

ОЦІНКА РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ІМПУЛЬСНОЇ РЛС ЗА ДАЛЬНІСТЮ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КВАЗІХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ

Подається математичний вираз квазіхаотичного сигналу, проводиться аналіз його параметрів та характеристик, які впливають на роздільну здатність імпульсної РЛС за дальністю. Показано методом числового аналізу переваги такого сигналу порівняно з класичними сигналами.

Постановка проблеми. В останнє десятиріччя з'явилася велика кількість робіт з виявлення хаотичних коливань у будь-яких системах і середовищах [5-8]. Тому почалося створення класифікації сценаріїв переходу від монохроматичних коливань до хаосу в різних динамічних системах. У цьому переході проміжне місце займають квазіхаотичні сигнали (КХС). Поширення досліджень призвело до виявлення закономірності виникнення хаотичних коливань [6, 9, 10].

Огляд останніх досліджень і публікацій. З аналізу опублікованих робіт [8-10] випливає, що вивчення механізмів формування хаотичних коливань та їх практичне застосування проводилося в основному для систем передачі інформації. У той же час має практичний інтерес вирішення завдань збільшення роздільної здатності, точності вимірів координат цілей, підвищення перешкодостійкості РЛС з використанням детермінованих хаотичних коливань, які за своєю сутністю є нерегулярними та подібними до псевдошумових сигналів.

Формулювання завдання дослідження. Метою даної роботи є проведення аналізу та оцінки можливості збільшення роздільної здатності за дальністю імпульсної РЛС шляхом використання квазіхаотичного сигналу, реалізованого на основі лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) коливання. Таку можливість зручно оцінювати шляхом порівняння тіл невизначеності класичного ЛЧМ і квазіхаотичного сигналів.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Математична модель квазіхаотичного сигналу

Структура КХС значною мірою залежить від вибору нульового (опорного) класичного коливання. Під час моделювання КХС як опорне візьмемо математичний вираз класичного ЛЧМ коливання за відомою формулою [1-4]:

$$U_1(t) = U_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + 0.5 \cdot h \cdot t^2 + \varphi_0), \quad (1)$$

де $f_0 = 0,5 \cdot (f_1 + f_2)$ – середня частота сигналу;

t – поточний час;

f_1, f_2 – нижня та верхня частоти спектра;

$h = 2 \cdot \pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \tau_0^{-1}$ – швидкість зміни частоти;

U_1, τ_0, φ_0 – амплітуда, тривалість та початкова фаза сигналу відповідно.

Особливість КХС полягає у масштабній інваріантності (скейлінзі) пари параметрів ЛЧМ коливачь, які входять до складу сигналу, що формується. Кількісною мірою масштабної інваріантності є коефіцієнт масштабування (подібності) k . Крім того, для КХС характерний гіперболічний зв'язок параметрів, який можна визначити як комбінацію розтягнення відображених параметрів в одному напрямку (у розглянутому випадку – це швидкість зміни частоти $h \cdot k^n$) і стискання в іншому (зменшення амплітуд складових ЛЧМ сигналу $U_1 \cdot k^{-n}$). Розтягнення призводить до стохастизації, стискання ж необхідне для того, щоб траєкторії ЛЧМ складових сигналу залишалися в обмеженій області фазового простору [5-7].

Розглянуті закономірності та формула (1) дозволяють привести математичний вираз квазіхаотичного сигналу до вигляду [7]

$$U(t) = \sum_{n=0}^{N-1} U_0 \cdot k^{-n} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + 0,5 \cdot h \cdot k^n \cdot t^2 + \varphi_0), \quad (2)$$

де U_0 – амплітуда нульового (опорного) ЛЧМ коливачья;

n, N – номер і кількість ЛЧМ коливачь, що беруть участь у формуванні квазіхаотичного сигналу.

Надалі квазіхаотичний сигнал будемо називати просто сигналом, а ЛЧМ коливачья, що бере участь у формуванні КХС, – складовою сигналу.

На рис. 1 (а, б) наведені в тимчасовій області відповідно опорне ЛЧМ коливачья та сигнал, що отримані при безрозмірних амплітудах $U_0 = 1$ та $U_1 = 1,75$, девіації частоти $\Delta f = f_2 - f_1 = 8$, коефіцієнті $k = 2$ й тривалості сигналу $\tau_0 = 2$.

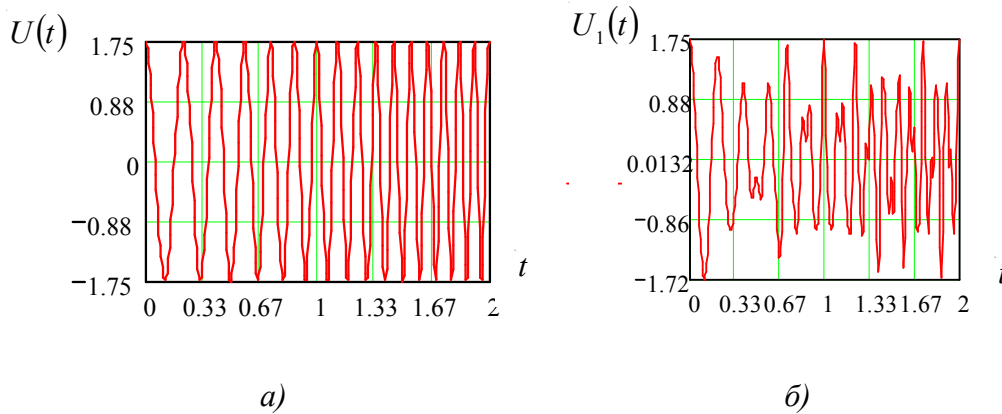


Рис. 1

Поточний час t обраний в інтервалі $[0, 1]$. Сигнал (рис. 1 (б)) являє собою суму опорного й двох гомеоморфних (подібних) ЛЧМ коливачь ($n = 0, 1, 2$ – номери складових). Рис. 1 показує істотну відмінність сигналу від опорного ЛЧМ коливачья, що зумовлено взаємним впливом (взаємодією) один на одного ЛЧМ коливачь, які входять до складу сигналу.

Можна показати, що ступінь хаотичності сигналу визначається кількістю складових, що беруть участь у його формуванні. На рис. 2 (а, б) наведена зміна хаотичності сигналу при $N = 4$ ($n = 0, 1, 2, 3$) і $N = 5$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4$) відповідно.

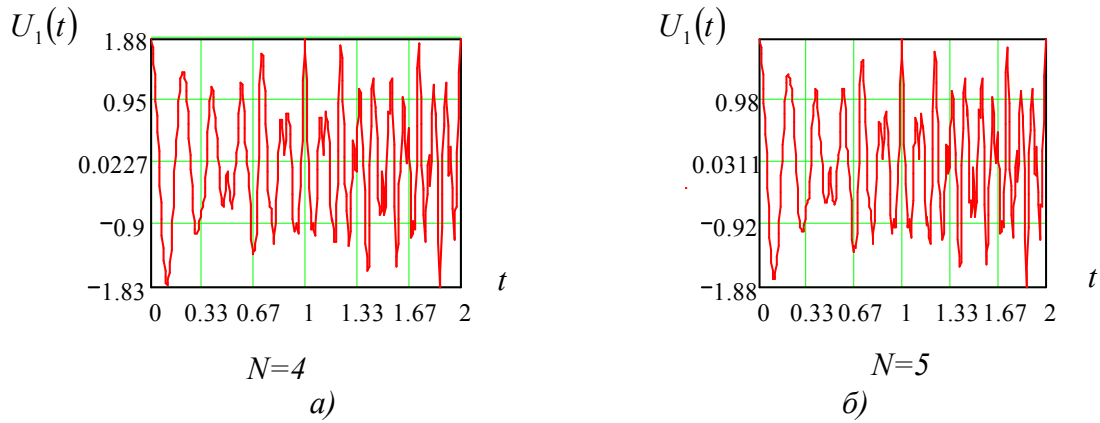


Рис. 2

На рис. 1 та 2 можна простежити динаміку розвитку хаотичного сигналу залежно від кількості ЛЧМ коливань на прикладі зміни рівнів позитивних і негативних викидів (наприклад, рис. 1 (б) – 1,75, рис. 2 (б) – 1,88).

Скориставшись перетворенням Фур'є, зобразимо ЛЧМ коливання та сигнал у спектральній формі:

$$S(f) = U_1 \cdot \left| \int_{-0.5\tau}^{0.5\tau} e^{j(2\pi \cdot (f_0 - f) \cdot t + 0.5 \cdot h \cdot t^2)} dt \right|; \quad (3)$$

$$S_1(f) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{U_0}{k^n} \cdot \left| \int_{-0.5\tau}^{0.5\tau} e^{j(2\pi \cdot (f_0 - f) \cdot t + 0.5 \cdot h \cdot k^n \cdot t^2)} dt \right|. \quad (4)$$

На рис. 3 (а, б) наведені спектри, що отримані відповідно до формул (3) і (4). З порівняльного аналізу спектрів випливає, що сигнал має неперервний розширений спектр (рис. 2 (б)) порівняно зі спектром класичного ЛЧМ коливання (рис. 3 (а)). Це розширення зумовлене впливом гомеоморфних складових сигналу [6], що мають більш широкий спектр порівняно з опорним коливанням.

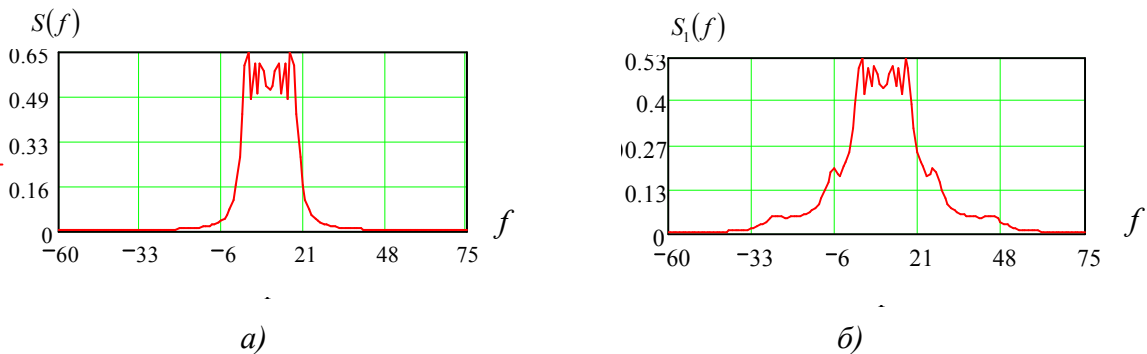


Рис. 3

Розширений безперервний спектр підтверджує квазіхаотичність сформованого сигналу. Можна показати, що збільшення кількості гомеоморфних складових призводить до подальшого розширення спектра сигналу. На рис. 4 наведений спектр сигналу при $N = 3$ ($n = 0, 1, 2, 3$). Спектр сигналу розширюється, однак рівень спектра, що відповідає складовій $n = 3$, малий. З рис. 4 випливає, що зв'язок між максимальними значеннями рівнів і шириною спектрів окремих складових (ЛЧМ коливань) сигналу має гіперболічний характер.

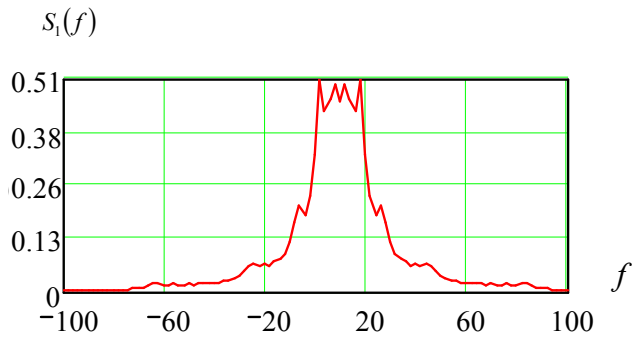


Рис. 4

Ступінь хаотичності КХС можна візуально проаналізувати та оцінити за фазовими портретами (ФП) (рис. 5), що показують поведінку зображеної точки на фазовій площині (рис. 5 (а)). На рис. 5 фазовий портрет показаний на площині «похідна сигналу $u_{2,3}(t)$ – сигнал $u_1(t)$ ». Для порівняння на рис. 5 (б) наведений фазовий портрет класичного ЛЧМ коливання з амплітудою, що дорівнює $U_1 = 1,75$. Розбіг фазових траєкторій (рис. 5 (а)) та їх зворотне повернення до атратора (множина, що притягується) візуально характеризує вплив взаємодії всіх складових ЛЧМ коливань одна на одну та, як наслідок, ступінь хаотичності сигналу. Побудова ФП сигналів вимагає знання похідної функції $u_{2,3}(t)$ [2].

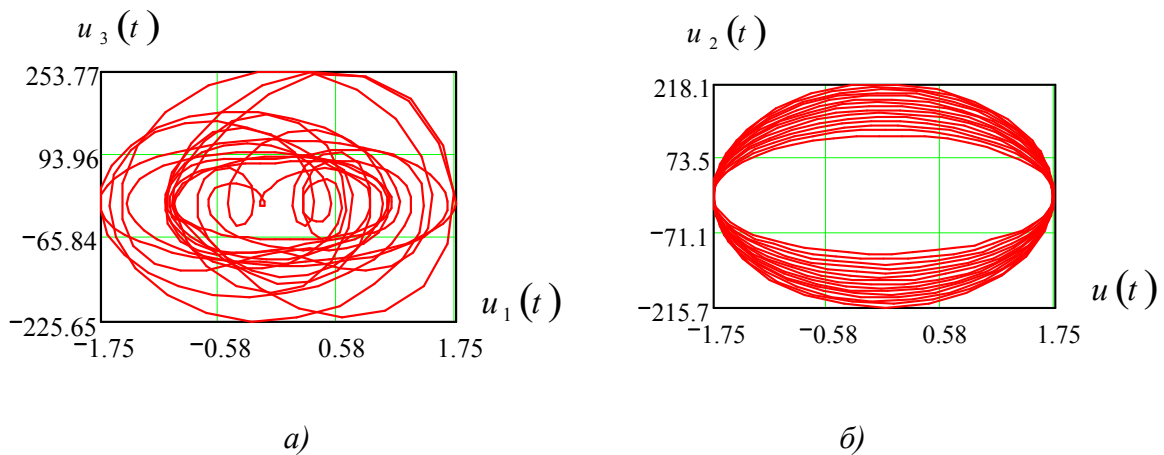


Рис. 5

2. Тіло невизначеності квазіхаотичного сигналу

Для аналізу роздільної здатності РЛС за дальністю, крім часової та спектральної характеристик сигналу, доцільно розглянути його тіло невизначеності (ТН). Векторний параметр часового сигналу має два скалярних – час запізнювання τ та доплерівський зсув частоти F . У цьому випадку для такого векторного параметра вираз для нормованої автокореляційної функції сигналу має вигляд [1]:

$$\rho(\tau, F) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cdot U^*(t - \tau) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot t} dt \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(t)|^2 dt} \quad (5)$$

Значення $\rho(\tau, F)$, що визначаються за виразом (5), змінюються у межах від 0 до 1. Якщо відсутні непогодження за τ , то значення $\rho(\tau, F)$ та F дорівнюють одиниці. Після інтегрування виразу (5) отримаємо вираз для тіла невизначеності ЛЧМ коливання:

$$\rho_1(\tau, F) := \begin{cases} U^2 \cdot \frac{\left| \sin \left[\pi \left[\left(F + \Delta f \frac{\tau}{\tau_0} \right) (\tau_0 - |\tau|) \right] \right] \right|}{\left| \pi \left[\left(F + \Delta f \frac{\tau}{\tau_0} \right) (\tau_1 - |\tau|) \right] \right|} \cdot \left(1 - \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right| \right) & \text{if } |\tau| \leq \tau_0, \\ 0 & \text{if } |\tau| \geq \tau_0, \end{cases} \quad (6)$$

де $E = U^2$ – енергія ЛЧМ коливання, коли $\tau_0 = 2$;

τ – змінна часу.

На рис. 6 (а, б) зображені нормовані до енергії ТН та його проекція на площину Y–Z класичного ЛЧМ коливання. Тіло невизначеності має характерний для ЛЧМ коливання поворот, зумовлений швидкістю зміни частоти (рис. 6 (а)).

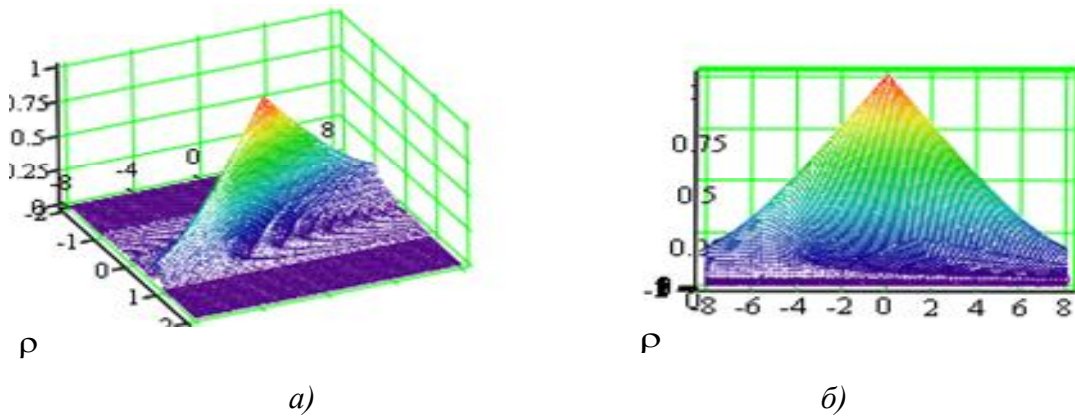


Рис. 6

Ширина проекції ТН на половинному рівні дорівнює 8 (рис. 6 (б)). Використовуючи вирази (2) та (5), після інтегрування отримаємо математичний вираз тіла невизначеності $\rho_1(\tau, F)$ сигналу у вигляді

$$\rho_1(\tau, F) := \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\left(\frac{U_0}{k^n} \right)^2 \frac{\left| \sin \left[\pi \left[\left(F + \Delta f \frac{\tau}{\tau_1} k^n \right) (\tau_1 - |\tau|) \right] \right] \right|}{\left| \pi \left[\left(F + \Delta f \frac{\tau}{\tau_1} k^n \right) (\tau_1 - |\tau|) \right] \right|} \right] \cdot \left(1 - \left| \frac{\tau}{\tau_1} \right| \right) & \text{if } |\tau| \leq \tau_1, \\ 0 & \text{if } |\tau| \geq \tau_1, \end{cases} \quad (7)$$

де τ_1 – тривалість квазіхаотичного сигналу.

На рис. 7 (а, б) зображені нормовані до енергії ТН та його проекція на площину Y–Z для квазіхаотичного сигналу.

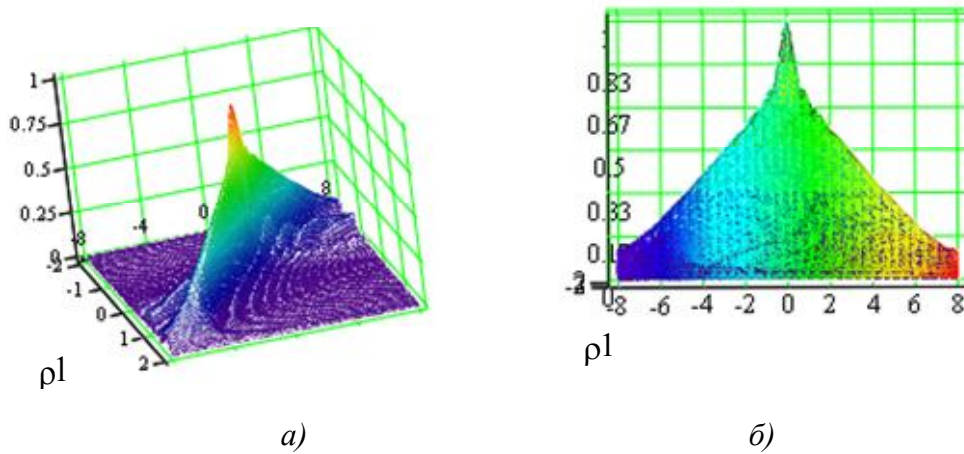


Рис. 7

Тіло невизначеності сигналу також характеризується поворотом (рис. 7 (а)), що визначається тілами невизначеності опорної та двох гомеоморфних складових, що формують сигнал. Безрозмірна ширина проекції ТН квазіхаотичного сигналу на половинному рівні дорівнює 6 (рис. 7 (б)). З аналізу рис. 6 (б) та рис. 7 (б) видно, що ширина (на половинному рівні) проекції ТН квазіхаотичного сигналу в 1,33 рази менша від ширини проекції ЛЧМ коливання. Найбільш істотне звуження тіла невизначеності сигналу спостерігається в межах великої кореляції (лінія однакового рівня $H > 0,75$ (рис. 7 (б))). Отже, менша ширина перетину (на рівні великої кореляції $H = 0,5$) тіла невизначеності по осі часу запізнювання τ квазіхаотичного сигналу порівняно із шириною перетину класичного ЛЧМ коливання дозволяє зробити висновок про можливість використання в імпульсних РЛС такого сигналу для підвищення роздільної здатності цілей за дальністю.

3. Результати числового аналізу

Розрахунки кількісних оцінок роздільної здатності цілей за дальністю з використанням КХС проведені на базі системи Matchad-2000. Для оцінки роздільної здатності цілей використовується критерій Релея та прийнята рівність відповідно до енергій та дальностей ЛЧМ коливання та порівнюваного з ним квазіхаотичного сигналу. З цією метою під час розрахунків взяті: тривалості, що дорівнюють $\tau_0 = \tau_1 = 2$, амплітуди ЛЧМ коливання $U_1 = 1,146$ та опорного коливання КХС $U_0 = 1$. Для оцінювання роздільної здатності використані перетини ТН у межах великої кореляції. З математичного виразу, що описує перетин ТН ЛЧМ коливання [4], отримана формула для розрахунку перетинів ТН квазіхаотичного сигналу:

$$y_{1,2}(\tau) := -\frac{\tau}{\tau_0} \pm \frac{\sqrt{24}}{d \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_0}\right)} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_0}\right)}}. \quad (8)$$

До складу формули (8) входить d – це база ЛЧМ коливання, що виражена через величину h .

$$y_s(\tau) := \sum_{n=0}^N \left[-\frac{\tau}{\tau_0} + \frac{\sqrt{24}}{2\pi} \cdot \frac{hk^n \tau_1^2}{\left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_1}\right)} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_1}\right)}} \right]; \quad (9)$$

$$y_s(\tau) := \sum_{n=0}^N \left[-\frac{\tau}{\tau_0} - \frac{\sqrt{24}}{2\pi} \cdot \frac{hk^n \tau_1^2}{\left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_1}\right)} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_1}\right)}} \right].$$

На рис. 8 (а, б) наведені перетини та фрагменти перетинів тіл невизначеності ЛЧМ коливання (суцільна крива) та квазіхаотичних сигналів, сформованих двома складовими ($n = 0, 1$, точкова крива) і трьома складовими ($n = 0, 1, 2$, пунктирна крива).

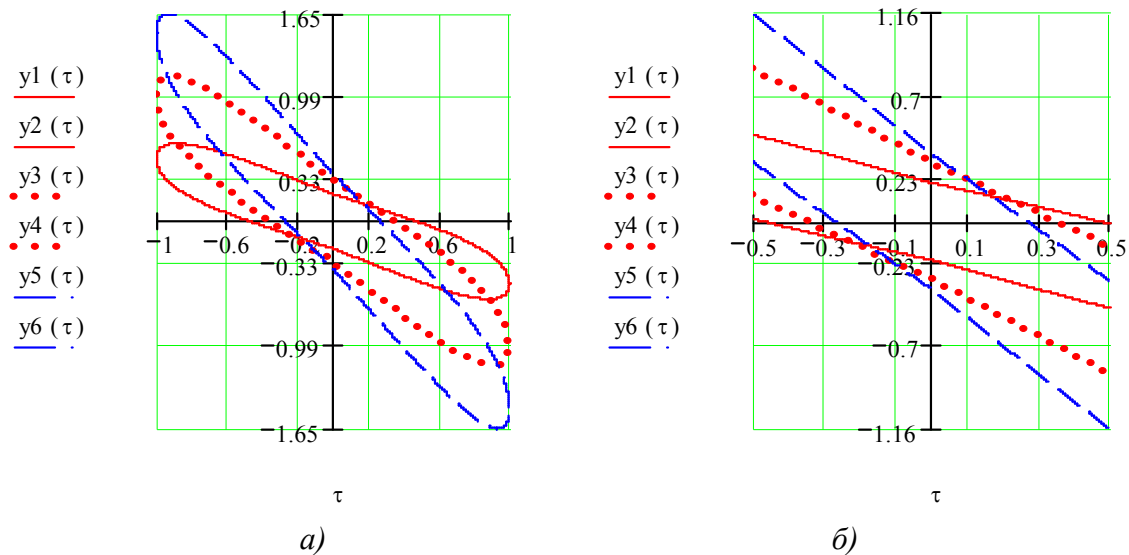


Рис. 8

З аналізу рис. 8 (а, б) випливає, що при збільшенні кількості складових N у КХС виникає поворот ТН і ширина перетинів по осі τ зменшується. Це свідчить про підвищення роздільної здатності за дальністю. Результати розрахунків роздільної здатності за дальністю Δr наведені в таблиці. Вони показують істотне збільшення роздільної здатності, яке досягається при використанні КХС, сформованого складовими з нижчими номерами ($n = 0, 1, 2$). Аналіз таблиці показує, що зі збільшенням кількості складових ($n = 4, 5, 6$) у КХС швидкість прирощення роздільної здатності значно зменшується. У разі, коли до роздільної здатності за дальністю не ставляться суворі вимоги, доцільно застосовувати КХС, сформований складовими з нижчими номерами.

Таблиця

N	1	2	3	4	5	6
$\Delta\tau$	0.96	0.72	0.54	0.42	0.36	0.31
Δr	144	108	81	63	54	47

Висновок. Проведений аналіз свідчить про потенційну можливість використання КХС для підвищення роздільної здатності цілей за дальністю в імпульсних РЛС. На основі математичного виразу ТН ЛЧМ сигналу запропонований математичний опис ТН квазіхаотичного сигналу. Наведена формула перетину тіла невизначеності, що дозволяє оцінити роздільну здатність за часом запізнення τ (дальності). Показано, що при рівності дальностей та енергій ЛЧМ коливання й квазіхаотичного сигналу, останній є ефективнішим для роздільної здатності цілей. З результатів числових розрахунків випливає, що основний вплив на роздільну здатність відбувається складовими сигналу з нижчими номерами ($n = 0, 1, 2$). Тому пропонується обмежувати кількість складових, що формують сигнал, і тим самим скорочувати кількість каналів формувача квазіхаотичного сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М. : Сов. радио, 1977. – 511 с.
3. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высшая школа, 1988. – 448 с.
4. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. – М. : Сов. радио, 1970. – 375 с.
5. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / А. А. Потапов. – М. : Логос, 2002.
6. Неймарк Ю. И. Стохастические и хаотические колебания / Ю. И. Неймарк, П. С. Ланда. – М. : Наука, 1987. – 424 с.
7. Пащенко Р. Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов / Р. Э. Пащенко. – Харьков : ХООО «НЭО «ЭкоПерспектива», 2005. – 296 с.
8. Кислов В. Я. Динамический хаос и его использование в радиоэлектронике для генерирования, приема и обработки колебаний и информации / В. Я. Кислов // Радиотехника и электроника, 1993. – Вып. 10. – С. 1783–1815.
9. Дмитриев А. С. Динамический хаос как парадигма современных систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1997. – № 10. – С. 4–25.
10. Дмитриев А. С., Каргинский Б. Е. и др. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах / А. С. Дмитриев, Б. Е. Каргинский и др. // Радиотехника, 2000. – № 3. – С. 9–20.

Подано 19.06.08

Н. В. Бугайов, Э. И. Пашенко

ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПО ДАЛЬНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КВАЗИХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Представлено математическое выражение квазихаотического сигнала, проводится анализ его параметров и характеристик, которые влияют на разрешающую способность импульсной радиолокационной станции (РЛС) по дальности. Показаны методом числового анализа преимущества такого сигнала по сравнению с классическими сигналами.

M. V. Bugayov, E. I. Paschenko

ESTIMATION OF DISCRIMINABILITY OF RLS AFTER DISTANCE AT THE USE ALMOST CHAOSTIC SIGNAL

Mathematical expression of almost chaotic signal is given, the analysis of his parameters and descriptions which influence on the discriminability of impulsive RLS after distance is conducted. The advantage of such signal as compared with classic signals showed by the method of numerical analysis.