

## МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРІЗНЕННЯ RZ-СИГНАЛІВ В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НА ФОНІ АСИМЕТРИЧНИХ НЕГАУСОВИХ ЗАВАД

<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет

Розглянуто новий метод статистичної обробки RZ-сигналів на фоні асиметричних негаусових завад. Для розв'язання задачі оброблення дискретних RZ-сигналів на фоні негаусових завад синтезовані поліноміальні розв'язувальні правила (РП). Зі степенем полінома  $S = 1$  РП є системою правил перевірки гіпотез  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{21}$ , які не враховують негаусовий розподіл досліджуваних випадкових процесів. Зі збільшенням степеня полінома до  $S = 2$  використовуються початкові моменти 3-го та 4-го порядків, що дає можливість врахувати негаусові параметри досліджуваних випадкових процесів, зокрема для постановки задачі з коефіцієнтом асиметрії завади. Такий підхід дозволяє врахувати тонку структуру негаусових процесів та дозволяє зменшити ймовірності помилок РП у порівнянні з відомими результатами. На основі нового методу статистичної обробки сигналів для прийому даних розроблена Simulink-модель системи та проведено моделювання її функціонування для РП, для  $S = 1, 2$  та різних значень відношення потужності корисного сигналу до потужності завади. Показано, що у разі врахування коефіцієнта асиметрії негаусової завади ефективність прийому сигналів збільшується для  $S = 2$  у порівнянні з відомими результатами, які є оптимальними для гаусової моделі завад з  $S = 1$ . Запропонований новий метод обробки адитивної суміші біполярних дискретних RZ-сигналів на фоні асиметричних негаусових завад, приймаючи дані в телекомунікаційних системах, ефективніший порівняно з відомими методами за рахунок нелінійної статистичної обробки сигналів та врахування тонкої структури досліджуваних негаусових випадкових процесів. Проведені дослідження демонструють зменшення помилкових рішень під час прийому RZ-сигналів з урахуванням коефіцієнта асиметрії негаусової завади, що свідчить про підвищення ефективності функціонування системи прийому даних.

**Ключові слова:** RZ-сигнали, моментний критерій якості, негаусові завади.

### Вступ

Системи передачі і прийому даних є невід'ємною і в багатьох випадках визначальною частиною сучасних систем спостереження, діагностики, контролю, управління, розвиток яких характеризується підвищеними вимогами до оброблення прийнятих даних. Для побудови таких систем застосовують один із типів лінійного кодування повідомлення, наприклад, RZ-кодування [1]. Такий тип кодування має низку переваг, а саме:

- простота реалізації у порівнянні з багаторівневими способами кодування;
- дозволяє позбутися проблеми постійного зміщення за рахунок протилежного потенційного рівня;
- самосинхронізація сигналів в системах зв'язку.

На функціонування таких систем під час передачі даних зазвичай впливають різноманітні дестабілізуючі завади, що зі свого боку, впливає на якість та ефективність їхньої роботи. Завади виникають у разі багатопроменевого поширення радіосигналів, у разі проходження їх через неоднорідні середовища, флуктуації параметрів каналів зв'язку тощо, що характеризує їх як негаусові випадкові процеси.

Питання побудови математичних моделей процесів виявлення і розрізнення сигналів, теорії прийняття рішень, їхнього ефективного використання в прикладних розробках досліджені в роботах П. Ю. Баранова, А. Я. Білецького, В. М. Безрука, І. Ф. Бойка, Т. К. Вінцюка, В. О. Власенка, Я. П. Драгана, В. М. Кичака, Ю. П. Кунченка, Б. Г. Марченка, В. А. Омельченка, Л. С. Сікори, В. А. Тихонова, Я. Д. Ширмана, М. І. Шлезінгера, М. О. Шутка, Л. М. Щербака, І. М. Яворського, Н. Van Trees, P. Duvant, S. Kay, A. Kassam, E. Lehman, D. Middleton, B. Picinbono, та інших фахівців [2]–[5].

Ефективним шляхом вирішення проблеми вдосконалення процесів обробки інформації в системах виявлення і розрізнення сигналів є створення відповідних методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Проблеми, які виникають під час вдосконалення систем цього класу, пов'язані зі створенням досконалих методів обробки сигналів, які є випадковими процесами. Використання традиційного підходу до дослідження і розробки систем обробки випадкових негаусових процесів характеризується суттєвими обмеженнями, пов'язаними зі складністю їхньої алгоритмічної реалізації, зростанням обчислювальних ресурсів, що призводить до труднощів у створенні якісних програмно-алгоритмічних та апаратних засобів обробки сигналів.

Дослідження останніх років свідчать про те, що для розв'язання задач обробки негаусових процесів перспективним є інший підхід, який для опису статистичних властивостей випадкових величин використовує моменти і кумулянти (семіваріанти) — статистики вищих порядків (higher order statistics), та дозволяє з прийнятним наближенням характеризувати статистичні властивості негаусових процесів [6], [7]. Зокрема, кумулянти та кумулянтні коефіцієнти, на відміну від моментів, мають самостійний статистичний зміст і дають можливість описувати ступінь негаусового розподілу випадкових величин. Такий підхід дозволяє підвищити точність обробки негаусових сигналів порівняно з традиційним кореляційним підходом за заданих обмежень на їхню складність, зменшити складність алгоритмів виявлення і розрізнення сигналів, реалізувати обробку сигналів за адитивно-мультиплікативної взаємодії з негаусовими завадами, врахувати кореляційні зв'язки негаусових випадкових величин. Такий підхід дозволяє охарактеризувати статистичні властивості негаусових процесів з прийнятним наближенням та підвищити точність обробки негаусових процесів в порівнянні з традиційними кореляційними методами [8]—[10]. Статистичні методи обробки сигналів на основі статистик вищих порядків знаходять своє широке застосування для побудови систем прийому даних по зашумлених каналах зв'язку, де застосування традиційних методів є ускладненим [11]—[14].

*Мета роботи* — підвищення ефективності систем прийому даних із розрізненням RZ-сигналів на фоні негаусових завад, із застосуванням моментно-кумулянтного представлення випадкових величин з формуванням моментного критерію якості перевірки статистичних гіпотез та поліноміальних розв'язувальних правил (РП).

### Постановка задачі

Нехай на інтервалі спостереження  $(0—T)$  спостерігаються випадкові сигнали  $\xi_i(t)$ ,  $i = 0, 1, 2$ , які є адитивною сумішшю постійних корисних сигналів  $a_1$  та  $a_2$  з  $\eta(t)$  — асиметричною негаусовою завадою з нульовим математичним очікуванням та дисперсією  $\chi_2$ :  $\xi_0(t) = \eta(t)$ ,  $\xi_1(t) = a_1 + \eta(t)$ ,  $\xi_2(t) = -a_2 + \eta(t)$ ,  $i = 1, 2$ . З випадкових сигналів  $\xi_i(t)$ ,  $i = 0, 1, 2$  отримуємо вектор вибіркового значень  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , за результатами обробки якого необхідно ухвалити рішення про реалізацію гіпотези  $H_1$  або  $H_2$ , що відповідає прийому постійного корисного сигналу  $a_1$  або  $(-a_2)$  відповідно, або рішення про реалізацію гіпотези  $H_0$ , що характеризує наявність адитивної негаусової завади. Кожному прийнятому сигналу відповідає моментно-кумулянтний опис, представлений у вигляді кінцевої послідовності моментів  $m_i \left[ \{0, \gamma_{i2}, \gamma_{i3}, \dots, \gamma_{ij}\} \right]$ , де  $\gamma_{i3}, \dots, \gamma_{ij}$  — кумулянтні коефіцієнти, які описують ознаки негаусової завади  $\eta(t)$ .

### Моделі та методи розрізнення RZ-сигналів на фоні негаусових завад

Для обробки вектора вибіркового значень  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  пропонується використовувати розв'язувальні правила (РП), які представлено у вигляді стохастичних поліномів на основі розкладання логарифма відношення правдоподібності [11], [13]

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln \frac{P(X/H_1)}{P(X/H_0)} = \sum_{v=1}^n \ln \frac{P_v(x_v/H_1)}{P_v(x_v/H_0)}$$

в ряд

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_0 + \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^{\infty} k_{iv} \phi_i(x_v), \quad (1)$$

де функціями  $\phi_i(x_v)$  — перетворення вибірових значень  $x_v$ , які можуть бути степеневими або тригонометричними функціями,  $k_{iv}$  і  $k_0$  — невідомі коефіцієнти, вибрані за відповідним критерієм якості. Окрім того, якщо функції  $\phi_i(x)$  є лінійно незалежними, що утворюють базис, то для широкого класу функцій  $f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  можливий розклад у вигляді ряду (1).

На практиці використовуються не нескінченні ряди (1), а поліноми з кінцевою кількістю членів. Тоді

$$f(X)_{sn} = k_0 + \sum_{i=1}^s \sum_{v=1}^n k_{iv} \phi_i(x_v), \quad (2)$$

де  $x_v$  є випадковими величинами, будемо називати узагальненим стохастичним поліномом степеня  $S$  розмірності  $n$ .

Стохастичний поліном (2), як функція від вибірових значень, є функцією від відношення правдоподібності, яку можна використовувати у вигляді РП для перевірки статистичних гіпотез. У випадку використання степеневих перетворень вибірових значень РП для однаково розподілених випадкових величин набуде вигляду

$$\Lambda(X)_{sn} = k_0 + \sum_{i=1}^s k_i \sum_{v=1}^n x_v^i \underset{H_r}{\overset{H_m}{>}} 0, \quad (3)$$

де невідомі коефіцієнти отримано з умови мінімуму моментного критерію якості вибору РП — критерію верхньої границі ймовірностей помилок  $Ku(E, G)$ , який відображає ймовірності помилок першого ( $\alpha$ ) і другого ( $\beta$ ) роду РП:

$$Ku(E, G) = \frac{G_{0(sn)} + G_{1(sn)}}{\left(E_{1(sn)} - E_{0(sn)}\right)^2}, \quad (4)$$

де  $E_{i(sn)}$ ,  $G_{i(sn)}$  — математичне сподівання і дисперсія РП степеня  $S$  за гіпотези  $H_i$ ,  $i = 0, 1$ , які в загальному вигляді для вибірових значень обсягом  $n$  набудуть вигляду

$$E_{0(sn)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s k_{iv} u_i, \quad E_{1(sn)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s k_{iv} m_i, \quad (5)$$

$$G_{0(sn)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s k_{iv} k_{jv} F_{(i,j)v}(H_0), \quad G_{1(sn)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s k_{iv} k_{jv} F_{(i,j)v}(H_1). \quad (6)$$

У виразах (5) та (6)  $m_i, u_i$  — початкові моменти  $i$ -го порядку за гіпотези  $H_1$  і  $H_0$  відповідно

$$F_{(i,j)v}(H_0) = u_{(i+j)v} - u_{iv} u_{jv}, \quad F_{(i,j)v}(H_1) = m_{(i+j)v} - m_{iv} m_{jv}.$$

Для розв'язання поставленої задачі перевірки трьох гіпотез  $H_i$ ,  $i = 0, 1, 2$  адаптуємо РП (3). Тоді РП для перевірки гіпотез  $m$  та  $r$  запишеться як [13]

$$\Lambda(\mathbf{X})_{sn}^{(mr)} = \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} \sum_{v=1}^n x_v^i + k_0^{(mr)} \underset{H_r}{\overset{H_m}{>}} 0, \quad r, m = \overline{0, 2}, r \neq m, \quad (7)$$

де невідомий коефіцієнт  $k_0^{(mr)}$  вибирається як середнє значення математичних очікувань  $E_m^{(mr)}$  і  $E_r^{(mr)}$  РП за реалізації гіпотези  $H_m$  і  $H_r$  відповідно та має вигляд

$$k_0^{(mr)} = -\frac{1}{2} \left( E_m^{(mr)} + E_r^{(mr)} \right) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} \sum_{v=1}^n \left( m_i^{(m)} + m_i^{(r)} \right), \quad m, r = \overline{0, 2}, m \neq r. \quad (8)$$

Оптимальні коефіцієнти РП (7)  $k_i^{(mr)}$  знаходяться з мінімуму функціонала критерію верхніх границь ймовірності помилок [13], який для поставленої задачі буде відрізнятися від (4) та набуде вигляду

$$Ku(E, G)^{(mr)} = \frac{G_m^{(mr)} + G_r^{(mr)}}{\left[ E_m^{(mr)} - E_r^{(mr)} \right]^2}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r, \quad (9)$$

де  $G_m^{(mr)}$ ,  $G_r^{(mr)}$  — дисперсія РП (1),  $E_m^{(mr)}$ ,  $E_r^{(mr)}$  — математичне очікування РП (1) за гіпотез  $H_m$  і  $H_r$  відповідно і мають такий вигляд:

$$E_m^{(mr)} = n \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} m_i^{(m)}; \quad E_r^{(mr)} = n \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} m_i^{(r)}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r; \quad (10)$$

$$G_m^{(mr)} = n \sum_{i=s}^s \sum_{j=1}^s k_i^{(mr)} k_j^{(mr)} F_{(i,j)}^{(m)}; \quad G_r^{(mr)} = n \sum_{i=s}^s \sum_{j=1}^s k_i^{(mr)} k_j^{(mr)} F_{(i,j)}^{(r)}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r, \quad (11)$$

де  $m_i^{(r)}$ ,  $m_i^{(m)}$  — початкові моменти  $i$ -го порядку випадкової величини  $\xi(t)$  за гіпотез  $H_m$  і  $H_r$  відповідно;  $F_{(i,j)}^{(r)}$ ,  $F_{(i,j)}^{(m)}$  — центровані корелянти випадкової величини  $\xi(t)$   $(i, j)$ -го порядку за гіпотез  $H_m$  і  $H_r$  відповідно. Система рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів  $k_i^{(mr)}$  РП (7) знаходиться з мінімуму функціонала (9), що відповідає мінімуму верхніх границь ймовірності помилок РП і має вигляд

$$\sum_{i=1}^n k_j^{(mr)} \left[ F_{(i,j)}^{(r)} + F_{(i,j)}^{(m)} \right] = m_i^{(m)} - m_i^{(r)}, \quad i = \overline{1, s}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r. \quad (12)$$

Проведемо синтез алгоритмів розрізнення RZ-сигналів на фоні негаусових завад для степеня полінома  $S = 1, 2$ . Початкові моменти до 4-го порядку для сигналу  $\xi_0(t)$  у разі реалізації гіпотези  $H_0$  матимуть вигляд

$$m_1^{(0)} = 0; \quad m_2^{(0)} = \chi_2; \quad m_3^{(0)} = \gamma_3 \chi_2^{3/2}; \quad m_4^{(0)} = 3\chi_2^2,$$

де  $\gamma_3$  — коефіцієнт асиметрії завади.

Початкові моменти до 4-го порядку для сигналу  $\xi_1(t)$  у разі реалізації гіпотези  $H_1$  матимуть вигляд

$$m_1^{(1)} = a_1; \quad m_2^{(1)} = a_1^2 + \chi_2; \quad m_3^{(1)} = a_1^3 + 3a_1 \chi_2 + \gamma_3 \chi_2^{3/2}; \quad m_4^{(1)} = a_1^4 + 6a_1^2 \chi_2 + 4a_1 \gamma_3 \chi_2^{3/2} + 3\chi_2^2.$$

Початкові моменти до 4-го порядку для сигналу  $\xi_2(t)$  за реалізації гіпотези  $H_2$  матимуть вигляд

$$m_1^{(2)} = -a_2; \quad m_2^{(2)} = a_2^2 + \chi_2; \quad m_3^{(2)} = -a_2^3 - 3a_2 \chi_2 + \gamma_3 \chi_2^{3/2}; \quad m_4^{(2)} = a_2^4 + 6a_2^2 \chi_2 + 4a_2 \gamma_3 \chi_2^{3/2} + 3\chi_2^2.$$

Центровані корелянти визначаються з виразу  $F_{(k,j)}^{(i)} = m_{(k+j)}^{(i)} - m_k^{(i)} m_j^{(i)}$ ,  $i = \overline{0, 2}$  у разі реалізації гіпотез  $H_0, H_1, H_2$  матимуть вигляд відповідно

$$F_{(1,1)}^{(0)} = \chi_2; \quad F_{(1,2)}^{(0)} = F_{(2,1)}^{(0)} = \chi_2^{3/2} \gamma_3; \quad F_{(2,2)}^{(0)} = 2\chi_2^2;$$

$$F_{(1,1)}^{(1)} = \chi_2; \quad F_{(1,2)}^{(1)} = F_{(2,1)}^{(1)} = 2\sqrt{p_1} \chi_2^{3/2} + \gamma_3 \chi_2^{3/2}; \quad F_{(2,2)}^{(1)} = 2\chi_2^2 + 4p_1 \chi_2^2 + 4\sqrt{p_1} \gamma_3 \chi_2^2;$$

$$F_{(1,1)}^{(2)} = \chi_2; \quad F_{(1,2)}^{(2)} = F_{(2,1)}^{(2)} = -2\sqrt{p_1} \chi_2^{3/2} + \gamma_3 \chi_2^{3/2}; \quad F_{(2,2)}^{(2)} = 2\chi_2^2 + 4p_1 \chi_2^2 - 4\sqrt{p_1} \gamma_3 \chi_2^2,$$

де  $p_i = a_i^2 / \chi_2$ ,  $i = 1, 2$  — відношення потужності корисного сигналу  $a$  до дисперсії адитивної негаусової завади  $\chi_2$ .

Побудуємо нелінійні РП зі степенем полінома  $S = 1$ , які в загальному випадку мають вигляд

$$\Lambda(\mathbf{X})_{1n}^{(i0)} = k_1^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v + k_0^{(i0)} \underset{H_0}{>} 0, \quad i = 1, 2; \quad (13)$$

$$\Lambda(\mathbf{X})_{1n}^{(21)} = k_1^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v + k_0^{(21)} \underset{H_1}{>} 0.$$

Тоді для розв’язання поставленої задачі про ухвалення рішення про реалізацію однієї з гіпотез наведемо такі системи рівнянь.

Таблиця 1

Системи рівнянь, які виконуються при реалізації однієї з гіпотез

Реалізація гіпотези $H_1$	Реалізація гіпотези $H_2$	Реалізація гіпотези $H_0$
$\begin{cases} \Lambda(X)^{(i0)} > 0, \\ \Lambda(X)^{(21)} < 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \Lambda(X)^{(20)} > 0, \\ \Lambda(X)^{(21)} > 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \Lambda(X)^{(i0)} < 0, \\ \Lambda(X)^{(20)} < 0 \end{cases}$

де  $\Lambda(X)^{(i0)}$ ,  $\Lambda(X)^{(20)}$  — розв’язувальні функції перевірки гіпотез  $H_1$  і  $H_2$  проти  $H_0$  відповідно,  $\Lambda(X)^{(21)}$  — розв’язувальна функція перевірки однієї з двох гіпотез  $H_2$  або  $H_1$ .

Невідомі коефіцієнти  $k_1^{(i0)}$  для РП (13) визначаються з системи рівнянь (12), де поріг  $k_0^{(21)}$  і  $k_0^{(i0)}$  визначаються згідно з (8). Математичне очікування і дисперсія РП (13), згідно з (10) та (11), набудуть вигляду

$$k_0^{(i0)} = -\frac{p_i}{4}; \quad k_0^{(21)} = \frac{1}{4}(p_1 - p_2); \quad k_1^{(i0)} = \frac{\sqrt{p_i}}{2\sqrt{\chi_2}}; \quad k_1^{(21)} = -\frac{\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}}{2\sqrt{\chi_2}}; \quad E_0^{(i0)} = 0; \quad E_1^{(i0)} = \frac{p_i}{2};$$

$$E_1^{(21)} = -\frac{1}{2}\sqrt{p_1}(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}); \quad E_2^{(21)} = \frac{1}{2}(\sqrt{p_1}\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}); \quad G_0^{(i0)} = G_1^{(i0)} = G_2^{(i0)} = \frac{p_i}{4};$$

$$G_1^{(21)} = G_2^{(21)} = \frac{1}{4}(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2, \quad i = 1, 2.$$

Для оцінки ефективності синтезованих алгоритмів скористаємося виразом, який характеризує кількість здобутої інформації про розрізнення гіпотез РП (13) і є зворотною величиною критерію якості, та набуває вигляду

$$I_{(E,G)sn}^{(mr)} = \frac{1}{Ku(E,G)^{(mr)}} = E_m^{(mr)} - E_r^{(mr)}; \quad m, r = \overline{0,2}, \quad m \neq r;$$

$$I_{ln} = I_{(E,G)sn}^{(i0)} + I_{(E,G)sn}^{(20)} + I_{(E,G)sn}^{(21)} = (p_1 + \sqrt{p_1}\sqrt{p_2} + p_2). \quad (14)$$

Отримані РП вигляду (13) є лінійними, збігаються з добре відомими результатами для гаусових моделей випадкових процесів і не враховують особливості негаусового розподілу досліджуваних величин. Тому збільшимо степінь поліному РП до  $S = 2$ , де виникає можливість описати досліджувані негаусові процеси.

Проведемо побудову нелінійних РП зі степенем полінома  $S = 2$ , які в загальному випадку мають вигляд

$$\Lambda(\mathbf{X})_{2n}^{(i0)} = k_1^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v + k_2^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v^2 + k_0^{(i0)} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} H_i \\ H_0 \end{matrix} \quad i = 1, 2;$$

$$\Lambda(\mathbf{X})_{2n}^{(21)} = k_1^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v + k_2^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v^2 + k_0^{(21)} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} H_2 \\ H_1 \end{matrix}. \quad (15)$$

Невідомі коефіцієнти для РП (15) визначаються з системи рівнянь (12) та мають вигляд

$$k_0^{(i0)} = -\frac{p_i(2 + p_i) + 2\sqrt{p_i}\gamma_3}{4(2 + p_i + \gamma_3^2)}; \quad k_2^{(i0)} = -\frac{\sqrt{p_i}\gamma_3}{2\sqrt{\chi_2}(2 + p_i - \gamma_3^2)}, \quad i = 1, 2;$$

$$k_1^{(i0)} = \frac{\sqrt{p_1}(2 + p_1) + p_1\gamma_3}{2\sqrt{\chi_2}(2 + p_1 - \gamma_3^2)}; \quad k_1^{(20)} = \frac{-\sqrt{p_2}(2 + p_2) + p_2\gamma_3}{2\sqrt{\chi_2}(2 + p_2 - \gamma_3^2)};$$

$$k_0^{(21)} = \frac{\left( (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \left( (2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2) (\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2}) - 2(1 + \sqrt{p_1} \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right) \right)}{4 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)};$$

$$k_1^{(21)} = \frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 + (\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right)}{2 \sqrt{\chi_2} \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)}; \quad k_2^{(21)} = \frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \gamma_3}{2 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right) \chi_2}.$$

Математичне очікування і дисперсія РП (15), згідно з (10) та (11), набудуть такого вигляду:

$$E_0^{(10)} = -\frac{\sqrt{p_1} \gamma_3}{2(2 + p_1 - \gamma_3^2)}; \quad E_1^{(10)} = \frac{p_1(2 + p_1) - \sqrt{p_1} \gamma_3}{2(2 + p_1 - \gamma_3^2)}; \quad E_0^{(20)} = \frac{\sqrt{p_2} \gamma_3}{2(2 + p_2 - \gamma_3^2)};$$

$$E_1^{(20)} = \frac{p_2(2 + p_2) + \sqrt{p_2} \gamma_3}{2(2 + p_2 - \gamma_3^2)}; \quad E_1^{(21)} = -\frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \left( (2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2) \sqrt{p_1} - (1 + \sqrt{p_1} \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right)}{2 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)};$$

$$E_2^{(21)} = E_1^{(21)} = \frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \left( (2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2) \sqrt{p_1} + (1 + \sqrt{p_1} \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right)}{2 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)}; \quad G_0^{(10)} = \frac{p_1(2 + p_1 + 2\sqrt{p_1} \gamma_3)}{4(2 + p_1 - \gamma_3^2)};$$

$$G_1^{(10)} = \frac{p_1(2 + p_1 - 2\sqrt{p_1} \gamma_3)}{4(2 + p_1 - \gamma_3^2)}; \quad G_0^{(20)} = \frac{p_2(2 + p_2 - 2\sqrt{p_2} \gamma_3)}{4(2 + p_2 - \gamma_3^2)}; \quad G_2^{(20)} = \frac{p_2(2 + p_2 + 2\sqrt{p_2} \gamma_3)}{4(2 + p_2 - \gamma_3^2)};$$

$$G_1^{(21)} = \frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - 2(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right)}{4 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)};$$

$$G_2^{(21)} = \frac{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 + 2(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2}) \gamma_3 \right)}{4 \left( 2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3^2 \right)}.$$

Для якісної оцінки ефективності синтезованих алгоритмів скористаємося виразом (14), який матиме вигляд

$$I_{2n} = \frac{1}{2} \left( \frac{p_1(2 + p_1)}{2 + p_1 - \gamma_3} + \frac{(2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2) (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2}{2 + (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2 - \gamma_3} + \frac{p_2(2 + p_2)}{2 + p_2 - \gamma_3} \right). \quad (16)$$

Синтезовані РП (13) зі степенем полінома  $S = 1$  є системою рівнянь перевірки гіпотез  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{21}$ , які не враховують негаусовий розподіл досліджуваних випадкових процесів. Зі збільшенням степені полінома до  $S = 2$  використовуються початкові моменти 3-го та 4-го порядків, що дає можливість врахувати негаусові параметри досліджуваних випадкових процесів, зокрема для такої постановки задачі постановки задачі з коефіцієнтом асиметрії завади  $\gamma_3$ .

### Аналіз отриманих результатів

Для оцінки ефективності отриманих результатів різними РП зі степенем полінома  $S = 1$  та  $S = 2$  можна скористатися виразом (9), який характеризує ймовірність помилок першого та другого роду отриманих РП, або величиною, яка є зворотною цьому функціоналу — кількість добутої інформації про розрізнення гіпотез.

На рис. 1 показана залежність відношення кількості отриманої інформації  $I_1$  (8) про розрізнення трьох гіпотез РП для гаусової моделі завади ( $S = 1$ ) до кількості отриманої інформації  $I_2$  (16) ( $S = 2$ ) про розрізнення трьох гіпотез РП для негаусової асиметричної моделі завади від коефіцієнта асиметрії  $\gamma_3$ , де  $p_i = a^2/\chi_2$ ,  $i = 1, 2$  — відношення потужності корисного сигналу до потужності завади.

З графіків рис. 1 видно, що для гаусової моделі завод ( $\gamma_3 = 0$ ) нелінійна обробка РП зі степенем полінома  $S = 2$  не дає виграшу у зменшенні ймовірності помилкових рішень (відношення  $I_{1n}/I_{2n} = 1$ ). Разом з тим, врахування негаусової характеристики досліджуваних процесів у вигляді коефіцієнта асиметрії ( $\gamma_3 \neq 0$ ) дозволяє збільшити кількість отриманої інформації за нелінійної обробки вибірових значень ( $S = 2$ ) у порівнянні з добре відомими результатами для гаусових моделей ( $S = 1$ ). Так, до прикладу, для кривої 3 і  $\gamma_3 = 1,1$  ефективність в зменшенні ймовірності помилкових рішень для нелінійної обробки виявлення RZ-сигналів збільшиться в 2 рази у порівнянні з відомими результатами для гаусових моделей досліджуваних випадкових процесів.

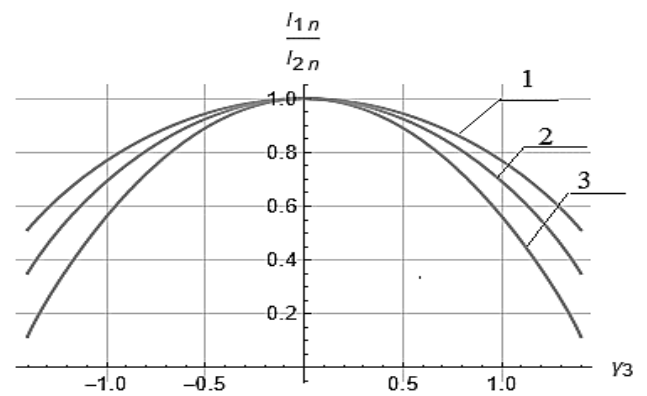


Рис. 1. Залежність кількості добутої інформації про розрізнення гіпотез від коефіцієнта асиметрії  $\gamma_3$  за таких параметрів: 1 —  $p_1 = p_2 = 1$ ; 2 —  $p_1 = p_2 = 0,5$ ; 3 —  $p_1 = p_2 = 0,1$

За результатами синтезу та аналізу алгоритмів розрізнення RZ-сигналу на фоні асиметричних негаусових завод проведено імітаційне моделювання системи розрізнення сигналів із застосуванням віртуального середовища SIMULINK, результати якого показані на рис. 2.

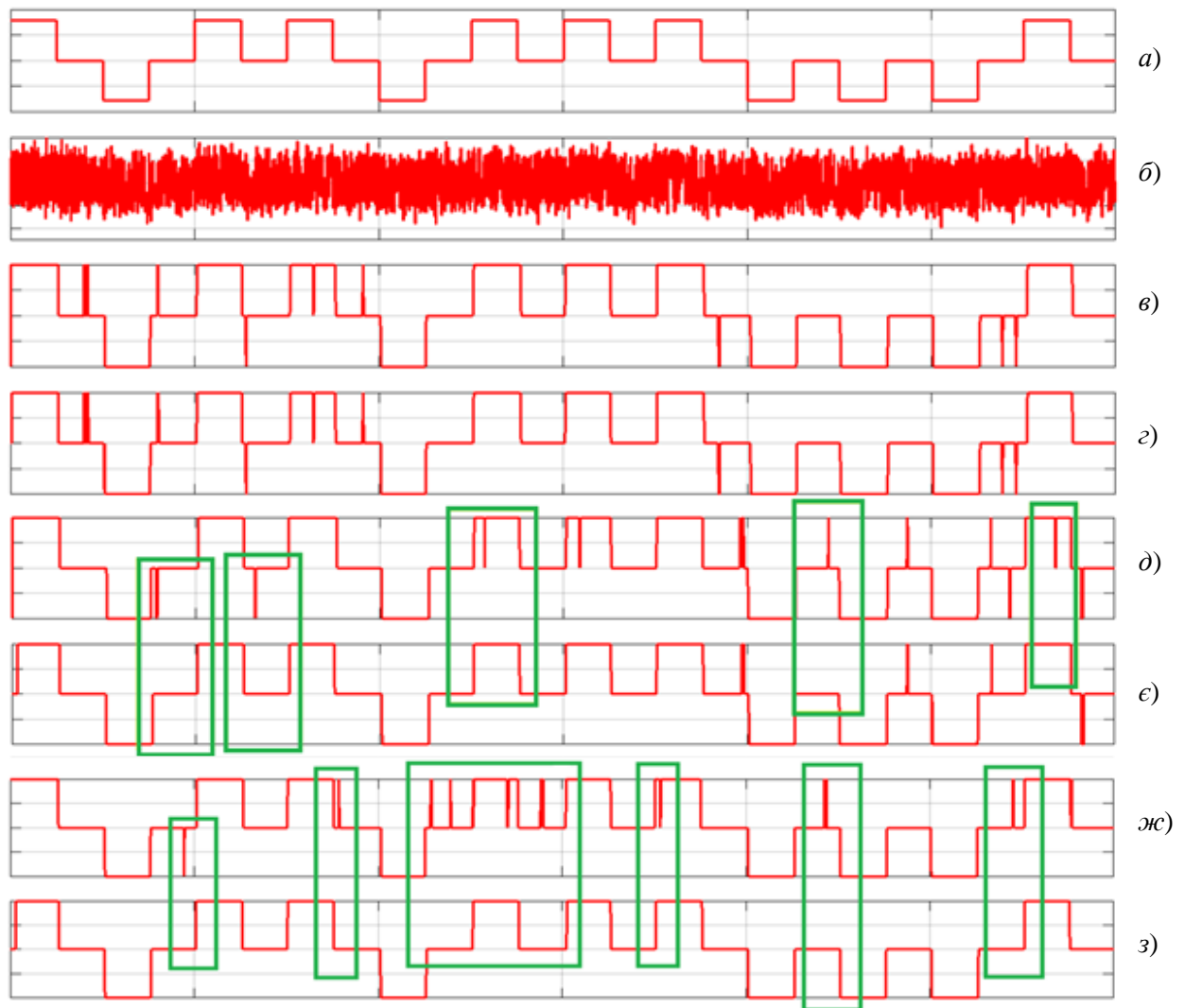


Рис. 2. Результати моделювання системи розрізнення RZ-сигналів на фоні асиметричних негаусових завод: а — корисне повідомлення (RZ-сигнали); б — адитивна суміш RZ-сигналів та негаусової асиметричної заводи; в, д, ж — результати обробки поліноміальними РП, якщо  $S = 1$  (13); результати обробки сигналів поліноміальними РП, якщо  $S = 2$  (15) за умови  $p_1 = p_2 = 0,1$ ; г —  $\gamma_3 = 0$ ; е —  $\gamma_3 = 1$ ; з —  $\gamma_3 = 1,4$

Моделювання проводилося за різних параметрів завади, а саме за різних коефіцієнтів симетрії  $\gamma_3$  та  $p_1$  і  $p_2$ . З отриманих осцилограм видно, що врахування негаусової характеристики досліджуваних процесів, а саме коефіцієнта асиметрії дозволяє підвищити ефективність роботи системи розрізнення RZ-сигналів на фоні асиметричних негаусових завад. Як видно з результатів імітаційного моделювання, кількість помилкових рішень про виявлення відповідного зашумленого оригінального повідомлення зменшується у разі нелінійної обробки вибіркового значення ( $S = 2\sigma, \epsilon, \varepsilon$ ) порівняно з результатами обробки для гаусових моделей досліджуваних випадкових процесів ( $S = 1\sigma, \delta, \delta$ ).

### Висновки

Запропонований метод обробки адитивної суміші біполярних дискретних RZ-сигналів на фоні асиметричних негаусових завад є ефективнішим порівняно з відомими алгоритмами, які не враховують тонкої структури досліджуваних випадкових процесів. Проведені дослідження демонструють збільшення кількості добутої інформації про розрізнення гіпотез у разі врахування коефіцієнта асиметрії негаусової завади, що свідчить про зменшення ймовірностей помилок таких РП і підвищення ефективності функціонування системи розрізнення сигналів в цілому. Застосування запропонованого методу та синтезованих алгоритмів сприяє збільшенню завадостійкості системи передачі та прийому біполярних дискретних RZ-сигналів в ІВС, що підтверджено результатами моделювання в середовищі SIMULINK.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. A. Mahmoud, and Ahmed Nabih Zaki Rashed, "Hybrid NRZ/RZ line coding scheme based hybrid FSO/FO dual," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer*, vol. 22, no. 2, pp. 866-873, May 2021.
- [2] D. Middleton, *Non-Gaussian Statistical Communication Theory*, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part IV: Optimum Array Processing*, John Wiley, 2002.
- [4] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, і В. М. Кичак, *Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016, 168 с.
- [5] В. М. Безрук, и Г. М. Певцов, *Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля*, моногр. Харьков, Украина: Коллегиум, 2007, 430 с.
- [6] A. K. Nandi. *Blind Estimation Using Higher-Order Statistics*, Springer-Verlag, 1999.
- [7] P. Chevalier, and B. Picinbono, "Complex linear-quadratic systems for detection and array processing," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 44, no. 10, pp. 2631-2634, 1996.
- [8] Y. Kunchenko, *Polynomial Parameter Estimations of Close to Gaussian Random Variables*, Aachen: Shaker Verlag, 2002.
- [9] Y. Kunchenko, *Stochastic Polynomial*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2006.
- [10] V. Beregun, and A. Krasilnikov, "The use of cumulant methods for distinction of diagnostic signals with gamma distribution," in 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 741-746.
- [11] E. Palahina, M. Gamcová, I. Gladisova, J. Gamec, and V. Palahin, "Signals Detection in Correlated non-Gaussian Noise Using Higher-Order Statistics," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, no. 37(4), pp. 1704-1723, 2018.
- [12] L. Vokorokos, S. Marchevisky, A. Ivchenko, E. Palahina, and V. Palahin, "Parameters Estimation of Correlated non-Gaussian processes by the Method of Polynomial Maximization.," *Submitted to IET Signal Processing*, vol. 11, issue 3, pp. 313-319, May 2017.
- [13] В. В. Палагін, О. А. Палагіна, і О. С. Зорін, «Комп'ютерне моделювання системи обробки шумових сигналів на фоні негаусових завад,» *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, зб. наук. праць. Кам.-Подільський нац. ун-т ім. Івана Огієнка, вип. 16, с. 104-113, 2017.
- [14] D. Smirnov, V. Cherynoga, O. Zorin, A. Honcharov, E. Palahina, and V. Palahin, "The Methods of Joint Signal Discrimination and Parameters Estimation in non-Gaussian Noise," *IEEE 4-th International Conference on Advanced Trends in Information Theory – 2022*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 23-27.

Рекомендована кафедрою інфокомунікаційних систем і технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 06.07.2023

**Палагін Володимир Васильович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри робототехнічних і телекомунікаційних систем та кібербезпеки, e-mail: palahin@ukr.net ;

**Зорін Олександр Сергійович** — аспірант кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, e-mail: snjzrin@gmail.com .

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси



## Models and Methods of RZ-Signal Distinction for Information-Measuring Systems in Asymmetric Non-Gaussian Noise

<sup>1</sup>Cherkasy State Technological University

*The paper considers a new method of statistical processing of RZ-signals against the background of asymmetric non-gaussian noise. To solve the problem of processing discrete RZ-signals against the background of asymmetric non-gaussian noise, polynomial solving rules (SR) were synthesized. At the degree of a polynomial  $S = 1$ , SR represent a system of hypothesis testing rules that do not take into account the non-Gaussian distribution of the studied random processes. When increasing the degree of the polynomial to  $S = 2$ , the initial moments of the 3-rd and 4-th orders are used, which makes it possible to take into account the non-Gaussian parameters of the studied random processes, in particular for the formulation of the problem in the form of an asymmetry coefficient. This approach makes it possible to take into account the fine structure of non-Gaussian processes and reduces the probability of SR errors in comparison with the known results. On the basis of a new method of statistical signal processing for data reception, a Simulink-model of the system was developed and its functioning was simulated for SR and  $S = 1.2$  and different values of signal-to-noise ratio. It is shown that when taking into account the coefficient of asymmetry of non-Gaussian interference, the efficiency of signal reception increases for  $S = 2$  when compared with known results, which are optimal for the Gaussian interference model with  $S = 1$ . The suggested method of processing the additive mixture of the bipolar discrete RZ-signals on the background of asymmetric non-Gaussian interference, receiving data in telecommunication systems is more efficient as compared with the known methods due to non-linear statistical processing of signals and taking into account the fine structure of the investigated non-Gaussian random processes. The conducted studies demonstrate the decrease of the number of erroneous decisions in the process of RZ-signals reception, taking into account the coefficient of asymmetry of non-Gaussian noise, which indicates the increase of the efficiency of the data reception system operation.*

**Keywords:** RZ-signals, instantaneous quality criterion, non-Gaussian noise.

**Palahin Volodymyr V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Robotics and Telecommunication Systems and Cyber Security, e-mail: palahin@ukr.net ;

**Zorin Oleksandr S.** — Post-Graduate Student of the Chair of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies, e-mail: snjzrin@gmail.com