

УДК 621.37:621.391

В. В. Палагін, д-р техн. наук, професор,**О. А. Палагіна**, канд. техн. наук,**О. С. Зорін**, аспірант

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ШУМОВИХ СИГНАЛІВ НА ФОНІ НЕГАУСОВИХ ЗАВАД

Проведено моделювання системи зв'язку з застосуванням шумових сигналів при модуляції параметрів негаусових випадкових процесів. Синтезовані алгоритми обробки шумових сигналів при застосуванні поліноміальних розв'язувальних правил, оптимальних по моментному критерію якості верхніх границь ймовірності помилок. Запропоновані нові математичні моделі шумових сигналів, розроблені методи та алгоритми їх обробки. Проведено моделювання системи зв'язку у віртуальному середовищі Simulink, наданий аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: *стохастичні поліноми, моментний критерій якості, розрізнення шумових сигналів, 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 якості обробки інформації, зростанням рівня складності. Проблеми, які виникають при вдосконаленні систем цього класу, пов'язані зі створенням досконалих методів обробки сигналів, що являють собою випадкові процеси.

Одним із перспективних напрямків побудови систем зв'язку є використання шумових сигналів [1–2], які отримали застосування в широкосмугових системах зв'язку, характеризуються високою заводостійкістю, дозволяють організувати одночасну роботу багатьох абонентів в загальній смузі частот, забезпечують сумісність передачі інформації з виміром параметрів руху об'єкта в системах рухомого зв'язку, забезпечують електромагнітну сумісність з вузькосмуговими системами радіозв'язку і радіомовлення, системами телевізійного мовлення, забезпечують краще використання спектра частот на обмеженій території в порівнянні з вузькосмуговими системами зв'язку [3]. На практиці набули застосування системи зв'язку з використанням шумових сигналів з амплітудно-імпульсною модуляцією [4–5], спектральною модуляцією шумового сигналу [6], маніпуляцією спектра шумового сигналу [7] та ін., в яких при статистичній обробці використовують гаусові математичні моделі випадкових процесів, які

з одного боку, є зручною математичною ідеалізацією, а з іншого боку, не відображають тонкої структури реальних природних явищ.

Використання традиційного підходу до дослідження і розробки систем обробки випадкових негаусових процесів характеризується суттєвими обмеженнями, пов'язаними зі складністю їх алгоритмічної реалізації, зростанням обчислювальних ресурсів, що призводить до відповідних труднощів при створенні якісних програмно-алгоритмічних та апаратних засобів обробки сигналів.

Дослідження останніх років свідчать про те, що при розв'язанні задач обробки негаусових процесів перспективним є інший підхід, який для опису статистичних властивостей випадкових величин використовує моменти і кумулянти та дозволяє з прийнятним наближенням характеризувати статистичні властивості негаусових процесів [8–10].

На основі моментно-кумулянтного опису випадкових процесів для побудови системи зв'язку з застосуванням шумових сигналів використано підхід, який базується на модуляції параметрів негаусових випадкових процесів з подальшою їх передачею і обробкою поліноміальними розв'язувальними правилами, оптимальними за моментним критерієм якості верхньої границі ймовірності помилок, який добре себе зарекомендував при розв'язанні ряду задач [11–13].

Мета роботи полягає у створенні та реалізації моделей передачі даних шумовими сигналами на основі моментно-кумулянтного опису випадкових величин, поліноміальних розв'язувальних правил для побудови ефективних методів і комп'ютерних засобів функціонування систем прийому та обробки даних.

Постановка задачі: Нехай на відліку часу $(0, T)$ спостерігаються випадкові сигнали $\xi_i(t)$, $i = \overline{0, 2}$, за результатами обробки яких необхідно прийняти рішення про реалізацію гіпотез H_1 та H_2 , що відповідає прийому шумового сигналу $\Delta^{(i)}(t)$ (передача логічного рівня «0» або «1»), який підлягає розрізненню, або рішення про реалізацію гіпотези H_0 , що характеризує наявність адитивної завади. Сигнали $\xi_i(t)$ являють собою адитивну суміш $\xi_i(t) = \Delta^{(i)}(t) + \eta(t)$, де $\eta(t)$ — негаусова завада з нульовим математичним очікуванням та дисперсією χ_2 . Кожному сигналу, який приймається, відповідає моментно-кумулянтний опис, представлений у вигляді кінцевої послідовності моментів $m_i \left[\{0, \mu_{i2}, \beta_{i3}, \dots, \beta_{il}\}, \{0, \chi_{i2}, \gamma_{i3}, \dots, \gamma_{il}\} \right]$, де $\beta_{i3}, \dots, \beta_{il}$ — кумулянтні коефіцієнти, які описують ознаки шумового негаусового сигналу $\Delta^{(i)}(t)$, $\gamma_3, \dots, \gamma_l$ — кумулянтні коефіцієнти, які описують ознаки негаусової завади $\eta(t)$.

Синтез і аналіз розв'язувальних правил розрізнення шумових сигналів на фоні негаусових завад. Для розв'язання поставленої задачі скористаємося стохастичним поліноміальним розв'язувальним правилом (РП) загального вигляду [14]:

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

де невідомий коефіцієнт $k_0^{(mr)}$ обирається як середнє значення математичних очікувань $E_m^{(mr)}$ і $E_r^{(mr)}$ РП при реалізації гіпотези H_m і H_r відповідно та має вид:

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

Оптимальні коефіцієнти РП (1) $k_i^{(mr)}$ знаходяться із мінімуму функціонала критерію верхніх границь ймовірності помилок [12, 13], який для поставленої задачі має вигляд:

$$Ku(E, G)^{(mr)} = \frac{G_m^{(mr)} + G_r^{(mr)}}{\left[E_m^{(mr)} - E_r^{(mr)} \right]^2}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r, \quad (3)$$

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

$$E_m^{(mr)} = n \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} m_i^{(m)}, \quad E_r^{(mr)} = n \sum_{i=1}^s k_i^{(mr)} m_i^{(r)}, \quad (4)$$

$$G_m^{(mr)} = n \sum_{i=s}^s \sum_{j=1}^s k_i^{(mr)} k_j^{(mr)} F_{(i,j)}^{(m)}, \quad G_r^{(mr)} = n \sum_{i=s}^s \sum_{j=1}^s k_i^{(mr)} k_j^{(mr)} F_{(i,j)}^{(r)}, \quad (5)$$

де $m_i^{(r)}$, $m_i^{(m)}$ — початкові моменти i -го порядку випадкової величини ξ при гіпотезах H_m і H_r відповідно, $F_{(i,j)}^{(r)}$, $F_{(i,j)}^{(m)}$ — центровані корелянти випадкової величини ξ (i, j)-го порядку при гіпотезах H_m і H_r відповідно. Система рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів $k_i^{(mr)}$ РП (1) знаходиться із мінімуму функціонала (3), що відповідає мінімуму верхніх границь ймовірності помилок РП і має вигляд:

$$\sum_{j=1}^s k_j^{(mr)} \left[F_{(i,j)}^{(r)} + F_{(i,j)}^{(m)} \right] = m_i^{(m)} - m_i^{(r)}, \quad i = \overline{1, s}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r. \quad (6)$$

Розглянемо задачу, розрізнення двох шумових негаусових сигналів першого типу першого виду [9], які характеризуються змінним коефіцієнтом асиметрії $\beta_3^{(i)}$ ($i = 1, 2$) для передачі дискретної інфор-

мації, та $\beta_j^{(i)} = 0$ при $j \geq 4$ на фоні негаусової завади, яка описується коефіцієнтом асиметрії γ_3 ($\gamma_j = 0$ при $j \geq 4$). У цьому випадку початкові моменти до 6-го порядку для сигналу ξ_0 при реалізації гіпотези H_0 приймуть вигляд:

$$m_1^{(0)} = 0, \quad m_2^{(0)} = \chi_2, \quad m_3^{(0)} = \gamma_3 \chi_2^{3/2}, \quad m_4^{(0)} = 3\chi_2^2, \quad m_5^{(0)} = 10\gamma_3 \chi_2^{5/2}, \\ m_6^{(0)} = (15 + 10\gamma_3^2) \chi_2^3,$$

а центровані корелянти визначаються з виразу $F_{(k,j)}^{(i)} = m_{(k+j)}^{(i)} - m_k^{(i)} m_j^{(i)}$, $i = 0, 2$, і приймуть вигляд:

$$F_{(1,1)}^{(0)} = \chi_2, \quad F_{(1,2)}^{(0)} = F_{(2,1)}^{(0)} = \chi_2^{1,5} \gamma_3, \quad F_{(2,2)}^{(0)} = 2\chi_2^2, \\ F_{(3,2)}^{(0)} = F_{(2,3)}^{(0)} = 9\gamma_3 \chi_2^{2,5}, \quad F_{(3,3)}^{(0)} = \chi_2^3 (9\gamma_3^2 + 15).$$

Відповідно, початкові моменти до 6-го порядку для сигналу ξ_i при реалізації гіпотези H_i ($i = 1, 2$) приймуть вигляд:

$$m_1^{(i)} = 0, \quad m_2^{(i)} = \chi_2 (1 + p_i), \quad m_3^{(i)} = \chi_2^{1,5} (\gamma_3 + p_i^{1,5} \beta_3^{(i)}), \\ m_4^{(i)} = \chi_2^2 (3 + 6p_i + 3p_i^2), \quad m_5^{(i)} = \chi_2^{2,5} (10\gamma_3 + 10p_i\gamma_3 + 10p_i^{1,5} \beta_3^{(i)} + 10\beta_3^{(i)}), \\ m_6^{(i)} = \chi_2^3 (10\gamma_3^2 + 15 + 45p_i + 20p_i^{1,5} \gamma_3 \beta_3^{(i)} + 45p_i^2 + p_i^3 (10(\beta_3^{(i)})^2 + 15)),$$

де $\beta_3^{(i)}$ — коефіцієнт асиметрії шумового сигналу $\Delta^{(i)}$, $p_i = \frac{\mu_2^{(i)}}{\chi_2}$ —

відношення дисперсії $\mu_2^{(i)}$ шумового сигналу $\Delta^{(i)}$ до дисперсії адитивної негаусової завади χ_2 , $i = 1, 2$. При цьому центровані корелянти при реалізації гіпотези H_i приймуть вигляд:

$$F_{(1,1)}^{(i)} = \chi_2 (p_i + 1), \quad F_{(1,2)}^{(i)} = F_{(2,1)}^{(i)} = \chi_2^{1,5} (\gamma_3 + p_i^{1,5} \beta_3^{(i)}), \\ F_{(2,2)}^{(i)} = \chi_2^2 (4p_i + 2p_i^2 + 2), \\ F_{(2,3)}^{(i)} = F_{(3,2)}^{(i)} = \chi_2^{2,5} (10\beta_3 + 9\gamma_3 + 9p_i\gamma_3 + 9p_i^{1,5} \beta_3 - p_i^{2,5} \beta_3), \\ F_{(3,3)}^{(i)} = 15\chi_2^3 + 45p_i\chi_2^2 + 45p_i^2\chi_2^2 + 45p_i^2\chi_2^2 + \\ + 15p_i^3\chi_2^2 + 9p_i^3\chi_2^2(\beta_3^{(i)})^2 + 18p_i^{3/2}\beta_3^{(i)}\chi_2^2\gamma_3 + 9\chi_2^3\gamma_3^2.$$

Неважко показати, що при даній постановці задачі неможливо синтезувати РП при степені полінома $s = 1, 2$, тому покажемо побудову нелінійних РП при степені полінома $s = 3$, які в загальному випадку мають вигляд:

$$\Lambda(\mathbf{X})_{3n}^{(i0)} = k_1^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v + k_2^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v^2 + k_3^{(i0)} \sum_{v=1}^n x_v^3 + k_0^{(i0)} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \\ H_0 \end{matrix}, \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

$$\Lambda(\mathbf{X})_{3n}^{(21)} = k_1^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v + k_2^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v^2 + k_3^{(21)} \sum_{v=1}^n x_v^3 + k_0^{(21)} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \\ H_1 \end{matrix}.$$

Невідомі коефіцієнти для РП знаходяться з рішення системи рівнянь (6), де поріг $k_0^{(21)}$ і $k_0^{(i0)}$ виду (7) знаходиться згідно (2). Математичне очікування і дисперсія РП (7), згідно (4), (5), приймуть вигляд:

$$E_i^{(i0)} = n \left(k_1^{(i0)} m_1^{(i)} + k_2^{(i0)} m_2^{(i)} + k_3^{(i0)} m_3^{(i)} \right),$$

$$E_0^{(i0)} = n \left(k_1^{(i0)} m_1^{(0)} + k_2^{(i0)} m_2^{(0)} + k_3^{(i0)} m_3^{(i)} \right),$$

$$G_i^{(i0)} = n \left\{ \left(k_1^{(i0)} \right)^2 F_{(1,1)}^{(i)} + 2k_1^{(i0)} k_2^{(i0)} F_{(1,2)}^{(i)} + k_1^{(i0)} k_3^{(i0)} F_{(1,3)}^{(i)} + \left(k_2^{(i0)} \right)^2 F_{(2,2)}^{(i)} + 2k_2^{(i0)} k_3^{(i0)} F_{(2,3)}^{(i)} + k_3^{(i0)} k_1^{(i0)} F_{(3,1)}^{(i)} + \left(k_3^{(i0)} \right)^2 F_{(3,3)}^{(i)} \right\},$$

$$G_0^{(i0)} = n \left\{ \left(k_1^{(i0)} \right)^2 F_{(1,1)}^{(0)} + 2k_1^{(i0)} k_2^{(i0)} F_{(1,2)}^{(0)} + k_1^{(i0)} k_3^{(i0)} F_{(1,3)}^{(0)} + \left(k_2^{(i0)} \right)^2 F_{(2,2)}^{(0)} + 2k_2^{(i0)} k_3^{(i0)} F_{(2,3)}^{(0)} + k_3^{(i0)} k_1^{(i0)} F_{(3,1)}^{(0)} + \left(k_3^{(i0)} \right)^2 F_{(3,3)}^{(0)} \right\}, \quad i = 1, 2,$$

$$E_2^{(21)} = n \left(k_1^{(21)} m_1^{(2)} + k_2^{(21)} m_2^{(2)} + k_3^{(21)} m_3^{(2)} \right),$$

$$E_1^{(21)} = n \left(k_1^{(21)} m_1^{(1)} + k_2^{(21)} m_2^{(1)} + k_3^{(21)} m_3^{(1)} \right),$$

$$G_2^{(21)} = n \left\{ \left(k_1^{(21)} \right)^2 F_{(1,1)}^{(2)} + 2k_1^{(21)} k_2^{(21)} F_{(1,2)}^{(2)} + k_1^{(21)} k_3^{(21)} F_{(1,3)}^{(2)} + \left(k_2^{(21)} \right)^2 F_{(2,2)}^{(2)} + 2k_2^{(21)} k_3^{(21)} F_{(2,3)}^{(2)} + k_3^{(21)} k_1^{(21)} F_{(3,1)}^{(2)} + \left(k_3^{(21)} \right)^2 F_{(3,3)}^{(2)} \right\},$$

$$G_0^{(21)} = n \left\{ \left(k_1^{(21)} \right)^2 F_{(1,1)}^{(1)} + 2k_1^{(21)} k_2^{(21)} F_{(1,2)}^{(1)} + k_1^{(21)} k_3^{(21)} F_{(1,3)}^{(1)} + \left(k_2^{(21)} \right)^2 F_{(2,2)}^{(1)} + 2k_2^{(21)} k_3^{(21)} F_{(2,3)}^{(1)} + k_3^{(21)} k_1^{(21)} F_{(3,1)}^{(1)} + \left(k_3^{(21)} \right)^2 F_{(3,3)}^{(1)} \right\}.$$

Для якісної оцінки ефективності синтезованих алгоритмів скористаємося виразом, який характеризує кількість здобутої інформації про розрізнення гіпотез РП (1) і є зворотною величиною критерію якості:

$$I_{(E,G)}^{(mr)} = \frac{1}{Ku(E,G)^{(mr)}} = E_m^{(mr)} - E_r^{(mr)}, \quad m, r = \overline{0, 2}, \quad m \neq r. \quad (8)$$

Аналіз отриманих результатів. На основі запропонованих математичних моделей випадкових процесів при моментно-кумулятному описі випадкових величин були розроблені нові методи виявлення шумових сигналів на фоні негаусових завад і проведений їх якісний аналіз. Порівняльний аналіз нелінійних РП (рис. 1, 2) проведено при порівнянні кількості здобутої інформації (8) I_{1n} про розрізнення гіпотез для гаусового каналу зв'язку ($\gamma_3 = 0$) до кількості здобутої інформації I_{3n} про розрізнення гіпотез для негаусового каналу зв'язку ($\gamma_3 \neq 0$) від коефіцієнта асиметрії γ_3 , де $p_i = \mu_2 / \chi_2$ — відношення потужності шумового сигналу до потужності адитивної негаусової завади. На рис. 1 та рис. 2 наведено залежності кількості здобутої інформації про розрізнення гіпотез від коефіцієнта асиметрії γ_3 при різних параметрах $\beta_3^{(i)}$ ($i = 1, 2$). Результати досліджень показують, що при врахуванні коефіцієнта асиметрії γ_3 збільшується кількість здобутої інформації із вибіркового значень про розрізнення гіпотез, що відповідає зменшенню ймовірності помилок нелінійних РП при врахуванні негаусових завад в каналі зв'язку. Максимальна ефективність досягається при граничних значеннях кумулянтних коефіцієнтів γ_3 . Також проведені аналогічні дослідження (рис. 2) при різних параметрах p_i ($i = 1, 2$), де показано, що кількість здобутої інформації збільшується при збільшенні параметра p_i .

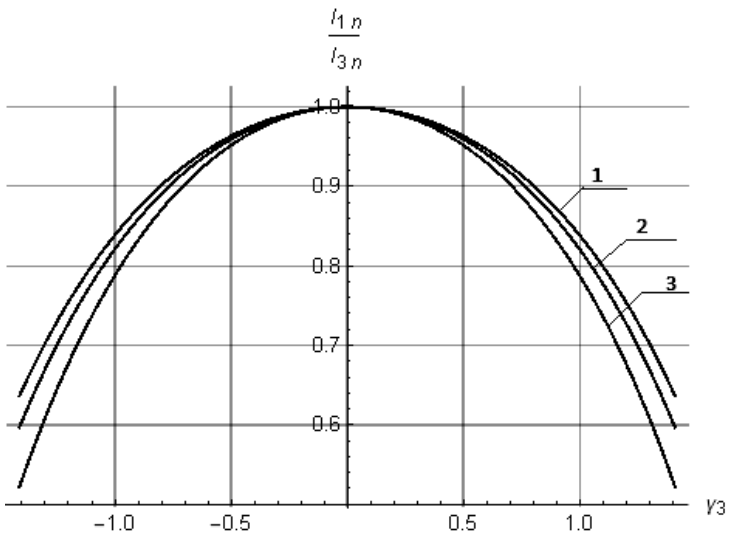


Рис. 1. Залежність кількості здобутої інформації про розрізнення гіпотез від коефіцієнта асиметрії γ_3 при наступних параметрах: $p_1 = p_2 = 1$;
1) $\beta_3^{(1)} = 0.1, \beta_3^{(2)} = -0.1$, 2) $\beta_3^{(1)} = 1, \beta_3^{(2)} = -1$, 3) $\beta_3^{(1)} = 1.4, \beta_3^{(2)} = -1.4$

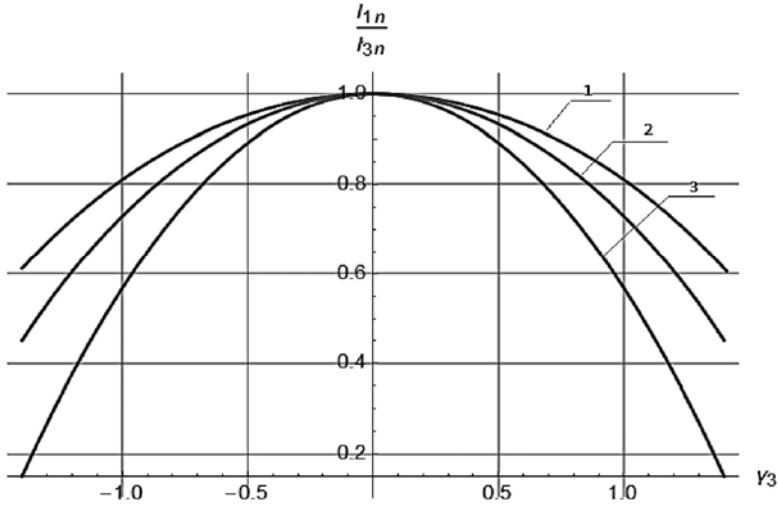


Рис. 2. Залежність кількості здобутої інформації про розрізнення гіпотез від коефіцієнта асиметрії γ_3 , при наступних параметрах: $\beta_3^{(1)} = 1.4$, $\beta_3^{(2)} = -1.4$, і при різних параметрах 1) $p_1 = p_2 = 0.1$, 2) $p_1 = p_2 = 0.5$ 3) $p_1 = p_2 = 1$

Наприклад, при $\gamma_3 = 0,5$ (рис. 1. для кривої 3) кількість здобутої інформації збільшується в 1,1 рази, а при $\gamma_3 = 1,3$ відповідно збільшується в 4 рази, що свідчить про зростання ефективності РП.

Проведено моделювання отриманих результатів в віртуальному середовищі SIMULINK. На рис. 3 показана структурна схема системи передачі інформації, де в якості несучої двійкового повідомлення використано негаусовий випадковий процес, сформований на основі двох негаусових генераторів шуму (Noise Generator (Bi-Gaussian) 1 та Noise Generator (Bi-Gaussian) 2 [14], які характеризуються нульовим математичним сподіванням, дисперсією μ_2 та різними коефіцієнтами асиметрії $\beta_3^{(1)}$ та $\beta_3^{(2)}$. Маніпуляція негаусового випадкового процесу реалізована в блоці «Index Vector» під дією джерела інформаційного повідомлення (Pulse Generator). Передача шумового сигналу супроводжується на фоні адитивної завади, сформованої на основі (Noise Generator (Bi-Gaussian)3, яку будемо вважати асиметричним негаусовим процесом з нульовим математичним сподіванням, дисперсією χ_2 та коефіцієнтом асиметрії γ_3 . Для обробки прийнятого випадкового процесу використано поліноміальну систему розрізнення шумових сигналів — Polynomial system (PS), яка базується на застосуванні нелінійних РП (7), які в свою чергу реалізують стохастичний демодулятор для виділення двійкового інформаційного повідомлення про прийом «0» та «1» відповідно.

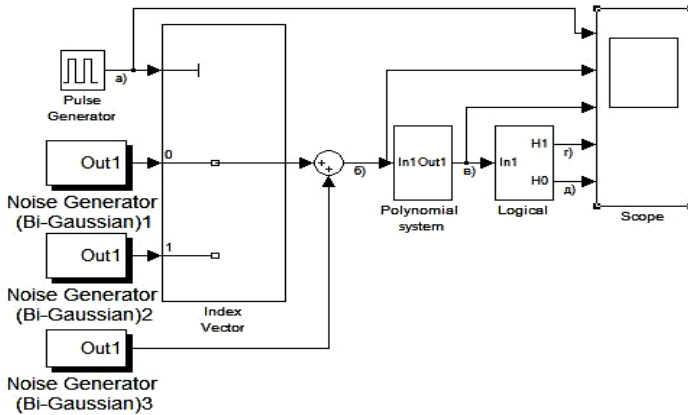


Рис. 3. Структурна схема системи передачі даних

Осцилограми, які ілюструють результати обробки сигналів, наведені на рис. 4, де: (а) — інформаційне двійкове повідомлення, (б) — модульований шумовий сигнал при адитивній взаємодії з асиметричною негаусовою завадою, (в) — результат поліноміальної обробки в PS (детектування) шумового сигналу, (г) — виділення інформаційної двійкової послідовності, яка після нормування (блок Logical) співпадає з початковим джерелом двійкової інформації.

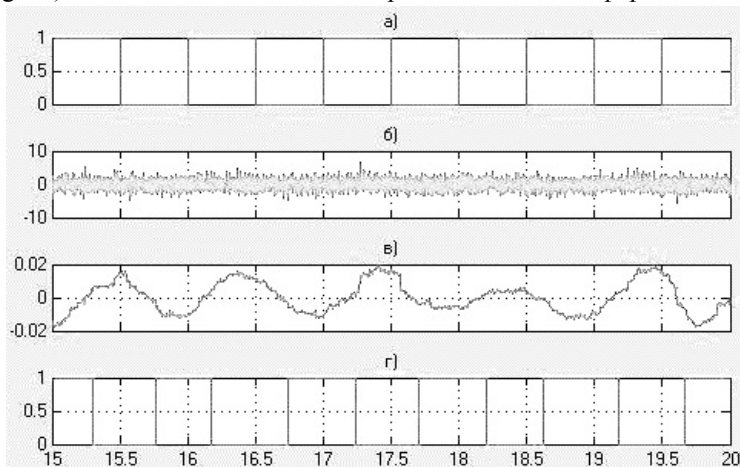


Рис. 4. Показники осцилографа (Scope) при наступних параметрах: відношення сигнал/шум — $p = 0.5$, коефіцієнти асиметрії шумового сигналу для передачі двійкового повідомлення $\beta_3^{(1)} = 0.5$; $\beta_3^{(0)} = -0.5$, коефіцієнт асиметрії адитивної негаусової завади $\gamma_3 = 1$

Таким чином, застосування шумових негаусових процесів, статистичної обробки даних та нелінійних РП надає можливість створення системи зв'язку з маніпуляцією негаусових параметрів, а саме коефіцієнта асиметрії. Окрім того, врахування параметрів негаусового розподілу завади в каналах зв'язку дозволяє підвищити ефективність виявлення сигналів в порівнянні з традиційними гаусовими моделями.

Висновки. Запропоновано математичні моделі та методи формування та обробки шумових сигналів на основі моментно-кумулянтного опису випадкових процесів, поліноміальних розв'язувальних правил, оптимальних за моментним критерієм якості верхньої границі ймовірностей помилок, що дозволило створити ефективні системи зв'язку передачі даних. Отримані результати демонструють можливість застосування асиметричної модуляції параметрів негаусових процесів та ефективного виділення інформаційного повідомлення при адитивному впливі асиметричних негаусових завад.

Список використаних джерел:

1. Калинин В. И. Широкополосный канал со спектральной модуляцией для передачи цифровой информации / В. И. Калинин // 14th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2004): Proc. — Sevastopol, 2004. — P. 292–293.
2. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи / М. И. Мазурков // НиТ. — 2009. — 334 с.
3. Велигоша А. В. Общая теория связи: учебное пособие / А. В. Велигоша // СКФУ. — 2014. — 240 с.
4. Колесов В. В. Применение хаотических сигналов в информационных технологиях / В. В. Колесов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2009. — № 1 (1–2). — С. 23–32.
5. Kalinin V. I. Published in Radiotekhnika i Elektronika / V. I. Kalinin, V. V. Chapurskii. — 2015. — Vol. 60, № 10. — P. 1025–1035.
6. Калинин В. И. Передача информации на основе шумовых сигналов со спектральной модуляцией / В. И. Калинин, В. В. Чапурский // Радиотехника и электроника. — 2015. — Т. 60, № 10. — С. 1025–1035.
7. Земляной О. В. Передача информации на основе манипуляции спектром широкополосного хаотического сигнала / О. В. Земляной // Радиофизика и электроника. — 2015. — Т. 6 (20), № 3.
8. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ негаусовских процессов и их преобразований / А. Н. Малахов. — М. : Сов. радио, 1979. — 376 с.
9. Kunchenko Yu. P. Polynomial Parameter Estimations of Close to Gaussian Random Variables / Yu. P. Kunchenko. — Aachen : Shaker Verlag, 2002. — 396 p.
10. Palahin V. Joint Signal parameters estimation in non-Gaussian noise by the method of polynomial maximization / V. Palahin, J. Juhár // Journal of Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 67, № 3. — P 217–221.
11. Палагин В. В. Модели и методы обработки сигналов при взаимодействии с коррелированными негаусовскими помехами / В. В. Палагин // Электронное моделирование. — 2015. — Т. 37, № 6. — С. 19–34.

12. Signals Detection in Correlated non-Gaussian Noise Using Higher-Order Statistics / E. Palahina, M. Gamcová, I. Gladisova, J. Gamec, V. Palahin // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. DOI 10.1007/s00034-017-0623-5.
13. Palahina E. Signal Detection in Additive-Multiplicative non-Gaussian Noise Using Higher Order Statistics / E. Palahina, V. Palahin // *Radioelectronika 2016, 26-th International Conference (19-20 April 2016, Slovak Republic)*. — P. 262–267.
14. Палагин В. В. Полиномиальные алгоритмы совместного различения сигналов и оценивания их параметров на фоне асимметричных негауссовых помех / В. В. Палагин, А. В. Гончаров, В. М. Уманец // *Международный научно-теоретический журнал «Электронное моделирование»*. — 2014. — №4. — С. 51–67.
15. Кунченко Ю. П. Генерація псевдовипадкових послідовностей на основі бігаусового розподілу / Ю. П. Кунченко, С. В. Заболотний, О. С. Гавриш // *Комп'ютерні технології друкарства*. — Львів, 2000. — С. 343–351.

The authors of this paper study the modeling and improvement of communication systems using noise signals at modulation of parameters of non-Gaussian random processes. The algorithms of noise signals processing is synthesized when applying polynomial decision rules by the moment quality criterion of upper bounds of error probability. New mathematical models and methods of noise signals processing are developed. Simulation of the communication system was carried out in Simulink.

Key words: *Stochastic polynomials, moment quality criterion, discrimination noise signals, non-Gaussian noise.*

Отримано: 08.10.2017

UDC 004.41;004.424;519.64

Jo Sterten*, Assist. Prof.,
Yu. O. Furtat, Ph. D.

*Norwegian University of Science and Technology, Gjøvik, Norway,

** Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, NASU, Kyiv

A METHOD OF MODEL EXPERIMENTS FOR REGULARIZING THE PROBLEM OF RECOVERY OF THE INPUT SIGNAL OF THE LINEAR OBJECT BY THE INTEGRAL DYNAMIC MODEL

The method of determining the parameter of regularization for solving the problem of restoring the input signal of a linear stationary object under the conditions of the existence of measurement errors and the process of solving is considered. The proposed method of model experiments allows to separate errors of different types and restore the real input signal.

Key words: *integral model, Volterra equation of the I kind, external perturbation error, calculation method error, regularization.*

Introduction. The integral formulation of the problem of reconstructing the input signal of a stationary dynamic object is described by the Volterra equation of the I kind