

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

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

В. В. Олексюк, *аспірант*

e-mail: vadim.oleksuk@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

АНАЛІЗ БІНАРНОГО ЦИФРОВОГО МОДЕМА ШУМОВИХ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КВАДРАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ДЕМОДУЛЯТОРА

У статті представлено результати дослідження впливу квадратичної складової цифрового демодулятора на завадостійкість бінарної системи автокореляційного типу з шумовими сигналами.

Ключові слова: автокореляційна система зв'язку, бінарний модем, шумовий сигнал, квадратична складова, завадостійкість.

Постановка задачі. Серед сучасних носіїв інформації у комп'ютерних мережах широке застосування знаходять системи, що використовують широкосмугові сигнали. Найбільшого поширення отримали розробки автокореляційних систем передачі цифрової інформації з використанням шумових сигналів [1, 2]. На виході аналогового модулятора шуму в бінарній системі автокореляційного типу на тактовому інтервалі T сигнал має вигляд:

$$x(t) = \xi(t) + \alpha\xi(t - \tau), \quad t \in [0; T], \quad (1)$$

де $\alpha \in \{-1, +1\}$ – переданий інформаційний символ, що відповідає логічним бінарним сигналам «0» та «1»;

$\xi(t)$ – шумовий випадковий процес;

τ – часова затримка.

На вхід демодулятора надходить сигнал виду:

$$y(t) = x(t) + n(t) = \xi(t) + \alpha\xi(t - \tau) + n(t), \quad (2)$$

де $n(t)$ – адитивна завада типу білого гаусового шуму, що додається до сигналу в каналі зв'язку.

Значення сигналу на виході корелятора визначається величиною

$$\mathfrak{S} = \int_0^T y(t) \cdot y(t - \tau) dt.$$

Пристрій прийняття рішення за значенням \mathfrak{S} визначає оцінку сигналу $\hat{\alpha} = 1$, якщо сигнал на виході корелятора має додатне значення, інакше $\hat{\alpha} = -1$.

В роботі [3] зроблено оцінювання завадостійкості системи, розглянувши наявну в

демодуляторі квадратичної складової з апроксимацією її гаусовим розподілом. У цій роботі проведено теоретичний аналіз завадостійкості модема при врахуванні реального розподілу квадратичної складової демодулятора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перші матеріали про автокореляційні системи з шумовими сигналами надані в роботах F. Lange та W. Müller (1963 р.). Подальші результати в цьому напрямку досліджень наведені в [4–7].

Дослідження завадостійкості систем автокореляційного типу в більшості випадків проводять з використанням гаусової апроксимації випадкових величин (ВВ). В роботі розглянемо вплив наявності в демодуляторі ВВ з розподілом χ^2 , що збільшує точність теоретичної оцінки завадостійкості системи.

Мета роботи – аналіз бінарного цифрового модему шумових сигналів з урахуванням впливу квадратичної складової демодулятора на його завадостійкість, коли як сигнал використовується центрований білий гаусовий шум.

Виклад основного матеріалу. Після проходження сигналу (2) аналогового цифрового перетворювача (АЦП) на вході корелятора маємо векторне представлення вхідного сигналу [8]

$$\bar{y} = \bar{x} + \bar{n} = (\bar{\xi}^0, \alpha\bar{\xi}^\tau) + (\bar{n}^0, \bar{n}^\tau) = (\bar{\xi}^0 + \bar{n}^0, \alpha\bar{\xi}^\tau + \bar{n}^\tau),$$

де, \bar{n} – вектор сигналу завади, що відповідає опорному сигналу, а \bar{n}^τ – завада, затримана на час τ .

Сигнал на вході порогового пристрою, з урахуванням $\alpha^2 = 1$ та стаціонарності шуму, запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \mathcal{G} &= \left\langle \bar{\xi}^0 + \alpha \bar{\xi}^\tau + \bar{n}^0, \bar{\xi}^\tau + \alpha \bar{\xi}^{2\tau} + \bar{n}^\tau \right\rangle = \\ &= \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \\ &+ \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle + \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^0 \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle + \\ &+ \left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle = 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle + \\ &+ \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle + \left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\left\langle \bar{v}^0, \bar{s}^\tau \right\rangle = \sum_{j=1}^N v_j \cdot s_{j-\tau}$ – скалярний добуток

дискретних випадкових величин \bar{v}^0 та \bar{s}^τ .

В (3) можна виділити дві випадкові складові, що підпорядковуються різним законам розподілу ймовірності:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_1 &= 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle + \\ &+ \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle + \left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

і

$$\mathcal{G}_2 = \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \right\rangle. \quad (5)$$

Розв’язувальний пристрій демодулятора фіксує прийом символу $\alpha = +1$ при виконанні умови

$$\mathcal{G} \geq 0. \quad (6)$$

Нерівність (6) з урахуванням рівностей (4) і (5) можна записати у вигляді

$$\mathcal{G}_2 \geq -\mathcal{G}_1. \quad (7)$$

Порушення цієї нерівності є умовна ймовірність помилки (фіксація $\alpha = -1$ при передачі символу $\alpha = +1$) та визначається інтегралом

$$P(\alpha = -1/\alpha = +1) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^{-\mathcal{G}_1} \omega(\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2) d\mathcal{G}_1 d\mathcal{G}_2, \quad (8)$$

де $\omega(\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2)$ – сумісна щільність розподілу ВВ \mathcal{G}_1 і \mathcal{G}_2 . Щільність розподілу $\omega(\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2)$ можна отримати через згортку розподілів ВВ \mathcal{G}_1 і \mathcal{G}_2 .

Визначимо початкові моменти першого та другого порядку ВВ \mathcal{G}_1 .

$$\begin{aligned} m_1(\mathcal{G}_1) &= M[2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + \\ &+ 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle + \\ &+ \left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle] = \sum_{j=1}^N M\{2 \left\langle \xi_j, \xi_{j-\tau} \right\rangle + \\ &+ \alpha \left\langle \xi_j, \xi_{j-2\tau} \right\rangle + 2 \left\langle \xi_j, n_{j-\tau} \right\rangle + \alpha \left\langle \xi_{j-\tau}, n_{j-\tau} \right\rangle + \\ &+ \alpha \left\langle \xi_{j-2\tau}, n_j \right\rangle + \left\langle n_j, n_{j-\tau} \right\rangle\} = 0. \\ m_2(\mathcal{G}_1) &= M[2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle + \\ &+ 2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle + \alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle + \\ &+ \left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Використовуючи формулу (для спільногаусових ВВ) [10, с. 74]

$$\begin{aligned} M[\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4] &= M[\xi_1 \xi_2] M[\xi_3 \xi_4] + \\ M[\xi_1 \xi_3] M[\xi_2 \xi_4] &+ M[\xi_1 \xi_4] M[\xi_2 \xi_3] - \\ &2m_1 m_2 m_3 m_4, \end{aligned}$$

розкриваючи квадратні дужки в (9), послідовно знайдемо другі початкові моменти доданків:

$$M[2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^\tau \right\rangle]^2 = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M\{\xi_i \cdot \xi_{i-\tau} \cdot \xi_j \cdot \xi_{j-\tau}\} = 2\sigma_\xi^4 N; \quad (10)$$

аналогічно для

$$M[\alpha^2 \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^{2\tau} \right\rangle]^2 = \sigma_\xi^4 N, \quad (11)$$

$$M[\left\langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle]^2 = \sigma_n^4 N; \quad (12)$$

$$M[\alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \right\rangle]^2 = \alpha \sigma_\xi^2 N; \quad (13)$$

$$M[2 \left\langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \right\rangle]^2 = 2 \sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N; \quad (14)$$

$$M[\alpha \left\langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \right\rangle]^2 = M[\alpha \left\langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \right\rangle]^2 = \alpha \sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N. \quad (15)$$

Розглянемо значення математичного сподівання від подвоєних добутоків

$$M[\langle \xi^0, \xi^\tau \rangle \langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \rangle] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M\{\xi_i \cdot \xi_{i-\tau} \cdot \xi_j \cdot \xi_{j-2\tau}\} = 0; \quad (16)$$

аналогічно для наступних добутоків

$$M[4\alpha \langle \xi^0, \xi^\tau \rangle \langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \rangle] = M[8 \langle \xi^0, \xi^\tau \rangle \langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \rangle] = M[4 \langle \xi^0, \xi^\tau \rangle \langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \rangle] = 0; \quad (17)$$

Підсумовуючи значення початкових моментів, представлених у (10-17), отримаємо дисперсію

$$D_{g_1} = m_2(g_1) = M[2 \langle \xi^0, \bar{\xi}^\tau \rangle + \alpha \langle \bar{\xi}^0, \bar{\xi}^{2\tau} \rangle + 2 \langle \bar{\xi}^0, \bar{n}^\tau \rangle + \alpha \langle \bar{\xi}^\tau, \bar{n}^\tau \rangle + \alpha \langle \bar{\xi}^{2\tau}, \bar{n}^0 \rangle + \langle \bar{n}^0, \bar{n}^\tau \rangle]^2 = (18)$$

$$+ 2\sigma_\xi^4 N + \sigma_\xi^4 N + 2\sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N + 2\sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N + \sigma_n^4 N = (3\sigma_\xi^4 + 4\sigma_\xi^2 \sigma_n^2 + \sigma_n^4) N = \sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N (3\sigma_\xi^2 / \sigma_n^2 + 4 + \sigma_n^2 / \sigma_\xi^2).$$

Використовуючи гаусову апроксимацію для щільності розподілу ВВ, що входять в \mathcal{G}_1 , композицію законів щільності розподілу ВВ \mathcal{G}_1 в (4) можна описати гаусовим розподілом [9]

$$\omega(g_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{g_1}}} \exp\left(-\frac{g_1^2}{2D_{g_1}}\right). \quad (19)$$

Визначимо щільність розподілу ВВ \mathcal{G}_2 , у формулі (5):

$$g_2 = \alpha \langle \bar{\xi}^\tau, \bar{\xi}^\tau \rangle = \alpha \sum_{i=1}^N \xi_i^2. \quad (20)$$

В (20) коефіцієнт $\alpha = \pm 1$ вказує на знак інформаційного біту, представленого N відліками вхідного сигналу $y(t)$. Знак цього коефіцієнта змінює лише область розташування щільності розподілу $\omega_{g_2}(y)$ з позитивної ($y \geq 0$) при $\mathcal{G}_2 \geq 0$ на негативну при зворотному значенні $\alpha < 0$. Опишемо щільність розподілу величини

$$\eta = |g_2| = \sum_{i=1}^N \xi_i^2, \quad (21)$$

Дисперсія центрованої ВВ ξ_i в (20) дорівнює σ_ξ^2 . Тоді щільність розподілу вели-

чини $\eta = |g_2|$ як ВВ з розподілом χ^2 N -го порядку [10, с. 345] дорівнює

$$p_\eta(y; N) = \begin{cases} \frac{y^{N/2-1} \exp(-y/(2\sigma_\xi^2))}{\sqrt{(2\sigma_\xi^2)^N} \Gamma(N/2)}, & y \geq 0, \\ 0, & y < 0, \end{cases} \quad (22)$$

де, $\Gamma(v) = \int_0^\infty x^{v-1} e^{-x} dx$ - гамма-функція.

Узагальнюючи отриманий розподіл величини $\eta = |g_2|$ на ВВ $\mathcal{G}_2 = \alpha |g_1|$, з урахуванням величини $\alpha = -1$, отримаємо

$$\omega_\eta(y; N) = \begin{cases} \frac{|y|^{N/2-1} \exp(-|y|/2\sigma_\xi^2)}{\sqrt{(2\sigma_\xi^2)^N} \Gamma(N/2)}, & y \leq 0, \\ 0, & y > 0, \end{cases} \quad (23)$$

Сумісний розподіл ВВ \mathcal{G}_1 і \mathcal{G}_2 визначається із згортки розподілів (19) і (23)

$$\omega_{g_1+g_2}(y) = \int_{-\infty}^\infty \omega_{g_1}(\alpha y - x) \omega_{g_2}(x) dx = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{g_1}}} \exp\left(-\frac{(\alpha y - x)^2}{2D_{g_1}}\right) \frac{x^{N/2-1} \exp(-x/2\sigma_\xi^2)}{\sqrt{(2\sigma_\xi^2)^N} \Gamma(N/2)} dx = \int_0^\infty \frac{x^{N/2-1} \exp[-x/(2\sigma_\xi^2) - (\alpha y - x)^2/(2D_{g_1})]}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi D_{g_1}} (2\sigma_\xi^2)^N} dx. \quad (24)$$

Тоді ймовірність помилки демодулятором при рівномірній апріорній передачі бінарних послідовок буде визначена із виразу

$$P_{\text{ber}} = \int_{-\infty}^0 \omega_{g_1+g_2}(y) dy = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty x^{N/2-1} \exp\left[-\frac{x}{2\sigma_\xi^2} - \frac{(y-x)^2}{2D_{g_1}}\right] dx dy}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi D_{g_1}} (2\sigma_\xi^2)^N}. \quad (25)$$

Підставивши значення дисперсії D_{g_1} з (18) в (25), маємо

$$P_{\text{ber}} = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty x^{N/2-1} \exp\left[-\frac{x}{2\sigma_\xi^2} - \frac{(y-x)^2}{2(\sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N (\frac{3\sigma_\xi^2}{\sigma_n^2} + 4 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_\xi^2}))}\right] dx dy}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi \sigma_\xi^2 \sigma_n^2 N (\frac{3\sigma_\xi^2}{\sigma_n^2} + 4 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_\xi^2})} (2\sigma_\xi^2)^N}. \quad (26)$$

Для розрахунків завадостійкості демодулятора по (26) доцільно виділити параметр h^2 – перевищення сигнал/шум

$$h^2 = \frac{E_b}{N_0},$$

де E_b – енергія сигнальної складової інформаційного біту;

$N_0 = 2\sigma_n^2$ – одностороння спектральна щільність потужності завади.

Згідно з (1) при використанні для $x(t)$ дискретного опису енергія сигнальної складової дорівнює

$$E_b = 2\sigma_\xi^2 N,$$

тому

$$h^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{\sigma_\xi^2 N}{\sigma_n^2}.$$

Враховуючи це значення, h^2 у (26) матиме вираз

$$P_{BER} = \frac{\int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} x^{N/2-1} \exp\left[-\frac{xN}{2\sigma_n^2 h^2} - \frac{(y-x)^2}{2(\sigma_n^4(3\frac{h^2}{N} + 4 + \frac{N}{h^2}))}\right] dx dy}{\Gamma(N/2) \sqrt{2\pi\sigma_n^4(3\frac{h^2}{N} + 4 + \frac{N}{h^2})(2\frac{N}{\sigma_n^2 h^2})^N}} \quad (27)$$

В цій формулі дисперсія завади σ_n^2 присутня явно та присутня неявно в параметрі h^2 . Аналіз показує, що без зміни результату розрахунків завадостійкості у формулі (27) можна прийняти значення $\sigma_n^2 = 1$.

На рис. 1 представлено графік залежності ймовірності виникнення помилки P_{BER} від відношення сигнал/шум h^2 в бінарній автокореляційній системі при сталих значеннях кількості відліків N .

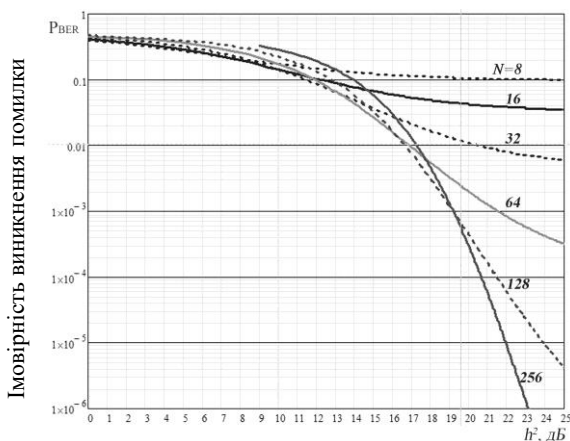


Рис. 1. Залежність P_{BER} від h^2 при сталих значеннях кількості відліків N

Порівняємо отримане теоретичне значення завадостійкості із результатами імітаційного моделювання та відповідними результатами, що наведені для гаусової апроксимації складових в [3]. З графіка (рис. 2)

видно, що розрахунки ймовірності по (27) з урахуванням розподілу χ^2 при всіх значеннях N краще відповідають результатам, отриманим імітаційним моделюванням, порівняно з урахуванням гаусової апроксимації ВВ. У той же час при деяких значеннях N (наприклад $N=64$) спостерігається велика різниця між результатами теоретичних розрахунків та імітаційним моделюванням при великих значеннях відношення сигнал/завада.

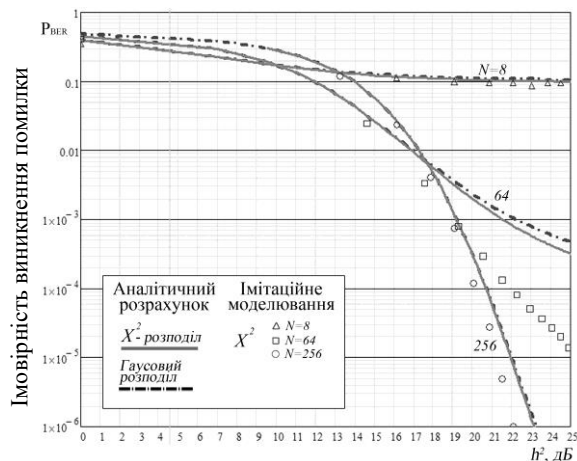


Рис. 2. Залежність P_{BER} від h^2 – аналітичні розрахунки та імітаційне моделювання

При великих значеннях N ($N=256$) апроксимація квадратичним розподілом наближається до значень розрахунків при гаусовій апроксимації ВВ.

Представимо залежність ймовірності виникнення помилки від кількості відліків N при сталих значеннях відношення h^2 (рис. 3).

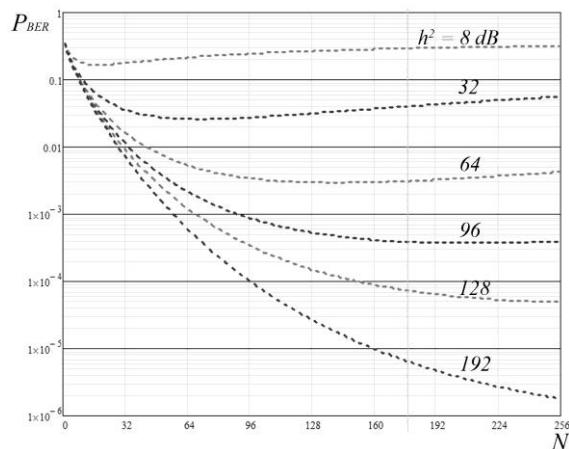


Рис. 3. Залежність P_{BER} від N при сталих значеннях h^2

З графіка видно, що в наведених залежностях має місце екстремум типу мінімуму. При збільшенні перевищення h^2 екстремальне значення величини N збільшується.

На рис. 4 зображено графічну залежність відношення сигнал/завада від кількості відліків при сталій ймовірності помилки біту P_{BER} . Бачимо, що при збільшенні значення кількості відліків інформаційного символу N можна забезпечити необхідний рівень завадостійкості демодулятора.

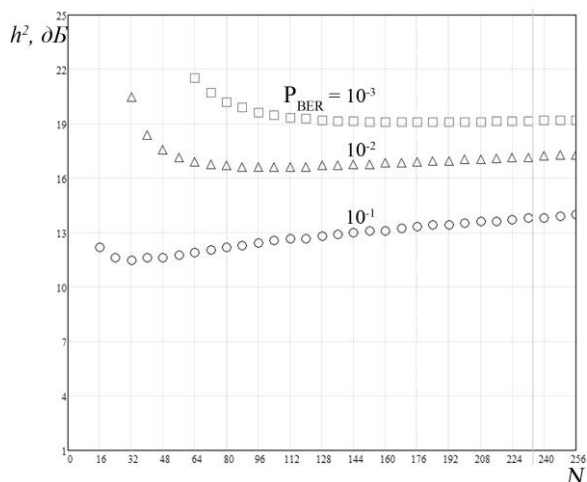


Рис. 4. Залежність h^2 від кількості відліків N при сталій ймовірності помилки P_{BER}

Висновки. Виконано аналіз впливу квадратичної складової, що виникає в демодуляторі, на завадостійкість бінарного цифрового модему.

Показано, що при врахуванні закону розподілу χ^2 квадратичної складової демодулятора досягається краща відповідність між аналітичними результатами та імітаційним моделюванням, ніж при використанні гаусової апроксимації ВВ.

Порівняння отриманої теоретичної оцінки завадостійкості (з розподілом χ^2) з результатами імітаційного моделювання модему показало наявність деякого відхилення, що спостерігається в зоні малих ($h^2 < 10$) та великих ($h^2 > 20$) значень відношення сигнал/шум, що потребує проведення подальших досліджень.

Список літератури

1. Wai Tam, Francis Lau, Chi Tse, Digital communication with chaos. N.Y.: Elsevier, 2006. 256 p.
2. Лега Ю. Г., Первунінський С. М., Гузнін С. С. Дослідження завадостійкості М-позиційного автокореляційного приймача шумових сигналів в каналі з адитивним білим гаусовим шумом. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2009. № 645. С. 167–176.
3. Первунінський С. М., Журавель П. Д. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача асиметричного шумового сигналу. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 1. С. 82–86.
4. Журавель П. Д., Первунінський С. М. Определение значений задержек сигнала в системах передачи данных с корреляционно-временной шумовой модуляцией. *Вестник СибГУТИ*. 2013. № 1. С. 21–28.
5. Первунінський С. М., Журавель П. Д. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача шумових ортогоналізованих сигналів з двома лініями затримки. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2012. № 2. С. 212–218.
6. Лега Ю. Г., Первунінський С. М., Дідковський Р. М. Централізована система зв'язку множинного доступу з фазовою маніпуляцією шумового сигналу. *Комп'ютерні технології друкарства*. Вип. 27. Львів: Укр. акад. друкарства, 2012. С. 139–151.
7. Первунінський С. М., Дідковський Р. М., Метелап В. В. Дослідження завадостійкості бінарного автокореляційного приймача шумових сигналів з фазовою маніпуляцією. *Наукові записки УНДІЗ*. 2008. № 1 (3). С. 56–63.
8. Первунінський С. М., Дідковський Р. М. Вплив помилки синхронізації на завадостійкість систем зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2011. Вип. 2 (36). С. 217–221.
9. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. Санкт-Петербург: Наука, 2001. 295 с.

10. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учебное пособие для вузов. Москва: Радио и связь, 1991. 608 с.

References

1. Wai Tam, Francis Lau and Chi Tse (2006) Digital communication with chaos. N.Y.: Elsevier, 256 p.
2. Lega, Yu. G. Pervuninsky, S. M. and Ghuznin, S. S. (2009) Investigation of the noise immunity of M-position auto-correlation receiver of noise signals in the channel with additive white Gaussian noise. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Radio Electronics and Telecommunication*, No. 645, pp. 167–176 [in Ukrainian].
3. Pervuninsky, S. M. and Zhuravel, P. D. (2012) The noise immunity of binary autocorrelation receiver of an asymmetric noise signal. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, No. 1, pp. 82–86 [in Ukrainian].
4. Zhuravel, P. D. and Pervuninsky, 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].
5. Pervuninsky, S. M. and Zhuravel', P. D. (2012) Noise stability of binary autocorrelation receiver of noise orthogonalized signals with two delay lines. *Visnyk Hmel'nyts'kogo nacional'nogo universytetu*, No. 2, pp. 212–218 [in Ukrainian].
6. Lega, Yu. G., Pervuninsky, S. M. and Didkovsky, R. M. (2012) Centralized communication system of conjunctive access with phase manipulation of noise signal. *Kompyuterni tekhnolohiyi druzkarstva*, (27). L'viv: Ukr. akad. druzkarstva, pp. 139–151 [in Ukrainian].
7. Pervuninsky, S. M., Didkovsky, R. M. and Metelap, V. V. (2008) The research of noise stability of binary autocorrelation receiver of noise signals with phase manipulation. *Naukovi zapysky UNDIIZ*, No. 1 (3), pp. 56–63 [in Ukrainian].
8. Pervuninsky, S. M. and Didkovsky, R. M. (2011) The impact of synchronization error on noise stability of communication systems with phase manipulation of noise signal. *Praci Odeskogo politehnicznego universytetu*, No. 2 (36), pp. 217–221 [in Ukrainian].
9. Vadzynskij, R. N. (2001) Handbook on probabilistic distributions. St. Petersburg: Nauka. 295 p. [in Russian].
10. Tykhonov, V. Y. and Kharysov, V. N. (1991) Statistical analysis and synthesis of radio-technical devices and systems: a manual for high schools. Moscow: Radio and communication, 608 p. [in Russian].

S. M. Pervuninsky, *Dr.Tech.Sc., professor*

e-mail: cherkpervun@rambler.ru

V. V. Oleksjuk, *Ph.D., postgraduate student*

e-mail: vadim.oleksuk@gmail.com

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ANALYSIS OF BINARY DIGITAL MODEM OF NOISE SIGNALS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF DEMODULATOR QUADRATIC COMPONENT

The article presents the research results of the influence of quadratic component of digital demodulator on noise immunity of binary system of autocorrelation type with noise signals.

Key words: *autocorrelation communication system, binary modem, noise signal, quadratic component, noise immunity.*

Стаття надійшла 05.03.2018.

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