

ПОРІВНЯННЯ ЛІНІЙНОЇ ТА ХАОТИЧНОЇ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ РАДІОЛОКАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Виконано числове порівняння автокореляційних та спектральних характеристик лінійно-частотно-модульованого і хаотичного частотно-модульованого сигналів, що розглядаються як кандидати на роль зондувального сигналу спільних радіолокаційно-комунікаційних систем. Хаотичну частотну модуляцію сформовано на основі системи Лоренца за однакових з лінійно-частотно-модульованим сигналом девіації частоти та бази сигналу. Хаотичний сигнал має шумоподібний спектр і нижчий рівень бічних пелюсток автокореляційної функції, проте за рівної девіації децю ширшу головну пелюстку. Результати кількісно підтверджують придатність хаотичної частотної модуляції для скритних радіолокаційно-комунікаційних систем.

Ключові слова: хаотична частотна модуляція, радіолокаційно-комунікаційні системи, автокореляційна функція, рівень бічних пелюсток, система Лоренца, шумоподібний сигнал.

Abstract

A numerical comparison of the autocorrelation and spectral characteristics of a linear-frequency-modulated and a chaotic frequency-modulated signal is carried out, considering them as candidate waveforms for joint radar-communication systems. The chaotic frequency modulation is formed on the basis of the Lorenz system with the same frequency deviation and time-bandwidth product as the linear-frequency-modulated signal. The chaotic signal has a noise-like spectrum and a lower autocorrelation sidelobe level, but a somewhat wider main lobe for an equal deviation. The results quantitatively confirm the suitability of chaotic frequency modulation for low-probability-of-intercept radar-communication systems.

Keywords: chaotic frequency modulation, radar-communication systems, autocorrelation function, sidelobe level, Lorenz system, noise-like signal.

Вступ

Поєднання радіолокації та зв'язку на спільній апаратній платформі дозволяє уникнути дублювання передавальних і приймальних трактів та ефективніше використовувати частотний ресурс [1]. Для таких систем визначальним є вибір зондувального сигналу, що водночас забезпечує високу роздільну здатність радіолокаційного каналу і передавання даних у каналі зв'язку. Цій умові відповідають сигнали з детермінованою хаотичною динамікою. Їхня шумоподібна структура задовольняє вимогу широкої смуги, а низький рівень бічних пелюсток автокореляційної функції - вимогу високої роздільної здатності за дальністю. Детермінованість хаосу дозволяє відновити сигнал на приймальній стороні за відомих параметрів генератора [2]. На відміну від схем хаотичної маніпуляції в системах зв'язку [3], хаотична частотна модуляція зберігає сумісність із класичними принципами імпульсної радіолокації.

Раніше було проаналізовано загальні принципи застосування хаотичної частотної модуляції у спільних радіолокаційно-комунікаційних системах [4], що дало змогу обґрунтувати доцільність використання таких сигналів і окреслити характеристики, які потребують кількісної оцінки. Ця робота має на меті кількісне порівняння автокореляційних і спектральних властивостей лінійно-частотно-модульованого (далі - ЛЧМ) та хаотичного частотно-модульованого (далі - ХЧМ) сигналів за однакових умов, що дає змогу оцінити переваги і обмеження хаотичного сигналу відносно класичного ЛЧМ як еталона [5].

Модель сигналів і методика дослідження

Загальний вираз частотно-модульованого сигналу має вигляд

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau + \varphi_0) \quad (1)$$

де A - амплітуда; f_0 - несуча частота; k_f - коефіцієнт девіації частоти; $m(\tau)$ - модульовальна функція; φ_0 - початкова фаза. Для хаотичної частотної модуляції модульовальною функцією є стан хаотичної динамічної системи

$$m(t) = \alpha \cdot x(t) \quad (2)$$

де α - масштабний коефіцієнт; $x(t)$ - одна з фазових координат генератора хаосу. Канонічним джерелом хаотичної динаміки тут є система Лоренца

$$dx/dt = \sigma(y - x); \quad dy/dt = x(\rho - z) - y; \quad dz/dt = xy - \beta z \quad (3)$$

яка за стандартних значень параметрів $\sigma = 10$, $\rho = 28$, $\beta = 8/3$ переходить у хаотичний режим.

ЛЧМ-сигнал задавався лінійною зміною миттєвої частоти в межах смуги В, а ХЧМ-сигнал - миттєвою частотою, пропорційною координаті $x(t)$ системи Лоренца, нормованою до тієї самої девіації частоти В. Параметри моделювання: смуга В = 50 МГц, тривалість імпульсу Т = 10 мкс, база сигналу ВТ = 500; розрахунок виконано для комплексної огинаючої. Автокореляційну функцію отримано як відгук узгодженого фільтра; за нею визначено рівень найбільшої бічної пелюстки (PSLR), ширину головної пелюстки за рівнем -3 дБ і відповідну роздільну здатність за дальністю. Енергетичний спектр обчислено швидким перетворенням Фур'є з ваговим вікном Ганна.

Результати

Результати моделювання наведено на рис. 1 і узагальнено в табл. 1. ЛЧМ-сигнал має регулярну структуру бічних пелюсток сіпс-подібного типу з рівнем PSLR -13,4 дБ і майже прямокутний спектр у межах смуги. У ХЧМ-сигналу спектр і фон бічних пелюсток автокореляційної функції шумоподібні; середній рівень фону близько -28,8 дБ, що узгоджується з оцінкою $-10 \cdot \lg(BT) \approx -27$ дБ, а найбільша бічна пелюстка становить -17,6 дБ - нижче, ніж у ЛЧМ.

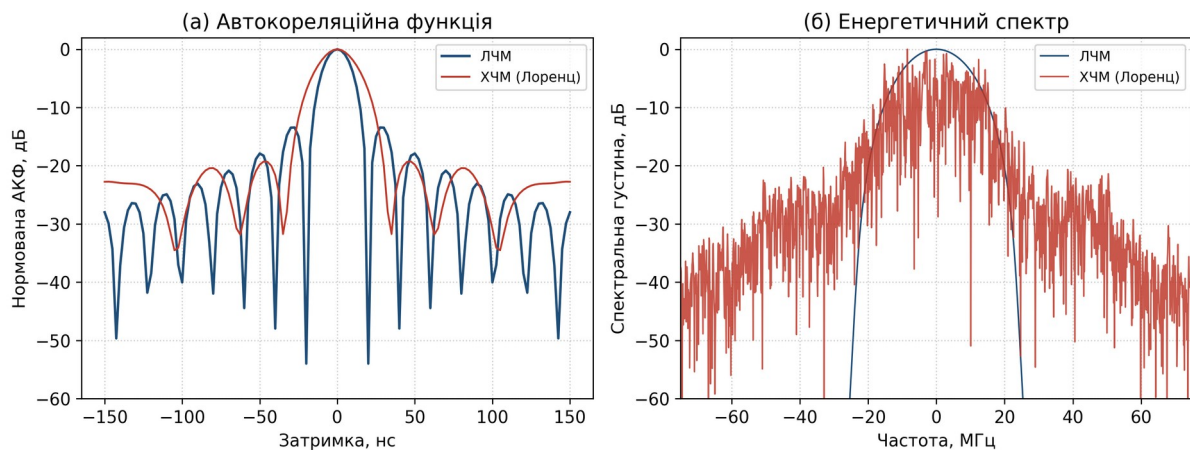


Рис. 1. Автокореляційна функція (а) та енергетичний спектр (б) ЛЧМ і ХЧМ сигналів

Натомість за однакової девіації частоти головна пелюстка ХЧМ ширша (30 нс проти 20 нс), що відповідає роздільній здатності за дальністю 4,5 м проти 3,0 м у ЛЧМ. Причина - нерівномірне заповнення смуги хаотичним процесом; це погіршення усувається збільшенням девіації частоти або бази сигналу. Рівень бічних пелюсток ХЧМ помітно залежить від кількості хаотичних коливань на тривалості імпульсу: за недостатньої щільності модуляції зростає періодичність сигналу, а з нею і рівень бічних пелюсток.

Табл. 1. Порівняння характеристик ЛЧМ та ХЧМ сигналів ($B = 50$ МГц, $T = 10$ мкс, $BT = 500$)

Показник	ЛЧМ	ХЧМ (Лоренц)
Рівень найбільшої бічної пелюстки (PSLR), дБ	-13,4	-17,6
Структура бічних пелюсток	регулярна (sinc)	шумоподібна
Середній рівень бічного фону	-	-28,8 дБ
Ширина головної пелюстки (-3 дБ), нс	20	30
Роздільна здатність за дальністю, м	3,0	4,5
Форма енергетичного спектра	майже прямокутна	шумоподібна

Практичним джерелом хаотичної динаміки слугуватиме транзисторна структура з від'ємним диференціальним опором [6], а не абстрактна система Лоренца. Отримані оцінки рівня сигналу від цього не змінюються, оскільки визначаються статистичними властивостями модуляції, а не конкретною схемою генератора.

Висновки

Кількісне порівняння показало, що ХЧМ-сигнал на основі системи Лоренца поєднує дві корисні для спільних радіолокаційно-комунікаційних систем властивості - шумоподібний спектр і знижений, шумоподібний за структурою рівень бічних пелюсток автокореляційної функції, що дає кращу скритність порівняно з класичним ЛЧМ. Ціною цього є розширення головної пелюстки за однакової девіації частоти, яке усувається збільшенням бази сигналу. Отримані оцінки обґрунтовують подальше розроблення гібридних транзисторно-цифрових генераторів хаотичних частотно-модульованих сигналів для спільних моностаціонарних і бістаціонарних радіолокаційно-комунікаційних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead / F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, N. Griffiths, L. Hanzo // IEEE Transactions on Communications. - 2020. - Vol. 68, No. 6. - P. 3834-3862. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2973976.
2. Pappu C. S. Chaos based frequency modulation for joint monostatic and bistatic radar-communication systems / C. S. Pappu, A. N. Beal, B. C. Flores // Remote Sensing. - 2021. - Vol. 13, No. 20. - Art. 4113. DOI: 10.3390/rs13204113.
3. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems: a comprehensive survey / G. Kaddoum // IEEE Access. - 2016. - Vol. 4. - P. 2621-2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
4. Якименко О. А. Аналіз застосування хаотичної частотної модуляції у спільних радіолокаційно-комунікаційних системах / О. А. Якименко // Матеріали LV Всеукраїнської науково-технічної конференції факультету інформаційних електронних систем. - Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzip/all-frtzip-2026/paper/view/29561>.
5. Levanon N. Radar Signals / N. Levanon, E. Mozeson. - Hoboken, NJ : Wiley-IEEE Press, 2004. - 432 p.
6. Експериментальне дослідження генератора детермінованого хаоса на основі транзисторної структури / О. В. Осадчук, Я. О. Осадчук, В. І. Петренко, В. К. Скощук, К. В. Шикун // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2025. - Т. 49, № 1. - С. 235-246. DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-235-246.

Якименко Олександр Анатолійович - аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yakimenkoleksander228@gmail.com.

Науковий керівник: **Осадчук Ярослав Олександрович** - д-р техн. наук, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.i93@gmail.com

Yakymenko Oleksandr A. - PhD student, Department information radioelectronic, technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: yakimenkoleksander228@gmail.com.

Supervisor: **Osadchuk Iaroslav O.** - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department information radioelectronic, technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.i93@gmail.com