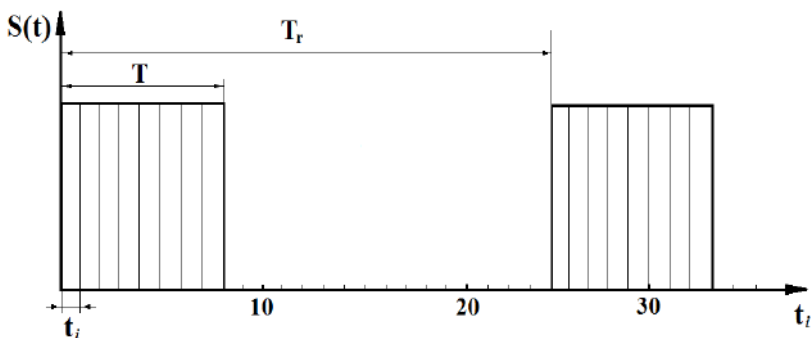


Рис. 1. Послідовність когерентних імпульсів

У загальному випадку математична модель когерентно-імпульсного сигналу з фазовою модуляцією комплементарним кодом визначається формулою [3]:

$$\dot{g}(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \dot{a}_{p,m} \dot{s}_m [t - (p-1)T_r], \quad (1)$$

де  $\dot{g}(t)$  – комплексна огинаюча кодованої послідовності імпульсів;  $\dot{s}_m(t)$  – комплексна огинаюча  $m$ -го імпульсу;  $\dot{a}_{p,m}$  – елемент

матриці  $\mathbf{A}$ , який використовується для кодування  $m$ -го парціального імпульсу пакета  $P$ :

$$\mathbf{A} = \{a_{p,m}\} = \{\exp(j\varphi_{p,m})\}. \quad (2)$$

У цій роботі використовувався код Адамара, який записують у вигляді матриці  $8 \times 8$ :

$$\{\varphi_{p,m}\}_{HAD} = \pi \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Використовується всього два значення фази, такий код називають бінарним. Якщо  $\varphi_{p,m} = 0$ , то  $a_{p,m} = 1$ , відповідно якщо  $\varphi_{p,m} = \pi$ , то  $a_{p,m} = -1$ .

Розглянемо послідовність, яка складається із 8 однакових імпульсів. Період послідовності  $T_r = 3T$ . Модуляція в імпульсах не застосовується рис. 2. В такому сигналі немає різниці між окремими імпульсами, тому він являє собою звичайну послідовність із 8 імпульсів. На рис. 3, *a* зображена амплітуда послідовності і фаза. Час в одиницях  $T_r$ .

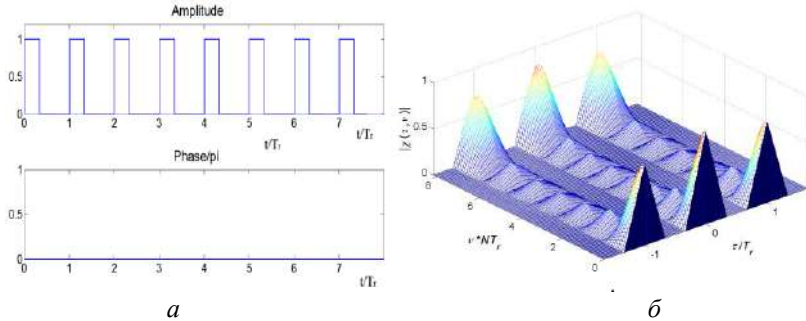
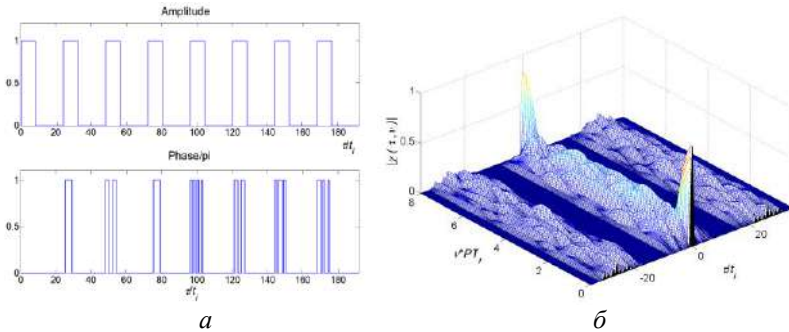


Рис. 2. Амплітуда і фаза послідовності без модуляції (*a*) і її функція невизначеності (*b*)

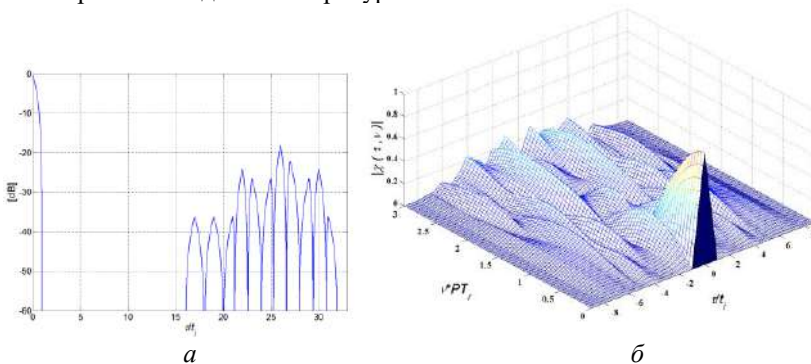
На рис. 2, *b* наведено функцію невизначеності сигналу в межах центрального піку і двох прилеглих рекурентних піків. Видно високий

рівень бічних піків. На рис. 3, *a* зображена послідовність імпульсів з фазовою модуляцією кодом Адамара. Час в одиницях  $t_i$ , амплітуда імпульсів не міняється. Оскільки фаза вимірюється в одиницях  $1/\pi$ , то фаза кожного імпульсу відповідає значенням що знаходяться в рядках матриці в формулі (3). На рис. 3, *б* зображена функція невизначеності цієї послідовності. Оскільки її імпульси після кодування відрізняються один від одного, то рекурентні піки стали значно меншими.



**Рис. 3.** Послідовність імпульсів кодованих по фазі кодом Адамара (*a*) і її функція невизначеності (*б*)

На рис. 4, *a* наведена функція автокореляції послідовності в межах від середини центрального піку до першої рекурентної петлюстки. Видно, що рівень рекурентного піку зменшився до  $-18$  Дб, або до величини приблизно  $0,126$  від центрального піку. Таке зменшення спостерігається і для інших рекурентних піків.



**Рис. 4.** Автокореляція послідовності імпульсів кодованих по фазі кодом Адамара в логарифмічному масштабі (*a*) і її функція невизначеності біля центрального піку (*б*)

Також можна спостерігати характерне для кодування комплементарними кодами явище: центральний пік звузився до часової зони що дорівнює тривалості кодуваної частинки  $-t_i \leq \tau \leq t_i$ . Для послідовності без коду ширина піку відповідає часовому проміжку від  $-T \leq \tau \leq T$  або відповідно  $-8t_i \leq \tau \leq 8t_i$  рис. 2, б.

На рис. 4, б можна також бачити ефект звуження центрального піку і нульовий рівень пелюсток біля нього (рис. 4, б відповідає масштабованому в межах центрального піку рис. 3, б) Також видно, що для ненульових доплерівських зміщень частоти ця перевага швидко втрачається через значні неоднорідності тіла функції невизначеності. Це є одним з вагомих недоліків подібних сигналів [3]. В роботах [4, 5] досліджуються методи згладжування сплесків функції невизначеності в зоні поблизу центрального піка. Для цього крім фазового зміщення (відповідно обраному комплементарному коду) застосовується також внутрішня частотна модуляція в парціальних імпульсах. В статті [5] показано, що для комплементарного коду PONS [2, 5] і внутрішньої частотної модуляції, можливо значно послабити неоднорідності функції невизначеності поблизу центрального піку для ненульових доплерівських зміщень.

## Література

1. Cook Ch. Radar Signals. An introduction to theory and application / Charles E. Cook, Marvin Bernfeld-New York: Academic Press, 1967–566 p.
2. Levanon N Radar Signals /Nadav Levanon, Eli Mozeson. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2004. – 411 p.
3. Levanon N., Mozeson E. Removing autocorrelation sidelobes by overlaying orthogonal coding on any train of identical pulses / N. Levanon, E. Mozeson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2003. – Vol. 39. – № 2. – Pp. 583–603.
4. Чесановський І. І. Синтез когерентних послідовностей імпульсів з лінійно-частотною модуляцією і нелінійними кроками носійної / І. І. Чесановський, А. В. Ткачук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2018. – № 6 (267). – С. 134–142.
5. Ткачук А. В. Підвищення ефективності когерентно-імпульсних сигналів в умовах доплерівських зміщень частоти / А. В. Ткачук, І. І. Чесановський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 5 (289). – С. 28–34.