

С. М. Первунінський, д.т.н., професор,

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

В. В. Метелан, асистент

e-mail: chdtusciencemvv@ukr.net

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ВИПАДКОВІ МОДУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У БІНАРНИХ МОДЕМАХ З ШУМОВИМИ СИГНАЛАМИ

Розвиток сучасного інформаційного суспільства потребує розробки та впровадження все більш нових інформаційно-комунікаційних технологій, все більш продуктивних систем обробки і передачі інформації. Різноманіття технологій інформаційного обміну – дротових високошвидкісних Ethernet, бездротових мобільних мережевих технологій – вимагає використання різного термінального обладнання і застосування нових методів аналізу, синтезу та ідентифікації сигналів. Перспективними в цьому плані є статистичні методи досліджень, що нерозривно пов'язані із забезпеченням точності, завадостійкості та надійності систем передачі інформації. Однак є цілий ряд невирішених завдань статистичних досліджень, які є спільними для інформаційних систем різних класів і призначень. Завданням розробки методів аналізу і синтезу модемів з шумовими модульованими процесами і присвячено цю статтю.

Ключові слова: шумові сигнали, бінарні модеми, випадкові процеси.

Вступ. В наш час важливим є питання розробки нових та вдосконалення існуючих телекомунікаційних систем зв'язку, що використовують для передачі інформаційних повідомлень модульовані випадкові процеси. Це пов'язано із рядом особливостей цього класу систем:

- висока завадостійкість роботи в умовах дії завад природного та штучного типів;
- висока потайливість, і, як наслідок, захищеність каналу передачі даних;
- можливість повторного використання радіочастотного діапазону;
- відносно прості алгоритми обробки сигналів.

Одночасно застосування сигналів складної форми дає можливість знайти ще одне вирішення важливої проблеми сучасних телекомунікаційних систем – захисту переданої інформації від несанкціонованого доступу (стеганографічність системи) на фізичному рівні інформаційного каналу.

Аналіз. Ідеї використання шумових сигналів як носія інформації при передачі даних набула подальшого розвитку в теоретичних і практичних розробках, особливо нині, коли в модемах телекомунікаційних систем широко використовують цифрові методи обробки.

Найбільшого поширення отримали розробки автокореляційних систем передачі ци-

фрової інформації з використанням широко-смугових шумових сигналів. Перші матеріали по таких системах надані в роботах F. Lange та W. Müller (1963 р.). Автокореляційна система телеграфного зв'язку Ланге-Мюллера базувалась на передачі опорного сигналу випадкової форми (шумового сигналу) та принципах кореляційно-часової модуляції. А. А. Воронін (1966 р.) вперше запропонував використовувати інверсію шумового сигналу в автокореляційній системі зв'язку з передачею опорного сигналу.

Значні результати в цьому напрямку досліджень досягнуті співробітниками Черкаського державного технологічного університету (ЧДТУ) [6–16]. В подальшому зробимо короткий огляд цих результатів, що відносяться до автокореляційних цифрових модемів з шумовими сигналами.

Мета роботи – аналіз можливих методів модуляції випадкових процесів та основні технічні характеристики створених на їх базі модемів інформаційно-комунікаційних систем.

Основний матеріал. Спочатку уточнимо, в якому сенсі використовується термін «випадковий процес». В математичному сенсі під випадковим процесом розуміється сукупність випадкових величин $X = \xi(t)_{t \in T}$, що

існують на часовому інтервалі $T = (-\infty, \infty)$. Якщо $T = (0, 1, 2, \dots)$, тоді $X = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots)$ називається випадковим процесом з дискретним часом, або випадковою послідовністю.

Для використання випадкових процесів як переносників інформації, що представлена аналоговими сигналами чи в цифровому вигляді (даними), слід скористатися більш конкретним уявленням про параметри носія. Такими параметрами можуть бути усереднена на деякому часовому інтервалі T послідовність моментних функцій або початкових моментів випадкового процесу. Саме зміна (модуляція) значень одного чи декількох із цих параметрів генератора випадкового процесу на боці передавача відповідно до величини інформаційного сигналу дає можливість виконати зворотну процедуру демодуляції переданої інформації на боці приймача.

Випадковість величин $\xi(t)_{t \in T}$, що отримують від генератора випадкового процесу, і відсутність еталонів цих значень на боці приймача інформації роблять неможливим застосування когерентних методів вилучення інформації в демодуляторі. Тому основними системами з носіями на базі випадкових процесів, що мають практичне впровадження, є некогерентні методи обробки [1–5]. Саме на особливостях використання некогерентних типів демодуляторів випадкового носія інформації і буде зосереджена увага в цій роботі.

Як несуча у вигляді випадкового процесу можуть використовуватись різні сигнали. Як переносник може застосовуватися будь-який тривалий процес, обумовлений тими чи іншими параметрами, що можуть змінюватися в результаті модуляції. Залежно від характеристик промодульованої несучої визначається і алгоритм обробки сигналу в демодуляторі та його структура. Тому в подальшому зупинимось на розгляді систем, що побудовані на випадкових процесах шумового типу, а модульований інформаційним сигналом випадковий процес будемо називати шумовим. Як основний шумовий процес будемо розуміти так званий «білий» гауссовий шум типу $N[0, \sigma^2]$, де σ^2 – дисперсія шуму, значення 0 позначає центрованість шуму. Звичайно смуга частот, в якій зосереджена шумова несуча, обмежена смугою виділеного для передачі каналу. Таке фізичне обмеження на спектр шуму обмежує і величину його потужності σ^2 .

Аналіз можливостей систем з шумовими сигналами вперше наведений у роботі академіка А. А. Харкевича [1]. В цій роботі описано принципи побудови систем зв'язку, що використовують найпростіші методи модуляції окремих параметрів шуму. Одна з них побудована на принципах систем з амплітудною модуляцією, коли змінюється дисперсія шуму залежно від інформації, що передається. Це система з амплітудно-шумовою модуляцією (АШМ).

Інші види модуляції можна одержати, модулюючи ті чи інші параметри, що визначають вид спектра потужності $G(\omega)$ шуму, який визначається через його функцію кореляції $B(\tau)$ відомим співвідношенням

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (1)$$

Якщо переносник обраний як білий шум у смузі частот від ω_1 до ω_2 , тоді

$$G(\omega) = \begin{cases} G_0, & \omega_1 < \omega < \omega_2 \\ 0, & \text{поза вказаної смуги.} \end{cases} \quad (2)$$

У цьому випадку параметрами передавача є граничні частоти ω_1 і ω_2 , і модуляція може полягати в зміні кожного з цих параметрів. Якщо ж змінювати одночасно ω_1 і ω_2 , але так, щоб різниця $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ залишалася постійною, то модуляція буде характеризуватися тим, що спектр шуму, не змінюючи своєї форми, буде переміщатися по смузі частот, разом за змінами переданого повідомлення. Це буде частотно-шумовою модуляцією (ЧШМ).

Серед особливостей систем з шумовою модуляцією заслуговує на увагу їх стійкість стосовно завмирання сигналів. Мається на увазі загальне завмирання інтерференційного походження, обумовлене багатопроменевим поширенням сигналів. Це впливає з аналізу такого прикладу [1].

Розглянемо для спрощення схематизований випадок об'єднання двох гармонійних променів однакової частоти ω_0 з часовим зсувом τ , інтенсивність обох променів будемо вважати однаковою. При додаванні двох синусоїдних коливань потужністю P_0 кожне будемо мати для потужності результуючого коливання потужність

$$P = 2P_0(1 + \cos \omega_0 \tau), \quad (3)$$

тобто при $\omega_0 \tau = (2n+1)\pi$ результуюча потужність дорівнює нулю. При додаванні ж двох центрованих шумових процесів типу білого шуму, зсунутих за часом на τ , маємо потужність

$$\begin{aligned} P &= M[\xi(t) + \xi(t + \tau)]^2 = M[\xi^2(t)] + \\ &+ M[\xi^2(t + \tau)] + 2M[\xi(t)\xi(t + \tau)] = \\ &= 2B(0) + 2B(\tau) = 2P_0[1 + b(\tau)], \end{aligned} \quad (4)$$

де $M[x]$ – операція обчислення математичного сподівання від x ;

$b(\tau)$ – нормована функція автокореляції.

З виразу (4) випливає, що чим менша кореляція, тим менше шумовий сигнал піддається завмиранню. Аналізуючи значення потужності з (4), можна показати, що при використанні шумового носія зі смугою, більшою 16 кГц, потужність сумарного шумового сигналу при двопробневому прийомі під впливом завмирання буде зменшуватись не більш ніж на 10% (а середньоквадратичне значення напруги – не більш ніж на 5,14%). Відзначена стійкість шумових сигналів до змінних параметрів каналу приваблює розробників таких систем.

Фазова модуляція шумових сигналів (ФШМ) в [1] не обговорювалась, хоча виконати фазову маніпуляцію шуму на величину, що дорівнює значенню π , достатньо просто. Для цього слід скористатися операцією інвертування (зміни знака) реалізації шумового процесу, що приведе до обертання напрямку всіх спектральних компонент реалізації на зворотний. Саме цей спосіб систем з ФШМ і набув у подальшому широкого застосування при побудові модулаторів дискретних бінарних повідомлень.

Принципи побудови автокореляційних модемів з шумовими сигналами. Як базову розглянемо бінарну дискретну систему, запропоновану Ланге та Мюллером [3], структурна схема модулатора модема якої зображена на рис. 1. Назвемо умовно таку систему 1-м типом. Модулятор цієї системи формує на тактовому інтервалі T з шумового процесу $\xi(t)$, що отриманий від генератора шуму, сигнал

$$\begin{aligned} y(t) &= \xi(t) + \xi(t - \alpha), \\ \alpha &= \begin{cases} \tau_1, & \lambda = 0 \\ \tau_2, & \lambda = 1. \end{cases}, \quad t = \overline{0, T}. \end{aligned} \quad (5)$$

На рисунку використані такі позначення: Γ – генератор шуму, λ – бінарне інформаційне повідомлення, τ_1 і τ_2 – лінії затримки відповідно на час τ_1 і τ_2 , K – комутатор.

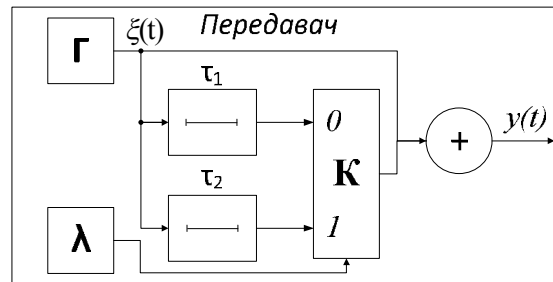


Рис. 1. Структурна схема модулатора модема 1-го типу

В момент початку кожного тактового інтервалу T комутатор K перемикається в положення 0 або 1 відповідно до значення нового поточного біта інформаційного повідомлення λ і залишається у фіксованому положенні протягом наступного інтервалу часу T .

З метою зменшення впливу власних системних завад А. А. Вороніним запропоновано модулятор з фазовою маніпуляцією шумових сигналів, структурна схема якого зображена на рис. 2 (система 2-го типу).

Відмінність полягає в тому, що лінія затримки в кодувальному пристрої лише одна, натомість наявний пристрій обертання фази (інвертор), позначений на рисунку ΦO . В результаті на виході маємо сигнал

$$\begin{aligned} y(t) &= \xi(t) + \alpha \xi(t - \tau_1), \\ \alpha &= \begin{cases} 1, & \lambda = 0 \\ -1, & \lambda = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

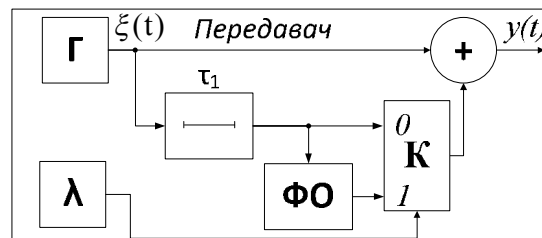


Рис. 2. Схема модулатора модема 2-го типу

В пошуках шляхів підвищення завадостійкості систем з шумовими сигналами в ЧДТУ запатентовано нові схеми модемів і виконано порівняння показників їх завадостійкості між собою та з відповідними показниками традиційних систем типу 1 і 2.

На рис. 3 зображено схему кодувально-го пристрою передавача 3-го типу, в якому виконано об'єднання схем модемів 1-го та 2-го типів. В результаті на виході модулятора маємо сигнал

$$y(t) = \xi(t) + \alpha \xi(t - \tau),$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \lambda_{i,j} = \{00, 10\} \\ -1, & \lambda_{i,j} \neq \{00, 10\} \end{cases}; \quad (7)$$

$$\tau = \begin{cases} \tau_1, & \lambda_{i,j} = \{00, 01\} \\ \tau_2, & \lambda_{i,j} \neq \{00, 01\}. \end{cases}$$

Це дозволяє за один символний інтервал передавати два біти інформаційного повідомлення. Тому при збереженні швидкості передачі даних (при відповідному значенні інтервалу T) маємо можливість вдвічі збільшити символний інтервал.

Наступні дві схеми характеризуються відсутністю суматора. В них сигнали з виходів ліній затримки та пристроїв обертання фази не додаються до основного каналу з шумом $\xi(t)$, а в певні періоди часу заміщують його у вихідному сигналі $y(t)$.

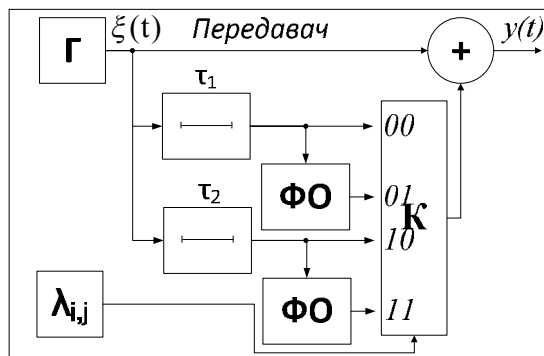


Рис. 3 Схема модулятора модема 3-го типу

Такий підхід дещо зменшує захищеність інформації в каналі зв'язку від несанкціонованого доступу, однак при цьому вплив власних шумів системи зводиться практично до нуля, як результат – очікується підвищення завадостійкості.

Схема модулятора модема 4-го типу (рис. 4) є модифікацією 1-го типу.

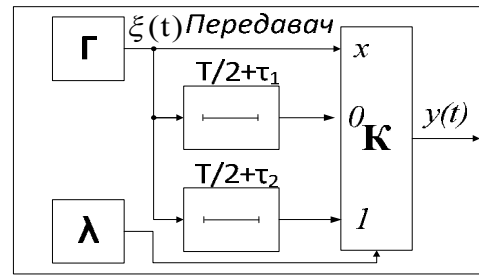


Рис. 4. Схема модулятора модема 4-го типу

Принцип його роботи наступний: протягом першої частини символного інтервалу комутатор знаходиться в положенні x , і на вихід схеми надходить сигнал $\xi(t)$ з генератора Γ ; залежно від поточного значення $\lambda = \{0; 1\}$, в момент часу $T/2$ на проміжок часу $T/2$ комутатор перемикається в положення 0 або 1. В результаті на виході маємо сигнал

$$y(t) = \xi(t) + \alpha \xi(t - T/2 - \tau_i),$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \lambda = 0 \\ -1, & \lambda = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Схема 5-го типу (рис. 5) відрізняється тим, що друга лінія затримки з рис. 4 замінена пристроєм обертання фази.

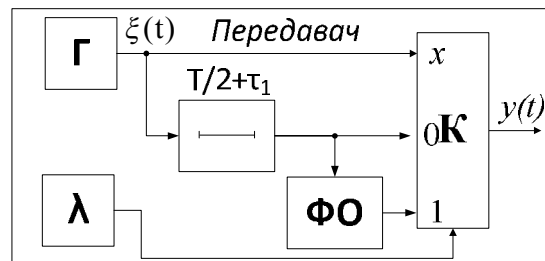


Рис. 5. Схема модулятора модема 5-го типу

В результаті роботи описаних вище пристроїв отримуємо сигнал, що має додатковий пік кореляційної функції наприкінці тактового інтервалу, місце та знак якого є інформаційним параметром, оцінку якого і робить демодулятор.

Моделювання модемів з шумовими сигналами в каналі зі сталими параметрами. В каналі зв'язку сигнал $y(t)$ зазнає шкідливого впливу завад $n(t)$. Таким чином, на вході приймача спостерігаємо сигнал, що є адитивною сумішшю корисного сигналу і завади

$$z(t) = y(t) + n(t).$$

Автокореляційний прийом сигналів передбачає обробку в демодуляторі прийнятої суми корисного сигналу і завади за допомогою автокорелятора, структурна схема якого (рис. 6) включає перемножувач, лінію затримки (ЛЗ) та інтегратор.

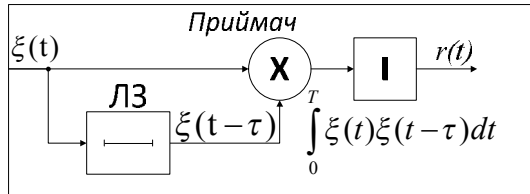


Рис. 6. Блок-схема автокорелятора

На вхід корелятора в схемі демодулятора модема надходить добуток сигналів $z(t)$ і $z(t - \tau)$, що надходять на перемножувач безпосередньо і через лінію затримки на час τ . Для отримання найбільш точної оцінки $\hat{\lambda}$ інформаційного повідомлення λ з вхідного сигналу потрібна відповідна побудова демодулятора на приймальній стороні.

На рис. 7, а зображено схему демодулятора для модемів систем типу 1, 3, 4, а на рис. 7, б – для систем типу 2 і 5.

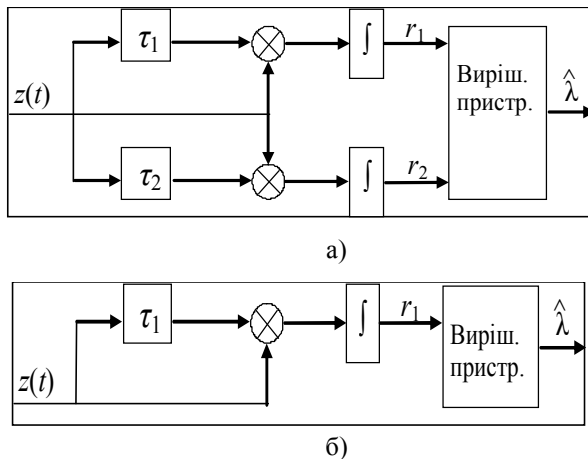


Рис. 7. Структурні схеми демодуляторів:

а) модеми 1, 3 та 4-го типу,

б) модеми 2 та 5-го типу

На рисунках $r_1 = r(\tau_1)$, $r_2 = r(\tau_2)$. Слід відзначити, що для модемів типів 1, 2 і 3 кореляційна функція $r(\tau)$ обчислюється інтегруванням по часу в межах від 0 до T . Модем типу 3 має таку особливість: для неї T вибирається вдвічі більшим, ніж для модемів типу 1 і 2. Для модемів типу 4 і 5 нижня межа інтегралу – $T/2$. Отже, час інтегрування для двох

останніх типів модемів є меншим порівняно з аналогами типу 1 і 2, але вони мають простішу апаратну побудову.

Обчислені кореляторами числові значення r_1 та r_2 (або лише r_1) надходять до розв'язувального пристрою. Блок-схеми таких алгоритмів зображені на рис. 8.

Проаналізуємо завадостійкість описаних вище модемів з метою відбору оптимального за співвідношенням складності структури та її завадостійкості. Оскільки отримати аналітичні співвідношення, що вирішували б цю задачу, досить складно, застосуємо методи математичного моделювання та обчислювального експерименту.

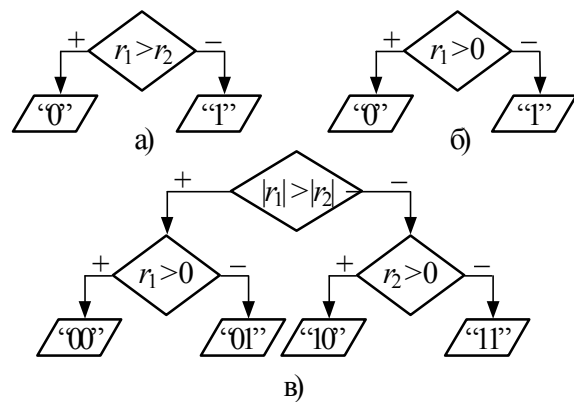


Рис. 8. Блок-схеми алгоритмів роботи розв'язувальних пристроїв: а) модеми 1 і 4-го типу, б) модеми 2 і 5-го типу, в) модем 3-го типу

Методика досліджень. Як математичну модель інформаційного повідомлення λ використовуємо випадкову величину з розподілом бінарної альтернативи

$$f_{\lambda}(x) = 0,5 \cdot \delta(x) + 0,5 \cdot \delta(1 - x),$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака.

В результаті генерації (реалізації) цієї випадкової величини отримаємо послідовність $m = 10^5$ чисел, в якій приблизно однакова кількість нулів і одиниць

$$\lambda_i = \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Як математичну модель виходу $x(t)$ генератора «Г» оберемо стаціонарний гауссовий випадковий процес (гауссовий білий шум). Щільність розподілу одновимірного часового перерізу такого процесу має опис

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{-\frac{x^2}{2D}},$$

де D – дисперсія шуму.

Кореляційна функція цього процесу є

$$R(\tau) = D \cdot \delta(\tau).$$

В подальшому визначимо дисперсію шуму для генератора $D = 1$.

Будемо користуватися цифровими реалізаціями процесу у вигляді послідовності чисел на інтервалі T .

Встановимо, що символний інтервал T (час, необхідний для передачі одного символу інформаційної послідовності λ) відповідає $k = 50$ відлікам тактового генератора. Тоді мінімальний необхідний об'єм послідовності x_j визначиться з розрахунку $M = k \cdot m = 5 \cdot 10^6$ (за умов, що часові затримки τ_1 і τ_2 не перевищують T). Отже, отримаємо нормально розподілену послідовність з незалежними відліками, що моделює роботу генератора «Г», ξ_j , $j = 1, M$.

Шумовий сигнал генератора $\xi(t)$, представлений у моделі послідовністю ξ_j , разом з керуючим інформаційним повідомленням λ (в моделі – послідовність λ_i) надходить до модулятора.

Моделі завади $n(t)$ отримаємо аналогічно до моделі процесу $\xi(t)$ з тією особливістю, що дисперсію D_n виберемо з умов забезпечення необхідного значення перевищення сигнал/шум $h^2 = \frac{D_y k}{2D_n}$ [9]. Для модуляторів з суматором (тип 1–3) $D_y = D_\xi + D_\xi = 2$, а

$D_n = \frac{D_y k}{2h^2} = \frac{k}{h^2}$. Для модуляторів без суматора (тип 4 і 5) маємо $D_y = D_\xi = 1$, отже $D_n = \frac{k}{h^2}$.

Розробивши програму алгоритмічної моделі модемів, за результатами моделювання підраховуємо кількість помилок, що відбулася при передачі,

$$E = \sum_{i=1}^m |\tilde{\lambda}_i - \lambda_i|.$$

Тоді оцінкою імовірності помилки приймача буде $p = E/m$. В такий спосіб мо-

жемо оцінювати імовірності, не менші ніж 10^{-4} .

Програмну реалізацію математичної моделі та проведення обчислювального експерименту виконано за допомогою системи Mathcad 15. Результати моделювання зображено на рис. 9 залежностями імовірності помилки приймача p як функції від відношення сигнал/шум h^2 .

На рис. 9 номер залежності відповідає типу модема. Як видно з рисунка, найгіршу завадостійкість має модем типу 1. Це пояснюється надзвичайно високим рівнем власних шумів системи. Модем типу 3 показує дещо кращі результати, однак це досягається за рахунок значного ускладнення схеми модема. Отже, модеми 3-го типу видаються малоперспективними для практичного використання.

Більш значне підвищення завадостійкості досягається при використанні систем 2-го типу. Ці системи видаються перспективнішими, тому що в них досягається суттєве спрощення схем модулятора і демодулятора.

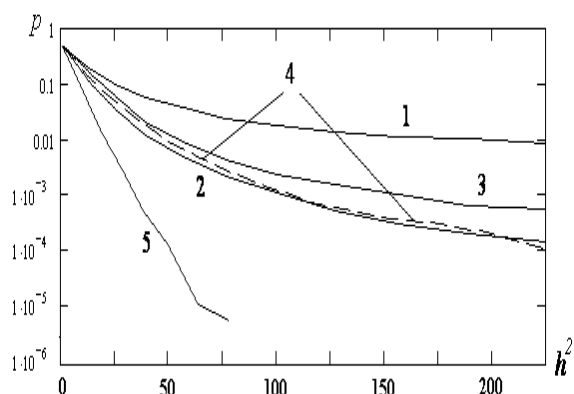


Рис. 9. Залежність імовірності помилки демодулятора від перевищення сигнал/шум

Цих недоліків позбавлені системи 4 і 5. При малих h^2 4-та система показує завадостійкість проміжну між рівнем 2 та 3-ї. Однак при збільшенні h^2 її завадостійкість стає кращою, ніж у системи 2.

Найкращі результати отримуємо для модема 5-го типу. Його структура є модифікацією модема 2-го типу, що, крім того, забезпечує і апаратне спрощення. Однак вигравш завадостійкості отриманий у цьому дослідженні за рахунок деяких втрат у захищеності інформації.

Висновки:

1. Шумові широкосмугові сигнали з кореляційно-часовою модуляцією дозволяють будувати інформаційно-комунікаційні системи, що забезпечують високу стійкість у каналах зі змінними параметрами та підвищують захист інформації від несанкціонованого доступу при достатньо простих апаратних структурах модемів.

2. Наведено структурні схеми модемів автокореляційного типу з шумовими сигналами. Методом імітаційного моделювання отримано експериментальні дані щодо завадостійкості досліджуваних автокореляційних модемів з шумовими сигналами.

3. В інформаційних системах, для яких критичним є рівень захищеності інформації, що передається, оптимальним є використання модемів 2-го типу з фазовою модуляцією шумових сигналів. У системах, які не висувають жорстких вимог до захищеності інформації, можна досягти значного поліпшення завадостійкості завдяки використанню модифікованих систем з протилежними сигналами (модеми 5-го типу).

Список літератури

1. Харкевич А. А. Передача сигналов модулированным шумом / А. А. Харкевич // Электросвязь. – 1957. – № 11. – С. 42–46.
2. Воронин А. А. Шумоподобные сигналы – эффективный метод борьбы с замираниями / А. А. Воронин // Электросвязь. – 1966. – № 7.
3. Парфенов В. И. Вероятностные модели и статистический анализ стохастических модулированных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03 / В. И. Парфенов. – Воронеж, 2002. – 297 с.
4. Лега Ю. Г. Принципы построения и исследования систем связи с использованием шумовых сигналов : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.12.14 / Ю. Г. Лега. – Черкассы, 2001. – 342 с.
5. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи : учеб. пособие для студ. вузов / М. И. Мазурков. – О. : Наука и техника, 2010. – 340 с.
6. Первунінський С. М. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача асиметричного шумового сигналу / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2012. – № 1. – С. 82–86.
7. Журавель П. Д. Определение значений задержек сигнала в системах передачи данных с корреляционно-временной шумовой модуляцией / П. Д. Журавель, С. М. Первунінський // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 1. – С. 21–28.
8. Первунінський С. М. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача шумових ортогоналізованих сигналів з двома лініями затримки / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 2. – С. 212–218.
9. Лега Ю. Г. Централізована система зв'язку множинного доступу з фазовою маніпуляцією шумового сигналу / Ю. Г. Лега, С. М. Первунінський, Р. М. Дідковський // Комп'ютерні технології друкарства. – Вип. 27. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2012. – С. 139–151.
10. Первунінський С. М. Дослідження завадостійкості бінарного автокореляційного приймача шумових сигналів з фазовою маніпуляцією / С. М. Первунінський, Р. М. Дідковський, В. В. Метеллап // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – № 1(3). – С. 56–63.
11. Дідковський Р. М. Моделювання систем зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу / Р. М. Дідковський, С. М. Первунінський // Праці Одеського політехнічного університету. – 2012. – Вип. 1 (38). – С. 198–202.
12. Патент України 74464, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, О. В. Вовченко, П. Д. Журавель ; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201205356 ; заявл. 03.05.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
13. Патент України 75721, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами з ортогоналізацією опорного сигналу / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель, О. В. Вовченко ; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201206745 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.

14. Патент України 68639, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201107502; заявл. 14.06.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.
15. Патент України 74692, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201204237; заявл. 05.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.
16. Патент України 79666, МПК H04B 7/00. Пристрій організації багатокористувацького доступу при передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201213119; заявл. 19.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
8. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Noise stability of binary autocorrelation receiver of noise orthogonalized signals with two delay lines. *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu*, No. 2, pp. 212–218 [in Ukrainian].
9. Lega, Yu. G., Pervunins'kyj, S. M. and Didkovs'kyj, R. M. (2012) Centralized communication system of conjunctive access with phase manipulation of noise signal. *Kompyuterni tekhnolohiyi drukarstva*, (27). L'viv: Ukr. akad. drukarstva, pp. 139–151 [in Ukrainian].
10. Pervunins'kyj, S. M., Didkovs'kyj, R. M. and Metelap, V. V. (2008) The research of noise stability of binary autocorrelation receiver of noise signals with phase manipulation. *Naukovi zapysky UNDIK*, No. 1 (3). pp. 56–63 [in Ukrainian].
11. Didkovs'kyj, R. M. and Pervunins'kyj, S. M. (2012) Modeling of communication systems with phase manipulation of noise signal. *Praci Odes'kogo politehnichnogo universytetu*, No 1 (38), pp. 198–202 [in Ukrainian].
12. Pervunins'kyj, S. M., Vovchenko, O. V. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 74464, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201205356; stated 03.05.2012; publ. 25.10.2012, Bul. No. 20 [in Ukrainian].
13. Pervunins'kyj, S. M., Zhuravel', P. D. and Vovchenko, O. V. (2012) Patent of Ukraine 75721, MPK N04V 7/00. A device for data transmission by noise signals with reference signal orthogonalization. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201206745; stated 01.06.2012; publ. 10.12.2012, Bul. No. 23 [in Ukrainian].
14. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 68639, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201107502; stated 14.06.2011; publ. 10.04.2012, Bul. No. 7 [in Ukrainian].
15. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 74692, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201204237; stated 05.04.2012; publ. 12.11.2012, Bul. No. 21 [in Ukrainian].

References

1. Kharkevich, A. A. (1957) Signal transmission by modulated noise. *Elektrosvyaz'*, No. 11, pp. 42–46 [in Russian].
2. Voronin, A. A. (1966) Noise-like signals – efficient method of decays control. *Elektrosvyaz'*, No. 7 [in Russian].
3. Parfenov, V. I. (2003) Probabilistic models and statistical analysis of stochastic modulated processes in the conditions of parametric prior uncertainty: theses for D.Sc.: 01.04.03. Voronezh, 297 p. [in Russian].
4. Lega, Yu. G. (2001) Principles of construction and investigation of communication systems with the use of noise signals: theses for D.Sc.: 05.12.14. Cherkassy, 342 p. [in Russian].
5. Mazurkov, M. I. (2010) Systems of broadband radio communication. Odessa: Nauka i tekhnika, 340 p. [in Russian].
6. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Noise stability of binary autocorrelation receiver of asymmetrical noise signal. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 1, pp. 82–86 [in Ukrainian].
7. Zhuravel', P. D. and Pervuninskij, S. M. (2013) Determination of values of signal delays in systems of data transmitting with correlation-time noise modulation. *Vestnik SibGUTI*, No. 1, pp. 21–28 [in Russian].

16. Pervunins'kyi, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 79666, MPK N04V 7/00. A device of multiuser access organization during data transmission by noise sig-

nals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201213119; stated 19.11.2012; publ. 25.04.2013, Bul. No. 8. [in Ukrainian].

S. M. Pervunins'kyi, *Dr. Tech.Sc., professor*,

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

V. V. Metelap, *lecturer*

e-mail: chdtusciencemvv@ukr.net

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

RANDOM MODULATED PROCESSES AND THEIR USE IN BINARY MODEMS WITH NOISE SIGNALS

The development of modern information society requires the development and implementation of new information-communication technologies, more productive systems of data processing and transmission.

The variety of information sharing technologies – high-speed wired Ethernet, wireless mobile network technologies – requires the use of various terminal equipment and the application of new methods of signals analysis, synthesis and identification. Statistical research methods that are inseparably linked with ensuring of the accuracy, noise immunity and reliability of data transmission systems are promising in this regard. However, there is a number of unsolved problems of statistical studies that are common for information systems of various classes and purposes. This article is just devoted to the development of methods of analysis and synthesis of modems with noise modulated processes.

As a result of the work of described devices a signal is received that has an additional peak of correlation function at the end of clock interval, the place and sign of which are information parameter, the estimation of which is made by demodulator.

In the search of ways to improve noise immunity of noise signal the new schemes of ChSTU modems are patented and comparisons of noise immunity among themselves and with those of traditional systems are made.

Keywords: noise signals, binary modems, random processes.

Статтю представляє д.т.н., професор С. М. Первунінський, Черкаський державний технологічний університет.

С. М. Первунінський, д.т.н., професор,

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

В. В. Метелан, асистент

e-mail: chdtusciencevmv@ukr.net

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ВИПАДКОВІ МОДУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У БІНАРНИХ МОДЕМАХ З ШУМОВИМИ СИГНАЛАМИ

Розвиток сучасного інформаційного суспільства потребує розробки та впровадження все більш нових інформаційно-комунікаційних технологій, все більш продуктивних систем обробки і передачі інформації. Різноманіття технологій інформаційного обміну – дротових високошвидкісних Ethernet, бездротових мобільних мережеских технологій – вимагає використання різного термінального обладнання і застосування нових методів аналізу, синтезу та ідентифікації сигналів. Перспективними в цьому плані є статистичні методи досліджень, що нерозривно пов'язані із забезпеченням точності, завадостійкості та надійності систем передачі інформації. Однак є цілий ряд невирішених завдань статистичних досліджень, які є спільними для інформаційних систем різних класів і призначень. Завданням розробки методів аналізу і синтезу модемів з шумовими модульованими процесами і присвячено цю статтю.

Ключові слова: шумові сигнали, бінарні модеми, випадкові процеси.

Вступ. В наш час важливим є питання розробки нових та вдосконалення існуючих телекомунікаційних систем зв'язку, що використовують для передачі інформаційних повідомлень модульовані випадкові процеси. Це пов'язано із рядом особливостей цього класу систем:

- висока завадостійкість роботи в умовах дії завад природного та штучного типів;
- висока потайливість, і, як наслідок, захищеність каналу передачі даних;
- можливість повторного використання радіочастотного діапазону;
- відносно прості алгоритми обробки сигналів.

Одночасно застосування сигналів складної форми дає можливість знайти ще одне вирішення важливої проблеми сучасних телекомунікаційних систем – захисту переданої інформації від несанкціонованого доступу (стеганографічність системи) на фізичному рівні інформаційного каналу.

Аналіз. Ідеї використання шумових сигналів як носія інформації при передачі даних набула подальшого розвитку в теоретичних і практичних розробках, особливо нині, коли в модемах телекомунікаційних систем широко використовують цифрові методи обробки.

Найбільшого поширення отримали розробки автокореляційних систем передачі ци-

фрової інформації з використанням широко-смугових шумових сигналів. Перші матеріали по таких системах надані в роботах F. Lange та W. Müller (1963 р.). Автокореляційна система телеграфного зв'язку Ланге-Мюллера базувалась на передачі опорного сигналу випадкової форми (шумового сигналу) та принципах кореляційно-часової модуляції. А. А. Воронін (1966 р.) вперше запропонував використовувати інверсію шумового сигналу в автокореляційній системі зв'язку з передачею опорного сигналу.

Значні результати в цьому напрямку досліджень досягнуті співробітниками Черкаського державного технологічного університету (ЧДТУ) [6–16]. В подальшому зробимо короткий огляд цих результатів, що відносяться до автокореляційних цифрових модемів з шумовими сигналами.

Мета роботи – аналіз можливих методів модуляції випадкових процесів та основні технічні характеристики створених на їх базі модемів інформаційно-комунікаційних систем.

Основний матеріал. Спочатку уточнимо, в якому сенсі використовується термін «випадковий процес». В математичному сенсі під випадковим процесом розуміється сукупність випадкових величин $X = \xi(t)_{t \in T}$, що

існують на часовому інтервалі $T = (-\infty, \infty)$. Якщо $T = (0, 1, 2, \dots)$, тоді $X = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots)$ називається випадковим процесом з дискретним часом, або випадковою послідовністю.

Для використання випадкових процесів як переносників інформації, що представлена аналоговими сигналами чи в цифровому вигляді (даними), слід скористатися більш конкретним уявленням про параметри носія. Такими параметрами можуть бути усереднена на деякому часовому інтервалі T послідовність моментних функцій або початкових моментів випадкового процесу. Саме зміна (модуляція) значень одного чи декількох із цих параметрів генератора випадкового процесу на боці передавача відповідно до величини інформаційного сигналу дає можливість виконати зворотну процедуру демодуляції переданої інформації на боці приймача.

Випадковість величин $\xi(t)|_{t \in T}$, що отримують від генератора випадкового процесу, і відсутність еталонів цих значень на боці приймача інформації роблять неможливим застосування когерентних методів вилучення інформації в демодуляторі. Тому основними системами з носіями на базі випадкових процесів, що мають практичне впровадження, є некогерентні методи обробки [1–5]. Саме на особливостях використання некогерентних типів демодуляторів випадкового носія інформації і буде зосереджена увага в цій роботі.

Як несуча у вигляді випадкового процесу можуть використовуватись різні сигнали. Як переносник може застосовуватися будь-який тривалий процес, обумовлений тими чи іншими параметрами, що можуть змінюватися в результаті модуляції. Залежно від характеристик промодульованої несучої визначається і алгоритм обробки сигналу в демодуляторі та його структура. Тому в подальшому зупинимось на розгляді систем, що побудовані на випадкових процесах шумового типу, а модульований інформаційним сигналом випадковий процес будемо називати шумовим. Як основний шумовий процес будемо розуміти так званий «білий» гауссовий шум типу $N[0, \sigma^2]$, де σ^2 – дисперсія шуму, значення 0 позначає центрованість шуму. Звичайно смуга частот, в якій зосереджена шумова несуча, обмежена смугою виділеного для передачі каналу. Таке фізичне обмеження на спектр шуму обмежує і величину його потужності σ^2 .

Аналіз можливостей систем з шумовими сигналами вперше наведений у роботі академіка А. А. Харкевича [1]. В цій роботі описано принципи побудови систем зв'язку, що використовують найпростіші методи модуляції окремих параметрів шуму. Одна з них побудована на принципах систем з амплітудною модуляцією, коли змінюється дисперсія шуму залежно від інформації, що передається. Це система з амплітудно-шумовою модуляцією (АШМ).

Інші види модуляції можна одержати, модулюючи ті чи інші параметри, що визначають вид спектра потужності $G(\omega)$ шуму, який визначається через його функцію кореляції $B(\tau)$ відомим співвідношенням

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (1)$$

Якщо переносник обраний як білий шум у смузі частот від ω_1 до ω_2 , тоді

$$G(\omega) = \begin{cases} G_0, & \omega_1 < \omega < \omega_2 \\ 0, & \text{поза вказаної смуги.} \end{cases} \quad (2)$$

У цьому випадку параметрами передавача є граничні частоти ω_1 і ω_2 , і модуляція може полягати в зміні кожного з цих параметрів. Якщо ж змінювати одночасно ω_1 і ω_2 , але так, щоб різниця $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ залишалася постійною, то модуляція буде характеризуватися тим, що спектр шуму, не змінюючи своєї форми, буде переміщатися по смузі частот, разом за змінами переданого повідомлення. Це буде частотно-шумовою модуляцією (ЧШМ).

Серед особливостей систем з шумовою модуляцією заслуговує на увагу їх стійкість стосовно завмирання сигналів. Мається на увазі загальне завмирання інтерференційного походження, обумовлене багатопроменевим поширенням сигналів. Це впливає з аналізу такого прикладу [1].

Розглянемо для спрощення схематизований випадок об'єднання двох гармонійних променів однакової частоти ω_0 з часовим зсувом τ , інтенсивність обох променів будемо вважати однаковою. При додаванні двох синусоїдних коливань потужністю P_0 кожне будемо мати для потужності результуючого коливання потужність

$$P = 2P_0(1 + \cos \omega_0 \tau), \quad (3)$$

тобто при $\omega_0 \tau = (2n+1)\pi$ результуюча потужність дорівнює нулю. При додаванні ж двох центрованих шумових процесів типу білого шуму, зсунутих за часом на τ , маємо потужність

$$\begin{aligned} P &= M[\xi(t) + \xi(t + \tau)]^2 = M[\xi^2(t)] + \\ &+ M[\xi^2(t + \tau)] + 2M[\xi(t)\xi(t + \tau)] = \\ &= 2B(0) + 2B(\tau) = 2P_0[1 + b(\tau)], \end{aligned} \quad (4)$$

де $M[x]$ – операція обчислення математичного сподівання від x ;

$b(\tau)$ – нормована функція автокореляції.

З виразу (4) випливає, що чим менша кореляція, тим менше шумовий сигнал піддається завмиранню. Аналізуючи значення потужності з (4), можна показати, що при використанні шумового носія зі смугою, більшою 16 кГц, потужність сумарного шумового сигналу при двопробневому прийомі під впливом завмирання буде зменшуватись не більш ніж на 10% (а середньоквадратичне значення напруги – не більш ніж на 5,14%). Відзначена стійкість шумових сигналів до змінних параметрів каналу приваблює розробників таких систем.

Фазова модуляція шумових сигналів (ФШМ) в [1] не обговорювалась, хоча виконати фазову маніпуляцію шуму на величину, що дорівнює значенню π , достатньо просто. Для цього слід скористатися операцією інвертування (зміни знака) реалізації шумового процесу, що приведе до обертання напрямку всіх спектральних компонент реалізації на зворотний. Саме цей спосіб систем з ФШМ і набув у подальшому широкого застосування при побудові модулаторів дискретних бінарних повідомлень.

Принципи побудови автокореляційних модемів з шумовими сигналами. Як базову розглянемо бінарну дискретну систему, запропоновану Ланге та Мюллером [3], структурна схема модулатора модема якої зображена на рис. 1. Назвемо умовно таку систему 1-м типом. Модулятор цієї системи формує на тактовому інтервалі T з шумового процесу $\xi(t)$, що отриманий від генератора шуму, сигнал

$$\begin{aligned} y(t) &= \xi(t) + \xi(t - \alpha), \\ \alpha &= \begin{cases} \tau_1, & \lambda = 0 \\ \tau_2, & \lambda = 1. \end{cases}, \quad t = \overline{0, T}. \end{aligned} \quad (5)$$

На рисунку використані такі позначення: Γ – генератор шуму, λ – бінарне інформаційне повідомлення, τ_1 і τ_2 – лінії затримки відповідно на час τ_1 і τ_2 , K – комутатор.

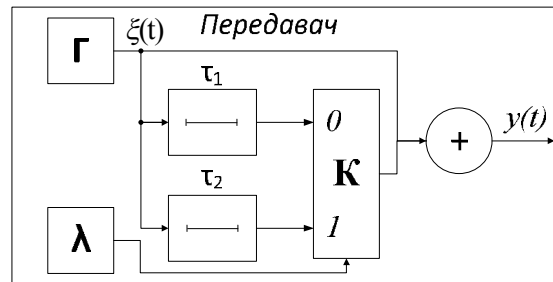


Рис. 1. Структурна схема модулатора модема 1-го типу

В момент початку кожного тактового інтервалу T комутатор K перемикається в положення 0 або 1 відповідно до значення нового поточного біта інформаційного повідомлення λ і залишається у фіксованому положенні протягом наступного інтервалу часу T .

З метою зменшення впливу власних системних завад А. А. Вороніним запропоновано модулятор з фазовою маніпуляцією шумових сигналів, структурна схема якого зображена на рис. 2 (система 2-го типу).

Відмінність полягає в тому, що лінія затримки в кодувальному пристрої лише одна, натомість наявний пристрій обертання фази (інвертор), позначений на рисунку ΦO . В результаті на виході маємо сигнал

$$\begin{aligned} y(t) &= \xi(t) + \alpha \xi(t - \tau_1), \\ \alpha &= \begin{cases} 1, & \lambda = 0 \\ -1, & \lambda = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

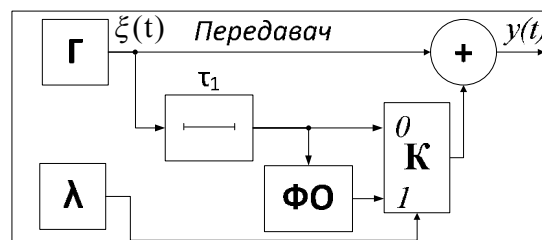


Рис. 2. Схема модулатора модема 2-го типу

В пошуках шляхів підвищення завадостійкості систем з шумовими сигналами в ЧДТУ запатентовано нові схеми модемів і виконано порівняння показників їх завадостійкості між собою та з відповідними показниками традиційних систем типу 1 і 2.

На рис. 3 зображено схему кодувально-го пристрою передавача 3-го типу, в якому виконано об'єднання схем модемів 1-го та 2-го типів. В результаті на виході модулятора маємо сигнал

$$y(t) = \xi(t) + \alpha \xi(t - \tau),$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \lambda_{i,j} = \{00, 10\} \\ -1, & \lambda_{i,j} \neq \{00, 10\} \end{cases}; \quad (7)$$

$$\tau = \begin{cases} \tau_1, & \lambda_{i,j} = \{00, 01\} \\ \tau_2, & \lambda_{i,j} \neq \{00, 01\}. \end{cases}$$

Це дозволяє за один символний інтервал передавати два біти інформаційного повідомлення. Тому при збереженні швидкості передачі даних (при відповідному значенні інтервалу T) маємо можливість вдвічі збільшити символний інтервал.

Наступні дві схеми характеризуються відсутністю суматора. В них сигнали з виходів ліній затримки та пристроїв обертання фази не додаються до основного каналу з шумом $\xi(t)$, а в певні періоди часу заміщують його у вихідному сигналі $y(t)$.

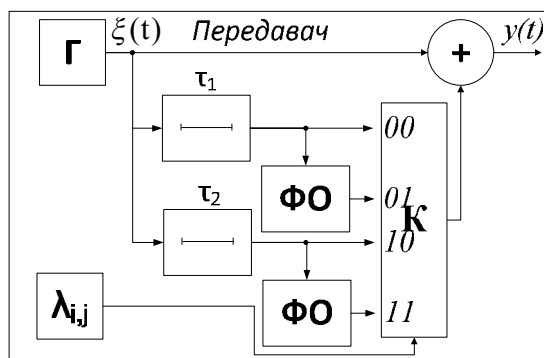


Рис. 3 Схема модулятора модема 3-го типу

Такий підхід дещо зменшує захищеність інформації в каналі зв'язку від несанкціонованого доступу, однак при цьому вплив власних шумів системи зводиться практично до нуля, як результат — очікується підвищення завадостійкості.

Схема модулятора модема 4-го типу (рис. 4) є модифікацією 1-го типу.

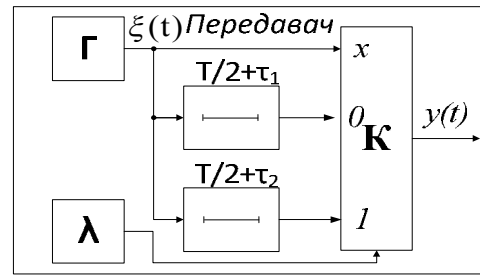


Рис. 4. Схема модулятора модема 4-го типу

Принцип його роботи наступний: протягом першої частини символного інтервалу комутатор знаходиться в положенні x , і на вихід схеми надходить сигнал $\xi(t)$ з генератора Γ ; залежно від поточного значення $\lambda = \{0; 1\}$, в момент часу $T/2$ на проміжок часу $T/2$ комутатор перемикається в положення 0 або 1. В результаті на виході маємо сигнал

$$y(t) = \xi(t) + \alpha \xi(t - T/2 - \tau_i),$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \lambda = 0 \\ -1, & \lambda = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Схема 5-го типу (рис. 5) відрізняється тим, що друга лінія затримки з рис. 4 замінена пристроєм обертання фази.

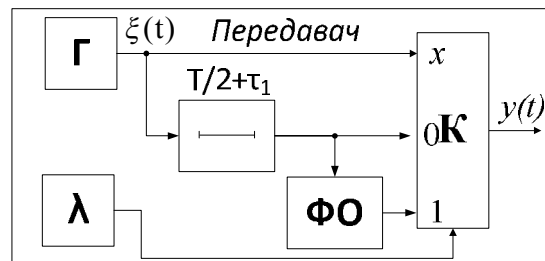


Рис. 5. Схема модулятора модема 5-го типу

В результаті роботи описаних вище пристроїв отримуємо сигнал, що має додатковий пік кореляційної функції наприкінці тактового інтервалу, місце та знак якого є інформаційним параметром, оцінку якого і робить демодулятор.

Моделювання модемів з шумовими сигналами в каналі зі сталими параметрами. В каналі зв'язку сигнал $y(t)$ зазнає шкідливого впливу завад $n(t)$. Таким чином, на вході приймача спостерігаємо сигнал, що є адитивною сумішшю корисного сигналу і завади

$$z(t) = y(t) + n(t).$$

Автокореляційний прийом сигналів передбачає обробку в демодуляторі прийнятої суми корисного сигналу і завади за допомогою автокорелятора, структурна схема якого (рис. 6) включає перемножувач, лінію затримки (ЛЗ) та інтегратор.

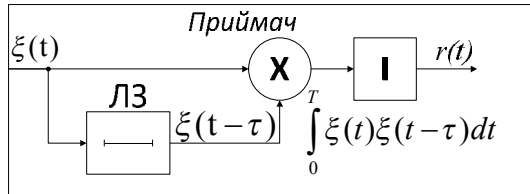


Рис. 6. Блок-схема автокорелятора

На вхід корелятора в схемі демодулятора модема надходить добуток сигналів $z(t)$ і $z(t - \tau)$, що надходять на перемножувач безпосередньо і через лінію затримки на час τ . Для отримання найбільш точної оцінки $\hat{\lambda}$ інформаційного повідомлення λ з вхідного сигналу потрібна відповідна побудова демодулятора на приймальній стороні.

На рис. 7, а зображено схему демодулятора для модемів систем типу 1, 3, 4, а на рис. 7, б – для систем типу 2 і 5.

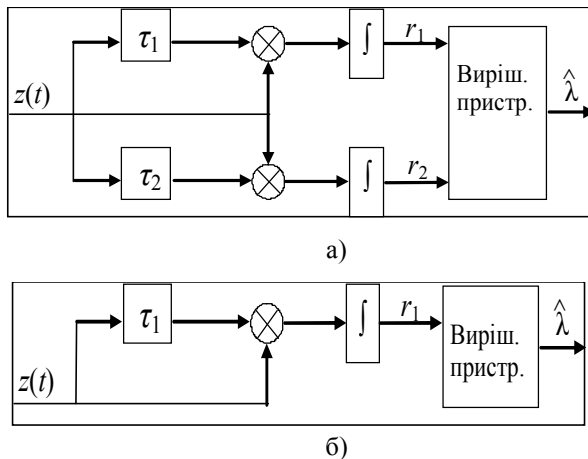


Рис. 7. Структурні схеми демодуляторів:

а) модеми 1, 3 та 4-го типу,

б) модеми 2 та 5-го типу

На рисунках $r_1 = r(\tau_1)$, $r_2 = r(\tau_2)$. Слід відзначити, що для модемів типів 1, 2 і 3 кореляційна функція $r(\tau)$ обчислюється інтегруванням по часу в межах від 0 до T . Модем типу 3 має таку особливість: для неї T вибирається вдвічі більшим, ніж для модемів типу 1 і 2. Для модемів типу 4 і 5 нижня межа інтегралу – $T/2$. Отже, час інтегрування для двох

останніх типів модемів є меншим порівняно з аналогами типу 1 і 2, але вони мають простішу апаратну побудову.

Обчислені кореляторами числові значення r_1 та r_2 (або лише r_1) надходять до розв'язувального пристрою. Блок-схеми таких алгоритмів зображені на рис. 8.

Проаналізуємо завадостійкість описаних вище модемів з метою відбору оптимального за співвідношенням складності структури та її завадостійкості. Оскільки отримати аналітичні співвідношення, що вирішували б цю задачу, досить складно, застосуємо методи математичного моделювання та обчислювального експерименту.

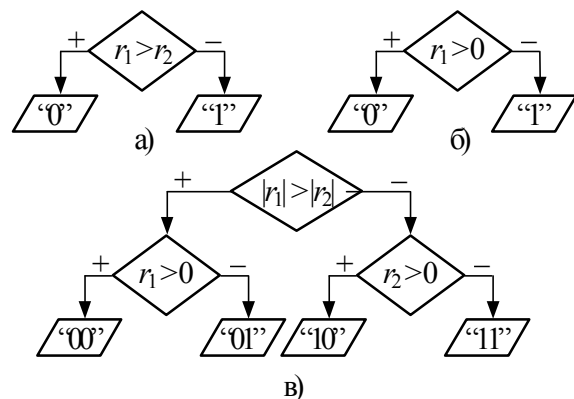


Рис. 8. Блок-схеми алгоритмів роботи розв'язувальних пристроїв: а) модеми 1 і 4-го типу, б) модеми 2 і 5-го типу, в) модем 3-го типу

Методика досліджень. Як математичну модель інформаційного повідомлення λ використовуємо випадкову величину з розподілом бінарної альтернативи

$$f_{\lambda}(x) = 0,5 \cdot \delta(x) + 0,5 \cdot \delta(1 - x),$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака.

В результаті генерації (реалізації) цієї випадкової величини отримаємо послідовність $m = 10^5$ чисел, в якій приблизно однакова кількість нулів і одиниць

$$\lambda_i = \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Як математичну модель виходу $x(t)$ генератора «Г» оберемо стаціонарний гауссовий випадковий процес (гауссовий білий шум). Щільність розподілу одновимірного часового перерізу такого процесу має опис

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{-\frac{x^2}{2D}},$$

де D – дисперсія шуму.

Кореляційна функція цього процесу є

$$R(\tau) = D \cdot \delta(\tau).$$

В подальшому визначимо дисперсію шуму для генератора $D = 1$.

Будемо користуватися цифровими реалізаціями процесу у вигляді послідовності чисел на інтервалі T .

Встановимо, що символний інтервал T (час, необхідний для передачі одного символу інформаційної послідовності λ) відповідає $k = 50$ відлікам тактового генератора. Тоді мінімальний необхідний об'єм послідовності x_j визначиться з розрахунку $M = k \cdot m = 5 \cdot 10^6$ (за умов, що часові затримки τ_1 і τ_2 не перевищують T). Отже, отримаємо нормально розподілену послідовність з незалежними відліками, що моделює роботу генератора «Г», ξ_j , $j = 1, M$.

Шумовий сигнал генератора $\xi(t)$, представлений у моделі послідовністю ξ_j , разом з керуючим інформаційним повідомленням λ (в моделі – послідовність λ_i) надходить до модулятора.

Моделюючи завади $n(t)$ отримаємо аналогічно до моделі процесу $\xi(t)$ з тією особливістю, що дисперсію D_n виберемо з умов забезпечення необхідного значення перевищення сигнал/шум $h^2 = \frac{D_y k}{2D_n}$ [9]. Для модуляторів з суматором (тип 1–3) $D_y = D_\xi + D_\xi = 2$, а

$D_n = \frac{D_y k}{2h^2} = \frac{k}{h^2}$. Для модуляторів без суматора (тип 4 і 5) маємо $D_y = D_\xi = 1$, отже $D_n = \frac{k}{h^2}$.

Розробивши програму алгоритмічної моделі модемів, за результатами моделювання підраховуємо кількість помилок, що відбулася при передачі,

$$E = \sum_{i=1}^m |\tilde{\lambda}_i - \lambda_i|.$$

Тоді оцінкою імовірності помилки приймача буде $p = E/m$. В такий спосіб мо-

жемо оцінювати імовірності, не менші ніж 10^{-4} .

Програмну реалізацію математичної моделі та проведення обчислювального експерименту виконано за допомогою системи Mathcad 15. Результати моделювання зображено на рис. 9 залежностями імовірності помилки приймача p як функції від відношення сигнал/шум h^2 .

На рис. 9 номер залежності відповідає типу модема. Як видно з рисунка, найгіршу завадостійкість має модем типу 1. Це пояснюється надзвичайно високим рівнем власних шумів системи. Модем типу 3 показує дещо кращі результати, однак це досягається за рахунок значного ускладнення схеми модема. Отже, модеми 3-го типу видаються малоперспективними для практичного використання.

Більш значне підвищення завадостійкості досягається при використанні систем 2-го типу. Ці системи видаються перспективнішими, тому що в них досягається суттєве спрощення схем модулятора і демодулятора.

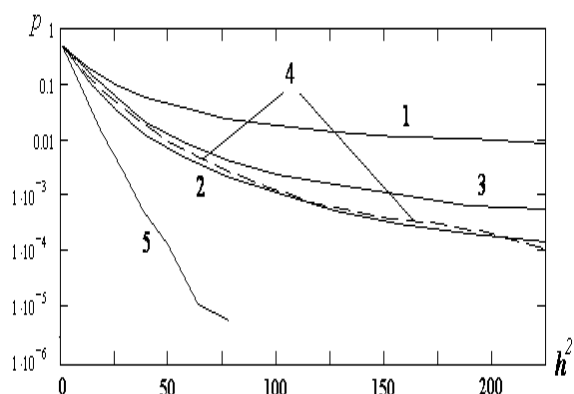


Рис. 9. Залежність імовірності помилки демодулятора від перевищення сигнал/шум

Цих недоліків позбавлені системи 4 і 5. При малих h^2 4-та система показує завадостійкість проміжну між рівнем 2 та 3-ї. Однак при збільшенні h^2 її завадостійкість стає кращою, ніж у системи 2.

Найкращі результати отримуємо для модема 5-го типу. Його структура є модифікацією модема 2-го типу, що, крім того, забезпечує і апаратне спрощення. Однак вигравш завадостійкості отриманий у цьому дослідженні за рахунок деяких втрат у захищеності інформації.

Висновки:

1. Шумові широкосмугові сигнали з кореляційно-часовою модуляцією дозволяють будувати інформаційно-комунікаційні системи, що забезпечують високу стійкість у каналах зі змінними параметрами та підвищують захист інформації від несанкціонованого доступу при достатньо простих апаратних структурах модемів.

2. Наведено структурні схеми модемів автокореляційного типу з шумовими сигналами. Методом імітаційного моделювання отримано експериментальні дані щодо завадостійкості досліджуваних автокореляційних модемів з шумовими сигналами.

3. В інформаційних системах, для яких критичним є рівень захищеності інформації, що передається, оптимальним є використання модемів 2-го типу з фазовою модуляцією шумових сигналів. У системах, які не висувають жорстких вимог до захищеності інформації, можна досягти значного поліпшення завадостійкості завдяки використанню модифікованих систем з протилежними сигналами (модеми 5-го типу).

Список літератури

1. Харкевич А. А. Передача сигналов модулированным шумом / А. А. Харкевич // Электросвязь. – 1957. – № 11. – С. 42–46.
2. Воронин А. А. Шумоподобные сигналы – эффективный метод борьбы с замираниями / А. А. Воронин // Электросвязь. – 1966. – № 7.
3. Парфенов В. И. Вероятностные модели и статистический анализ стохастических модулированных процессов в условиях параметрической априорной неопределенности : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03 / В. И. Парфенов. – Воронеж, 2002. – 297 с.
4. Лега Ю. Г. Принципы построения и исследования систем связи с использованием шумовых сигналов : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.12.14 / Ю. Г. Лега. – Черкассы, 2001. – 342 с.
5. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи : учеб. пособие для студ. вузов / М. И. Мазурков. – О. : Наука и техника, 2010. – 340 с.
6. Первунінський С. М. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача асиметричного шумового сигналу / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2012. – № 1. – С. 82–86.
7. Журавель П. Д. Определение значений задержек сигнала в системах передачи данных с корреляционно-временной шумовой модуляцией / П. Д. Журавель, С. М. Первунінський // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 1. – С. 21–28.
8. Первунінський С. М. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача шумових ортогоналізованих сигналів з двома лініями затримки / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 2. – С. 212–218.
9. Лега Ю. Г. Централізована система зв'язку множинного доступу з фазовою маніпуляцією шумового сигналу / Ю. Г. Лега, С. М. Первунінський, Р. М. Дідковський // Комп'ютерні технології друкарства. – Вип. 27. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2012. – С. 139–151.
10. Первунінський С. М. Дослідження завадостійкості бінарного автокореляційного приймача шумових сигналів з фазовою маніпуляцією / С. М. Первунінський, Р. М. Дідковський, В. В. Метеллап // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – № 1(3). – С. 56–63.
11. Дідковський Р. М. Моделювання систем зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу / Р. М. Дідковський, С. М. Первунінський // Праці Одеського політехнічного університету. – 2012. – Вип. 1 (38). – С. 198–202.
12. Патент України 74464, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, О. В. Вовченко, П. Д. Журавель ; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201205356 ; заявл. 03.05.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
13. Патент України 75721, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами з ортогоналізацією опорного сигналу / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель, О. В. Вовченко ; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201206745 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.

14. Патент України 68639, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201107502; заявл. 14.06.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.
15. Патент України 74692, МПК H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201204237; заявл. 05.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.
16. Патент України 79666, МПК H04B 7/00. Пристрій організації багатокористувацького доступу при передачі інформації шумовими сигналами / С. М. Первунінський, П. Д. Журавель; власник Черкаський державний технологічний університет – № u201213119; заявл. 19.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
8. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Noise stability of binary autocorrelation receiver of noise orthogonalized signals with two delay lines. *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu*, No. 2, pp. 212–218 [in Ukrainian].
9. Lega, Yu. G., Pervunins'kyj, S. M. and Didkovs'kyj, R. M. (2012) Centralized communication system of conjunctive access with phase manipulation of noise signal. *Kompyuterni tekhnolohiyi drukarstva*, (27). L'viv: Ukr. akad. drukarstva, pp. 139–151 [in Ukrainian].
10. Pervunins'kyj, S. M., Didkovs'kyj, R. M. and Metelap, V. V. (2008) The research of noise stability of binary autocorrelation receiver of noise signals with phase manipulation. *Naukovi zapysky UNDIK*, No. 1 (3). pp. 56–63 [in Ukrainian].
11. Didkovs'kyj, R. M. and Pervunins'kyj, S. M. (2012) Modeling of communication systems with phase manipulation of noise signal. *Praci Odes'kogo politehnichnogo universytetu*, No 1 (38), pp. 198–202 [in Ukrainian].
12. Pervunins'kyj, S. M., Vovchenko, O. V. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 74464, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201205356; stated 03.05.2012; publ. 25.10.2012, Bul. No. 20 [in Ukrainian].
13. Pervunins'kyj, S. M., Zhuravel', P. D. and Vovchenko, O. V. (2012) Patent of Ukraine 75721, MPK N04V 7/00. A device for data transmission by noise signals with reference signal orthogonalization. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201206745; stated 01.06.2012; publ. 10.12.2012, Bul. No. 23 [in Ukrainian].
14. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 68639, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201107502; stated 14.06.2011; publ. 10.04.2012, Bul. No. 7 [in Ukrainian].
15. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 74692, MPK H04B 7/00. A device for data transmission by noise signals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201204237; stated 05.04.2012; publ. 12.11.2012, Bul. No. 21 [in Ukrainian].

References

1. Kharkevich, A. A. (1957) Signal transmission by modulated noise. *Elektrosvyaz'*, No. 11, pp. 42–46 [in Russian].
2. Voronin, A. A. (1966) Noise-like signals – efficient method of decays control. *Elektrosvyaz'*, No. 7 [in Russian].
3. Parfenov, V. I. (2003) Probabilistic models and statistical analysis of stochastic modulated processes in the conditions of parametric prior uncertainty: theses for D.Sc.: 01.04.03. Voronezh, 297 p. [in Russian].
4. Lega, Yu. G. (2001) Principles of construction and investigation of communication systems with the use of noise signals: theses for D.Sc.: 05.12.14. Cherkassy, 342 p. [in Russian].
5. Mazurkov, M. I. (2010) Systems of broadband radio communication. Odessa: Nauka i tekhnika, 340 p. [in Russian].
6. Pervunins'kyj, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Noise stability of binary autocorrelation receiver of asymmetrical noise signal. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 1, pp. 82–86 [in Ukrainian].
7. Zhuravel', P. D. and Pervuninskij, S. M. (2013) Determination of values of signal delays in systems of data transmitting with correlation-time noise modulation. *Vestnik SibGUTI*, No. 1, pp. 21–28 [in Russian].

16. Pervunins'kyi, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Patent of Ukraine 79666, MPK N04V 7/00. A device of multiuser access organization during data transmission by noise sig-

nals. The owner Cherkasy State Technological University, No. u201213119; stated 19.11.2012; publ. 25.04.2013, Bul. No. 8. [in Ukrainian].

S. M. Pervunins'kyi, *Dr. Tech.Sc., professor*,

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

V. V. Metelap, *lecturer*

e-mail: chdtusciencemvv@ukr.net

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

RANDOM MODULATED PROCESSES AND THEIR USE IN BINARY MODEMS WITH NOISE SIGNALS

The development of modern information society requires the development and implementation of new information-communication technologies, more productive systems of data processing and transmission.

The variety of information sharing technologies – high-speed wired Ethernet, wireless mobile network technologies – requires the use of various terminal equipment and the application of new methods of signals analysis, synthesis and identification. Statistical research methods that are inseparably linked with ensuring of the accuracy, noise immunity and reliability of data transmission systems are promising in this regard. However, there is a number of unsolved problems of statistical studies that are common for information systems of various classes and purposes. This article is just devoted to the development of methods of analysis and synthesis of modems with noise modulated processes.

As a result of the work of described devices a signal is received that has an additional peak of correlation function at the end of clock interval, the place and sign of which are information parameter, the estimation of which is made by demodulator.

In the search of ways to improve noise immunity of noise signal the new schemes of ChSTU modems are patented and comparisons of noise immunity among themselves and with those of traditional systems are made.

Keywords: noise signals, binary modems, random processes.