УДК: 621.391

Р.М. ДІДКОВСЬКИЙ, С.С. ГУЗНІН
Черкаський державний технологічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ХАОТИЧНОЇ МОДУЛЯЦІЇ З ДОДАВАННЯМ ОРТОГОНАЛІЗОВАНОЇ ЗАТРИМАНОЇ КОМПОНЕНТИ

Представлені методика та результати теоретичного і експериментального дослідження завадостійкості приймача шумових ортогоналізованих сигналів у каналі, де діє адитивний білий гауссовий шум. Створено макет системи прийому-передачі шумових ортогоналізованих сигналів через радіочастотний кабель. Досліджено параметри побудованої системи зв'язку.

In paper proposed methods and results of theoretical and experimental researches of noise stability of receiver that based on noisy ortogonal signal with transmission via AWG channel. Was created and researched performance of layout of the transmission-reception system with transmission via radiofrequency cable.

Ключові слова: приймачі ортогоналізованих сигналів, радіочастотні кабелі, дослідження.

Постановка задачі. Проблема створення систем зв'язку, в яких роль носія виконував би шумовий сигнал, турбувала вчених і практиків ще в п'ятдесятих-сімдесятих роках минулого століття [1-3]. Однак, можливості тогочасної елементної бази не дозволили широкомасштабного впровадження такого типу систем. Результатом досліджень у даному напрямку стали надширокосмугові системи з псевдошумовими сигналами [4-5]. Сучасний стан розвитку техніки і методів цифрової обробки сигналів дозволяє на новому рівні підійти до питання розробки систем зв'язку на базі шумових сигналів [6].

Під шумовим сигналом розуміємо реалізацію деякого випадкового процесу. Будемо надалі вважати, що даний випадковий процес – стаціонарний з нормальним розподілом і нульовим математичним сподіванням.

Зберігаючи всі позитивні якості широкосмугових систем передачі інформації, системи з шумовими сигналами мають високий рівень скритності передачі даних і практично гарантують неможливість "підслуховування", що підтверджує актуальність створення та дослідження систем зв'язку на базі шумових сигналів. Крім того системи зв'язку даного типу стійкі до проблем багатохвильового розповсюдження сигналу.

В [7] вміщено дослідження завадостійкості системи з протилежними сигналами, яка вперше запропонована в [8] (див. рис. 1). Це бінарна система зв'язку з відносною фазовою маніпуляцією шумового сигналу, в якій вихідний сигнал передавача протягом символьного інтервалу $[0;T)$ має вигляд

$$y(t)=\begin{cases} x(t)+x(t-t), & l(t)=0, \\ x(t)-x(t-t), & l(t)=1, \end{cases}$$

де $x(t)$ – сигнал на виході генератора шуму, t – параметр затримки, а $l(t)$ – біт інформаційного повідомлення, що передається в поточний момент. Структура цього сигналу така, що пристрій має високий рівень власних завад, а отже недостатню завадостійкість [9, 10].

Метою даної роботи є: 1) відшукання способів зменшення рівня власних завад системи зв'язку з відносною фазовою маніпуляцією шумових сигналів; 2) аналітичне та статистичне дослідження завадостійкості вдосконаленої системи; 3) визначення швидкості передачі інформації по радіочастотному кабелю при заданому рівні імовірності помилки передачі біта.

Вирішення задачі

Для вирішення поставленої задачі доповнимо схему передавача пристроєм, який будемо називати «ортогоналізатором» (див. рис. 2). Зауважимо одразу, що параметр затримки в модифікованій системі зручно вибрати рівним тривалості символьного інтервалу: $t=T$.

Ортогоналізатор реалізує наступну модель перетворення сигналу

$$z(t)=x(t-T)-\frac{\int_0^T x(t-T)\cdot z(t-T)dt}{\int_0^T z(t-T)^2dt}\cdot z(t-T)-\frac{\int_0^T x(t-T)\cdot z(t-2T)dt}{\int_0^T z(t-2T)^2dt}\cdot z(t-2T). \quad (1)$$

Сигнал $z(t)$, що спостерігається на виході, буде ортогональним до сигналів двох попередніх символьних інтервалах. Сигнали на виході інтеграторів змінюють своє значення лише на межі символьних інтервалів (рис. 3). В результаті на поточному символьному інтервалі будуть діяти коефіцієнти обчислені на попередньому інтервалі. Щоб усунути цю проблему вхідні сигнали ортогоналізатора мають бути затримані на час T.

$$y(t)=\begin{cases} z(t)+z(t-T), & l(t)=0, \\ z(t)-z(t-T), & l(t)=1, \end{cases} \quad (2)$$

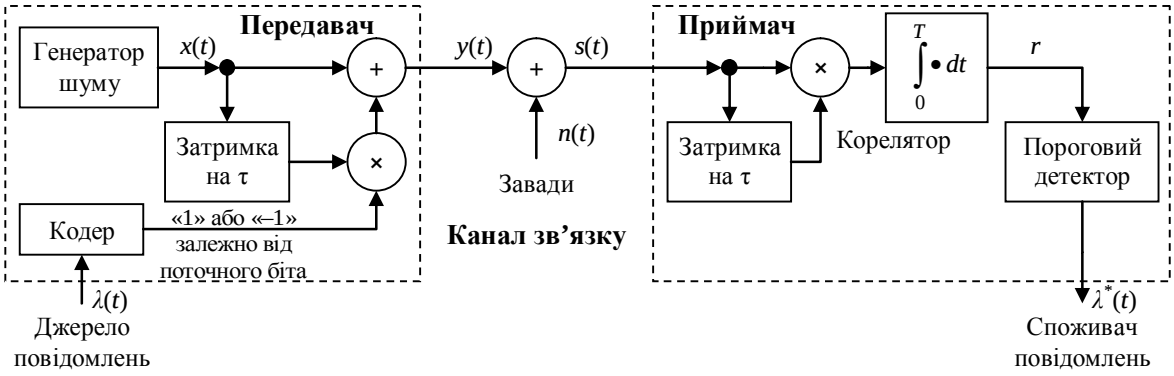

Рис. 1. Пристрій для передачі інформації з використанням протилежних шумових сигналів

Зауважимо, що на структуру та алгоритм роботи приймача вказана модифікація системи ніяк не впливає. На вході приймача спостерігається сигнал виду

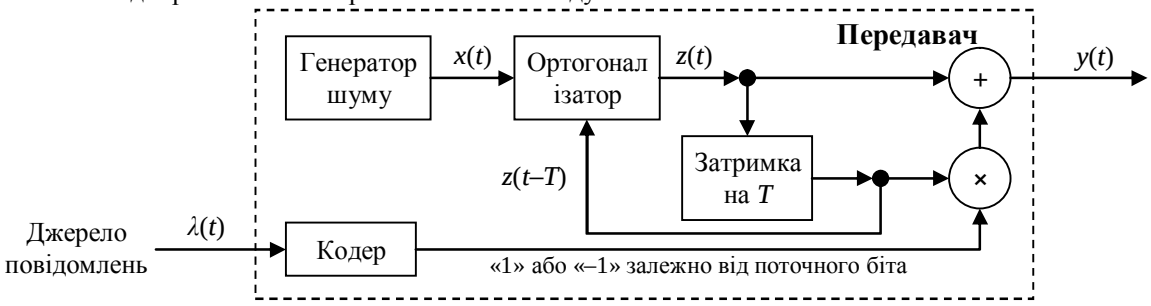

Рис. 2. Модифікована структурна схема передавача

З урахуванням внесених в структуру передавача змін маємо, що сигнал на виході передавача набуде вигляду:

$$s(t) = y(t) + n(t)\,, \tag{3}$$

де $n(t)$ – адитивна завада каналу зв'язку.

Значення сигналу на виході корелятора оновлюється в кінці кожного символьного інтервалу і визначається величиною

$$r = \int_0^T s(t)s(t-T)dt = \int_0^T (y(t)+n(t))(y(t-T)+n(t-T))dt\,. \tag{4}$$

Обчислене значення r надходить до порогового детектора, який, залежно від знака r, надсилає до споживача повідомлень „0", якщо $r > 0$, або „1", якщо $r < 0$.

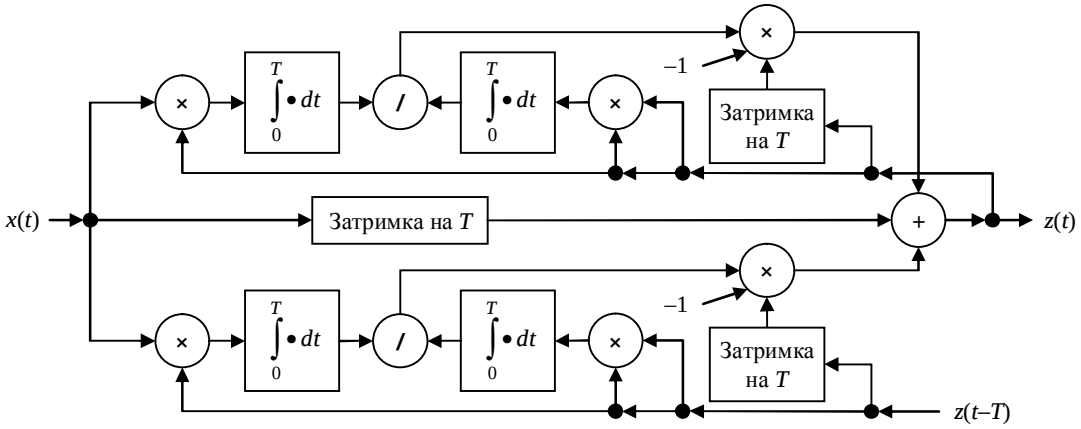

Рис. 3. Структурна схема ортогоналізатора

В розгорнутому вигляді при передачі „0" формула (4) запишеться так

$$\begin{aligned} r = &\int_0^T z(t-T)z(t-T)dt + \int_0^T z(t)z(t-T)dt + \int_0^T z(t)z(t-2T)dt + \int_0^T z(t-T)z(t-2T)dt + \\ &+ \int_0^T z(t)n(t-T)dt + \int_0^T z(t-T)n(t-T)dt + \int_0^T n(t)z(t-T)dt + \int_0^T n(t)z(t-2T)dt + \int_0^T n(t)n(t-T)dt. \end{aligned} \tag{5}$$

Лише перший доданок формули несе корисну інформацію. Та на відміну від схеми запропонованої в [8] доданки 2, 3, 4 не збільшують невизначеність результату, оскільки дорівнюють нулю.

Якщо імовірність появи в інформаційному повідомленні "0" і "1" однакова, то теоретична оцінка імовірності помилки передачі біта в системі зв'язку зводиться до обчислення інтегралу

$$P_{пом} = \int_{-\infty}^{0} f_r(r)dr\,, \tag{6}$$

де $f_r(x)$ – функція щільності розподілу величини r.

При цифровій обробці фрагмент вхідного сигналу приймача (3), що спостерігається на i-му символьному інтервалі, набуде вигляду вектора $\bar{s}_i = (s_{1,i}, s_{2,i}, ..., s_{N,i})$, де $s_{i,j} = s_i(t_j)$, $t_j = \Delta t \cdot (j-1)$, $j = 1,2,..., N$, N – кількість відліків сигналу, що утворюються протягом символьного інтервалу, Δt – період дискретизації. Будемо вважати, що період дискретизації багато більший інтервалу кореляції генерованого сигналу $x(t)$ та завад каналу зв'язку $n(t)$. Тоді координати вектора $\bar{s}$ є незалежними випадковими величинами розподіленими за одним законом (в силу стаціонарності процесів).

Позначимо $\bar{z}_i$, $\bar{z}_{i-1}$ та $\bar{z}_{i-2}$ – вектори, що утворюються в результаті дискретизації сигналу $z(t)$ протягом трьох послідовних символьних інтервалів. Тоді формула (1) запишеться у вигляді

$$\bar{z}_i = \bar{x}_{i-1} - \frac{<\bar{x}_{i-1}, \bar{z}_{i-1}>}{<\bar{z}_{i-1}, \bar{z}_{i-1}>}\bar{z}_{i-1} - \frac{<\bar{x}_{i-1}, \bar{z}_{i-2}>}{<\bar{z}_{i-2}, \bar{z}_{i-2}>}\bar{z}_{i-2}\,,$$

де $<\cdot,\cdot>$ – символ скалярного добутку.

Формула (5) з урахуванням (1) і (2) в дискретному часі набуде вигляду

$$r_i = <\bar{s}_i, \bar{s}_{i-1}> = <\bar{z}_{i-1}, \bar{z}_{i-1}> + <\bar{z}_i, \bar{n}_{i-1}> + <\bar{z}_{i-1}, \bar{n}_{i-1}> + <\bar{z}_{i-1}, \bar{n}_i> + <\bar{z}_{i-2}, \bar{n}_i> + <\bar{n}_i, \bar{n}_{i-1}>.$$

Розподіл величини r_i має негауссовий характер навіть за умов гауссового розподілу процесів $x(t)$ та $n(t)$. При $N = 1$ число r_i дорівнює

$$r_i = z_{1,i-1}^2 + z_{1,i}n_{1,i-1} + z_{1,i-1}n_{1,i-1} + z_{1,i-1}n_{1,i} + z_{1,i-2}n_{1,i} + n_{1,i}n_{1,i-1}.$$

Виразимо з цієї рівності $n_{1,i-1}$, отримаємо

$$n_{1,i-1} = \frac{r_i - z_{1,i-1}^2 - z_{1,i-1}n_{1,i} - z_{1,i-2}n_{1,i}}{z_{1,i} + z_{1,i-1} + n_{1,i}},\ \frac{\partial n_{1,i-1}}{\partial r_i} = \frac{1}{z_{1,i} + z_{1,i-1} + n_{1,i}}.$$

Тоді за [11] отримаємо, що функція щільності розподілу $f_r(r,1)$ величини r при $N = 1$ і передачі «0» ($l_i = 0$) має вигляд

$$f_r(r,1) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(z_{1,i},0,\sqrt{D(z)})\cdot f(z_{1,i-1},0,\sqrt{D(z)})\cdot f(z_{1,i-2},0,\sqrt{D(z)})\cdot f(n_{1,i},0,\sqrt{D(n)})\cdot$$
$$\cdot f\left(\frac{r - z_{1,i-1}^2 - z_{1,i-1}n_{1,i} - z_{1,i-2}n_{1,i}}{z_{1,i} + z_{1,i-1} + n_{1,i}},0,\sqrt{D(n)}\right)\cdot\frac{1}{|z_{1,i} + z_{1,i-1} + n_{1,i}|}\,dz_{1,i}\,dz_{1,i-1}\,dz_{1,i-2}\,dn_{1,i},$$

де $f(x,a,s) = \frac{1}{\sqrt{2p}\,s}e^{-\frac{(x-a)^2}{2s^2}}$ – функція щільності нормального розподілу, $D(z)$ та $D(n)$ – дисперсії відповідних процесів.

Для більших значень N функцію щільності $f_r(r,N)$ можна отримати рекурсивно як згортку пари функцій при N_1 і N_2 таких, що $N_1 + N_2 = N$. Наприклад

$$f_r(r,2) = \int_{-\infty}^{\infty} f_r(x,1)\cdot f_r(r-x,1)\,dx\,.$$

На рис. 4 проілюстровано результати побудови функції щільності величини r за вказаними вище формулами при $D(x) = 1$ та $D(n) = 2$. Тоді $D(y) = 2D(x) = 2$, і відношення сигнал/шум $q = \frac{D(y)}{D(n)} = 1$. Відповідні результати розрахунку імовірності помилки, проведені за формулою (6), наведено в таблиці 2.

Імітаційне моделювання даної системи дає змогу оцінити її завадостійкість шляхом моделювання роботи кожного елементу схем рис. 1 та рис. 2. Проведення серії імітаційних обчислювальних експериментів дозволяє перевірити адекватність теоретичних розрахунків. Побудова імітаційної моделі виконана у середовищі програмування Delphi 10.

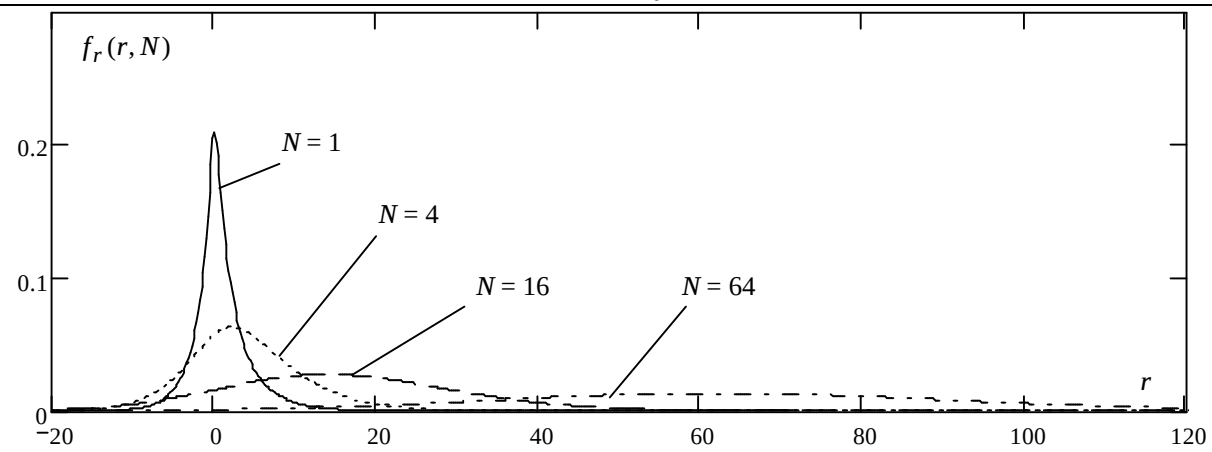

Рис. 4. Функція щільності розподілу величини r

До вхідних параметрів системи належать: кількість відліків на один символьний інтервал N (об'єм вибірки), кількість символів (біт) в інформаційному повідомленні Ns, значення відношення сигнал/шум q. Вихідний параметр – кількість помилок при проходженні сигналу через канал зв'язку Ne. Тоді відношення $P_{пом_імім} = \frac{Ne}{Ns}$ є експериментальною оцінкою імовірності помилки передачі біта інформації через дану систему зв'язку.

Узагальнений алгоритм функціонування імітаційної моделі системи відображено на рис. 5.

В якості генератора шуму (рис. 1) програма використовує функцію randg (m, σ), яка генерує послідовність випадкових чисел, розподілених за нормальним законом з математичним сподіванням m і середньоквадратичним відхиленням σ, та входить до складу модуля System середовища програмування «Delphi 10». Для перевірки якості даного генератора сформуємо за його допомогою вибірку об'ємом 10^6, розрахуємо для цієї вибірки кумулянтні коефіцієнти (табл. 1) та побудуємо гістограму (рис. 6).

Таблиця 1

Кумулянтні коефіцієнти обчислені для вибірки згенерованої функцією randg ()

Порядок	Значення	Порядок	Значення
1	-0.00019	6	0.02202
2	1	7	-0.04324
3	-0.00089	8	0.09895
4	-0.00789	9	-0.18313
5	0.00924	10	-1.21032

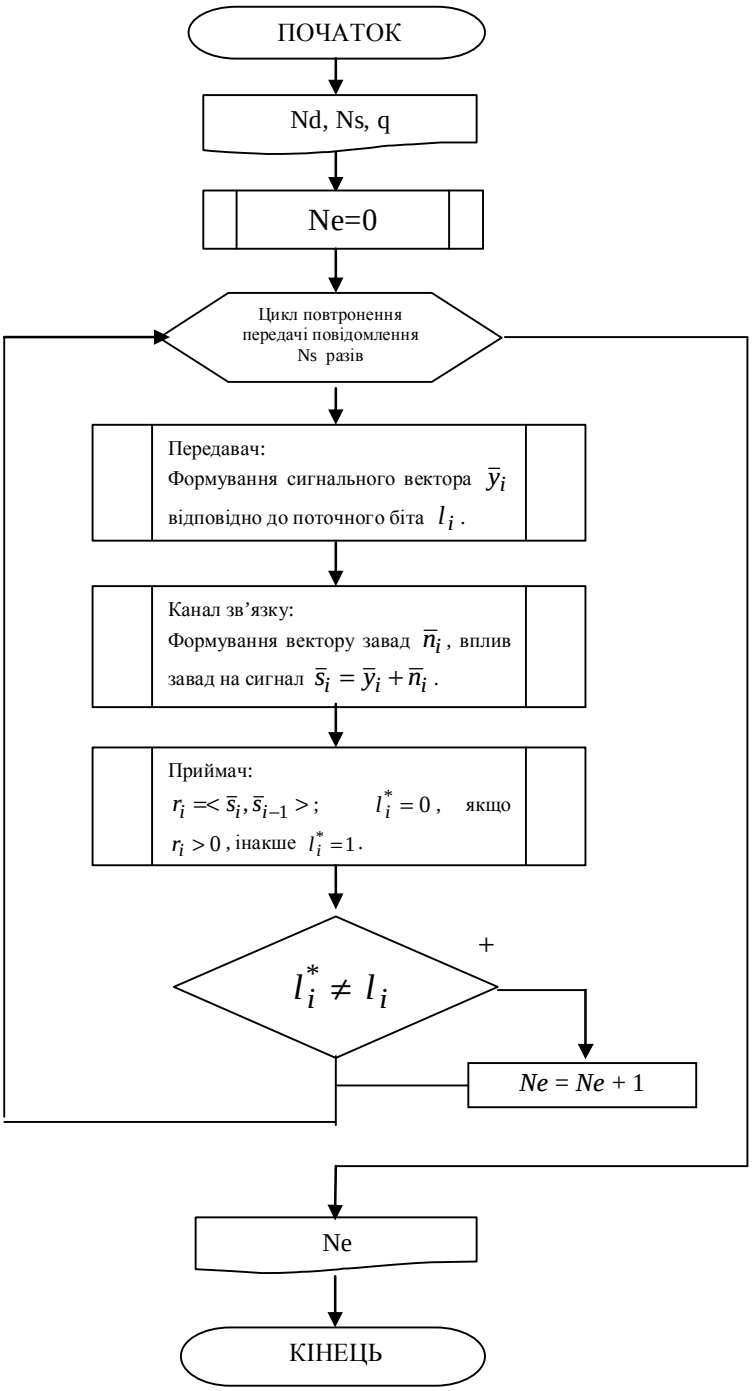

Рис. 5. Узагальнена блок-схема імітаційної моделі

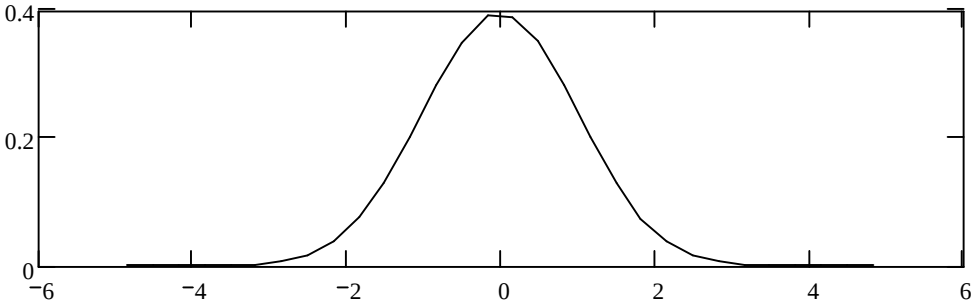

Рис. 6. Гістограма емпіричного розподілу вибірки згенерованою функцією randg (0, 1)

З рисунку видно, що гістограма утвореної вибірки добре відтворює форму функції щільності нормального розподілу. Крім того, значення вибіркових кумулянтних коефіцієнтів добре узгоджуються з теоретичними (всі дорівнюють 0, за виключенням другого, який дорівнює 1). Отже, можемо зробити висновок, що вказаний спосіб генерації шумової послідовності має задовільні статистичні характеристики і може бути використаний в моделі системи зв'язку.

В таблиці 2 наведено результати теоретичної оцінки та даних імітаційного моделювання імовірності виникнення помилки передачі біта для систем з ортогоналізованими та неортогоналізованими сигналами залежно від кількості відліків на символьному інтервалі при значенні відношення сигнал/шум рівному одиниці. Середнє значення модуля відносної величини відхилення даних імітаційного моделювання від даних теоретичних розрахунків дорівнює $d_c = \frac{1}{N}\sum \frac{\left| P_{пом_імім} - P_{пом_теор} \right|}{P_{пом_теор}} \approx 10.94\%$. Отже результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з теоретичними оцінками.

Таблиця 2

Дані математичного розрахунку та імітаційного моделювання імовірності виникнення помилки прийому біта в системі з ортогоналізованими сигналами

Кількість відліків на символьному інтервалі, *N*	Імовірність виникнення помилки			
	Системи з ортогонолізованою затриманою компонентою		Без ортогоналізації	
	теоретичний розрахунок	дані імітаційного моделювання	теоретичний розрахунок	дані імітаційного моделювання
1	0.44734693	0.472242	0.41048	0.419476
2	0.37810564	0.451612	0.372531	0.374414
4	0.30832734	0.374536	0.315264	0.317162
8	0.22768228	0.263294	0.242404	0.242458
16	0.13965796	0.156638	0.158218	0.158496
32	0.06079167	0.067254	0.076816	0.076476
64	0.01382545	0.014854	0.021433	0.021376
128	8.9389e-4	9.3e-4	0.002059	0.00205
256	4.85550655e-6	5e-6	2.4e-5	2.6e-5
512	1.92137279e-10	0	4.5801e-9	0

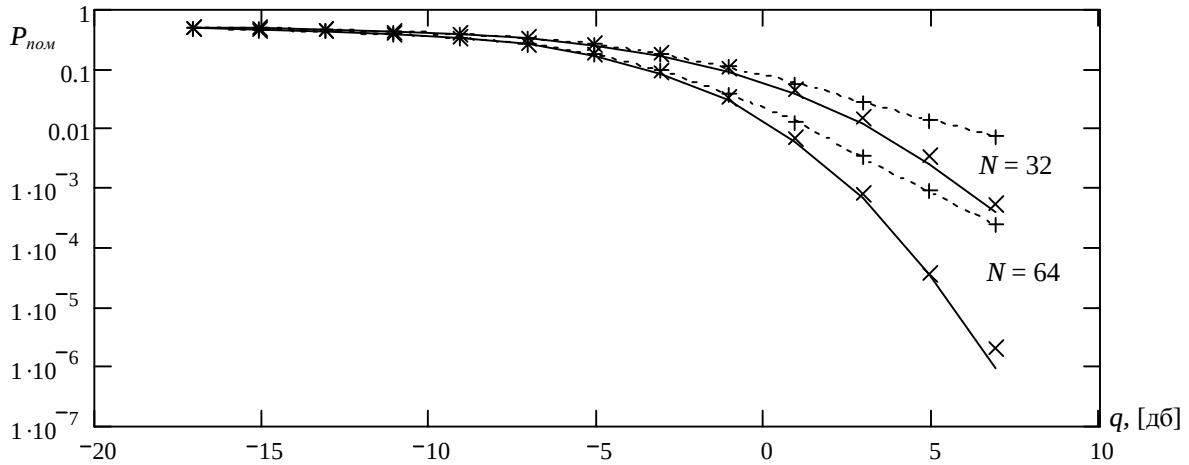

Рис. 7. Залежності імовірності помилки від відношення сигнал/шум для систем з ортогоналізованими сигналами – – – та без ортогоналізації – – – – (x, + – результати імітаційних експериментів)

На основі теоретичних розрахунків та даних обчислювальних імітаційних експериментів можна

порівняти завадостійкість систем зв'язку з ортогоналізацією шумових сигналів та без ортогоналізації. На рис. 7 наведені графіки залежностей імовірності помилки передачі біта інформації від значення відношення сигнал/шум при сталій довжині символьного інтервалу, що відповідає 32 та 64 відлікам в дискретному представленні сигналу.

З рисунку видно, що введення до структури передавача блоку ортогоналізації виправдовується значним підвищенням завадостійкості системи особливо при незначних рівнях шумів у каналі зв'язку.

Задля експериментального дослідження працездатності системи, структурна схема якої зображена на рис. 1 та 2, побудовано макет. Макет складається з двох ПЕОМ; радіочастотного кабелю, який містить 2 провідники, що з'єднують між собою вихід звукової плати Line-OUT одного ПЕОМ з входом звукової карти Line-IN іншого ПЕОМ; двох програм, які моделюють роботу функціональних блоків передавача та приймача.

На ПЕОМ, яка виконує роль передавача, виконується програма "Transmitter". Дана програма, моделюючи роботу передавача (рис. 2), генерує шумовий сигнал та заваду заданої довжини, додає до сигналу заваду, отриманий сигнал у вигляді дискретних відліків записує до буферу звукової карти. Звукова карта за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) формує з отриманих відліків інформаційного сигналу та завади аналоговий сигнал та подає на вихід Line-OUT карти [12, 13].

Згідно з аналізом АЧХ системи (передавач-канал зв'язку-приймач), наведеної на рис. 8, частоту дискретизації передавача було встановлено на рівні 16000 Гц.

На іншому ПЕОМ, на вході Line-IN звукової карти аналоговий сигнал (рис. 6) направляються на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), та з частотою 32000 Гц, (мінімальна частота необхідна для відтворення переданого сигналу за теоремою Котельникова) отримані відліки, які є сумою інформаційного сигналу та завади, надходять до буферу звукової карти. Програма "Receiver", моделюючи роботу функціональних блоків приймача (рис. 1), отримує дискретні відліки з буферу звукової карти та на їх основі робить оцінку прийнятого символу.

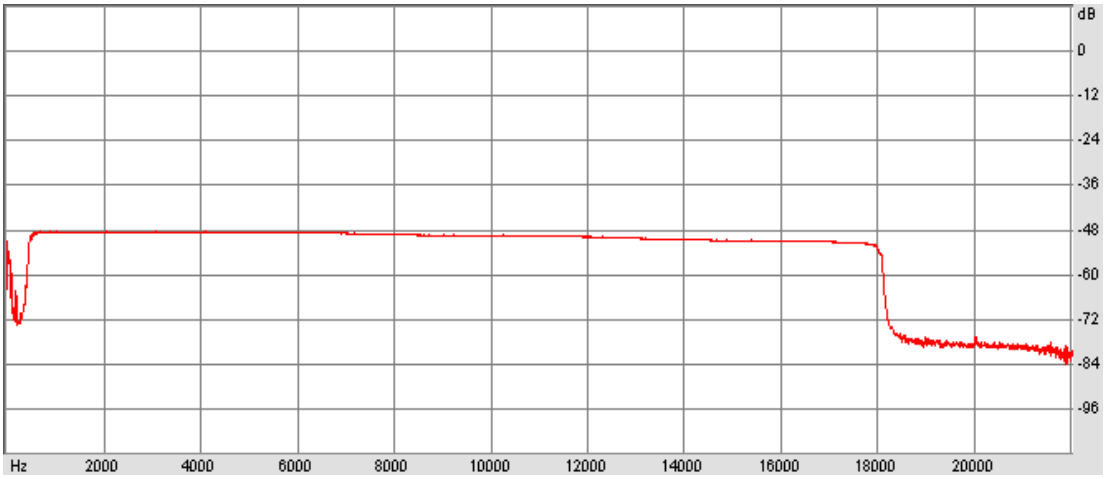

Рис. 8. Амплітудно-частотна характеристика системи «передавач- канал зв'язку- приймач»

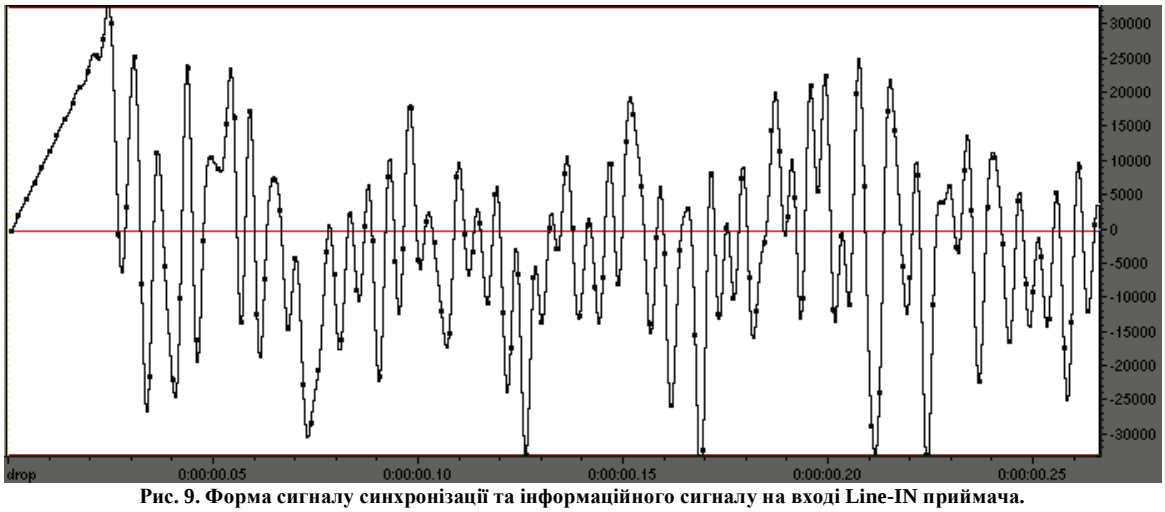

Рис. 9. Форма сигналу синхронізації та інформаційного сигналу на вході Line-IN приймача.
Вісь абсцис – час, вісь ординат – рівень сигналу

Для зменшення впливу ефекту розсинхронізації між тактовими генераторами ЦАП передавача та АЦП приймача інформаційний сигнал розбивається на пакети, які містять 200 елементарних символів. Синхронізація моменту початку передачі інформаційного пакету виконується шляхом додавання до останнього сигналу синхронізації, який має форму "висхідної". Приймач, у свою чергу, визначає

взаємокореляційну функцію (S_1) сигналу отриманого з каналу зв'язку з сигналом, який має форму "висхідної", запам'ятовує величини двох попередніх взаємокореляційних функцій (S_2, S_3), та у випадку, коли $S_3 < S_2$, $S_2 > S_1$ та S_2 більше визначеного порогового значення приймає рішення про прийом інформаційного пакету.

Проведена серія експериментальних досліджень дозволила встановити, що при заданій імовірності виникнення помилки 10^{-5} мінімально необхідно 48 відліків на інформаційний символ, що передається крізь радіочастотний кабель. Швидкість передачі символу можна визначити як відношення частоти дискретизації сигналу на виході передавача до кількості відліків у інформаційному символі, в даному випадку швидкість передачі становить 333 біт на секунду.

Висновки

Запропонована методика теоретичного обчислення імовірності помилки передачі інформаційного біта в системі з ортогоналізованими шумовими сигналами, та методика імітаційного моделювання таких систем.

Отримано показники завадостійкості таких систем за допомогою математичних розрахунків та обчислювальних імітаційних експериментів. Узгодженість одержаних даних (таблиця 2) підтверджує адекватність математичних викладок та імітаційної моделі.

Показано (рис. 7), що зі збільшенням відношення сигнал/шум різко збільшується завадостійкість системи з ортогоналізованими сигналами у порівнянні з системою де ортогоналізація не проводиться. Слід також додати, що вказаний ефект досягається при віношенні сигнал/шум більшому за одиницю.

Побудовано експериментальний макет системи та проведено на його основі серію експериментальних дослідженнь. Встановлено, що даний макет досліджуваної системи зв'язку забезпечує передачу даних зі швидкістю 333 біт на секунду при імовірності виникнення помилки передачі біта не вище ніж 10^{-5}.

Література

1. Харкевич А.А. Передача сигналов модулированным шумом // Электросвязь. – 1957. – № 11. – С. 42-46.

2. Price R., Green P.E. A Communication Technique for Multipath Channels, Proceedings of the IRE, Mar., 1958, pp. 555-570.

3. Clarke R.H. Statistical Theory of Mobile-Radio Reception Bell System Technical Journal 47, July 1968, pp. 957-1000.

4. Gilhousen K.S., Jacobs I.M., Padovani R., Weaver L.A. and Wheatley C.A. On the capacity of a cellular CDMA system. IEEE Trans. Veh. Tech. VT-40 (2), 1991, pp. 303-312.

5. Simon M. K., Omura J. K., Schultz R. A. and Levitt B. K. Spread Spectrum Communication Handbook New York, McGraw-Hill, 1994

6. Прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне/ Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. – М.: ИРЭ РАН, 2000: Препринт № 1 (625)

7. Семенов А.М., Сикарев А.А. Широкополосная радиосвязь. – М.: Воениздат, 1970.

8. Воронин А.А. Шумоподобные сигналы – эффективный метод борьбы с замираниями // «Электросвязь». – 1966. – № 7.

9. Дідковський Р.М. Імовірність власної помилки в системах зв'язку з кореляційно-часовою модуляцією // Матеріали 4-ї Всеукраїнської конференції молодих науковців ІТОНТ-2004, Черкаси, 2004 – С.141-142.

10. Первунінський С.М., Дідковський Р.М., Метелап В.В. Уточнення розрахунку завадостійкості автокореляційних систем зв'язку з шумовими сигналами // Вісник ЧДТУ. – 2005. – № 3. – С.226-229.

11. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.

12. Кинтцель Т. Руководство программиста по работе со звуком: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2000. – 432 с.

13. McCarthy B., Sound systems: design and optimization. First edition, NewYork, Focal Press, 2007. – 527 p.

Надійшла 5.12.2009 р.