

DOI 10.20535/2411-1031.2022.10.2.270439

УДК 621.391.825

КОСТЯНТИН ВАСЮТА,
УЛЯНА ЗБЕЖХОВСЬКА,
ВАЛЕРІЙ СЛОБОДЯНЮК

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ З ХАОТИЧНИМИ СИГНАЛАМИ З OFDM-МОДУЛЯЦІЄЮ В УМОВАХ ВПЛИВУ НАВМИСНИХ ЗАВАД

Останнім часом, під час створення нових систем передачі інформації все більшу увагу приділяють розробці складних видів сигналів, які здатні забезпечити високий рівень скритності передавальної інформації. Одним з можливих способів формування таких сигналів є використання хаотичних процесів та послідовностей, властивості яких є близькими до властивостей “білого” шуму. Однак, під час використання хаотичних сигналів в реальних каналах зв’язку, виникає питання щодо ефективності їх відновлення на приймальній стороні, особливо під час впливу навмисних завад. Тому метою роботи є аналіз ефективності функціонування системи зв’язку з хаотичними сигналами з OFDM-модуляцією в умовах впливу навмисних завад. Для досягнення визначеної мети поставлено наступні завдання: дослідити мінімально необхідну відстань між частотами в аналітичній хаотичній послідовності, при якій забезпечується необхідна якість відновлення повідомлення та вплив на таку систему передачі інформації амплітудно-модульованої шумової завади та частотно-модульованої шумової завади. Їх вирішено шляхом використання методів нелінійної динаміки та методів статистичної теорії обробки спостережень. Отримано наступні результати: було виявлено мінімально необхідну відстань між частотами в аналітичній хаотичній послідовності, якими модулюються елементи інформаційної послідовності, під час якої забезпечується найкращий рівень відновлення повідомлення при менших відношеннях сигнал/шум на вході приймача. Проаналізовано вплив спектральної щільності потужності модулюючої шумової напруги амплітудно-модульованої шумової завади на хаотичні сигнали з OFDM-модуляцією та показано, що з її збільшенням необхідний рівень правильної оцінки повідомлення досягається при вищих відношеннях сигнал/шум. Аналіз впливу ширини спектру частотно-модульованої шумової завади виявив, що його збільшення приводить до зменшення імовірності правильного виявлення. Показано, що збільшення кількості піднесучих в хаотичному сигналі з OFDM-модуляцією призводить до погіршення якості прийому. Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному: вперше досліджено мінімальну відстань між частотами в аналітичній хаотичній послідовності, при якій кореляційний приймач зможе ефективно відновити передане повідомлення. Показано, що необхідний рівень відновлення інформаційної послідовності з хаотичних сигналів з OFDM-модуляцією може бути досягнений лише під час впливу “білого” шуму та амплітудно-модульованої шумової завади.

Ключові слова: навмисні завади, OFDM-модуляція, аналітичні хаотичні послідовності, ймовірність правильного виявлення, система передачі інформації.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших вимог до сучасних систем радіозв’язку є забезпечення високих показників скритності, завадостійкості та швидкості передачі інформації [1]. Ефективним способом забезпечення високого рівня скритності

систем передачі інформації (СПІ) є використання хаотичних послідовностей (процесів), з властивостями близькими до властивостей “білого” шуму [2]. Хаотичні процеси представляють собою складні неперіодичні коливання, які породжуються нелінійними динамічними системами. Ці коливання можуть виникати під час відсутності зовнішніх шумів і повністю визначаються властивостями самої детермінованої динамічної системи. Хаотичні послідовності володіють багатьма властивостями випадкових процесів: суцільним спектром потужності, швидко спадаючою кореляційною функцією, непередбачуваністю на великі проміжки часу. Разом з тим, їм притаманні такі чисто динамічні властивості, як надзвичайно висока чутливість до початкових умов, пов’язані з нею експоненціально в середньому розбігання близьких траєкторій [2].

Системи передачі інформації, з використанням хаотичних сигналів показали свою працездатність, хоч і з деякими обмеженнями [3]. У ході складної заводової обстановки високоефективне використання таких систем суттєво ускладнюється через їх частотну селективність, нестационарну поведінку та обмеження частотно-енергетичних і просторових ресурсів самої системи. Також суттєвим є дія пасивних та активних завод, які виникають при передачі інформації по радіоканалу та вплив засобів радіоелектронного подавлення (РЕП) [4]. В таких умовах шумова захищеність каналів зв’язку критично знижується і для підтримки об’ємних інформаційних мультимедійних застосунків ефективність використання таких каналів має приближуватись до теоретичних границь. Тому існує необхідність дослідження роботи СПІ з хаотичними сигналами в різних умовах заводової обстановки на фоні “білого” шуму.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом при розробці нових та удосконалені існуючих СПІ все частіше застосовують широко смугові сигнали з ортогональним частотним розділенням з мультиплексуванням (англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Сигнали з OFDM-модуляцією дозволяють підвищити інформаційну ємність системи при обмеженій смузі пропускання та швидкість прийомо-передачі інформації СПІ. Однак, порівняно з шумоподібними (хаотичними) сигналами, такі сигнали не мають високого рівня заводозахисності та скритності [5]. Враховуючи переваги таких сигналів та позитивну практику їх впровадження в мережі безпроводного зв’язку різних стандартів є необхідність здійснити дослідження роботи СПІ з сигналами з OFDM-модуляцією в умовах впливу завод. Для цього в [6] проведено аналіз функціонування радіолінії з сигналами з OFDM-модуляцією в умовах радіоелектронного подавлення (РЕП). Було досліджено основні види завод, що порівняно просто реалізуються в системах РЕП: шумова загороджувальна завод, шумова завод в частині смуги та полігармонічна завод. Отримана математична модель радіолінії з сигналами з OFDM-модуляцією дозволяє провести кількісну оцінку негативного впливу даних видів завод на якість зв’язку, що визначається коефіцієнтом помилкового приймання, визначити заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними заводами, проводити імітаційне моделювання радіоліній з використанням сигналів з OFDM-модуляцією під дією навмисних завод. Однак, не наведено чисельні результати моделювання ефективності роботи таких СПІ.

У [4] запропонована математична модель каналу зв’язку з сигналами з OFDM-модуляцією, яка враховує вплив флуктуаційного шуму та навмисних завод. Наведено математичну модель такого сигналу спотвореного мультиплікативними та адитивними заводами. Застосування запропонованої моделі при імітаційному та математичному моделюванні каналу зв’язку з сигналами з OFDM-модуляцією дозволяє суттєво спростити процес моделювання. Однак, не наведено чисельні результати ефективності функціонування таких систем під час впливу різних завод.

З метою дослідження впливу завод на канали радіозв’язку з OFDM-модуляцією у [7] проаналізовано можливі варіанти застосування імітаційних завод в радіоканалах та наслідки їх впливу на засоби радіозв’язку. Під імітаційною заводою розуміють активний вплив радіоелектронних засобів, реєстрований засобом радіозв’язку як корисний сигнал. Більш повно сутність і можливості імітаційних завод розкриті у визначенні імітостійкості, під якою

розуміють здатність системи зв'язку протистояти введенню хибної інформації, несанкціонованого доступу до переданої або прийнятої інформації і нав'язування помилкових режимів засобам зв'язку. Показано, що при наявності в каналі імітаційно-дезінформуючих завад ефективність функціонування засобів радіозв'язку з сигналами з OFDM-модуляцією значно знижується, іноді до повної втрати переданої інформації. Спектральна щільність потужності найпростіших шумових завад, зосереджених по спектру, після здійснення операції прямого перетворення Фур'є на приймальній стороні, розмиває сигнал практично по всіх частотних підканалах, що або ускладнює, або й зовсім унеможлиблює приймання сигналу з OFDM-модуляцією. Враховуючи це для підвищення рівня імітозахищеності і, як наслідок, скритності необхідно застосовувати перспективні методи формування цифрових сигналів, які здатні забезпечити необхідний рівень маскування сигналу під шум, тобто так звану – IID (англ. Independent and Identically Distributed) – скритність [5], [8]. Чисельна характеристика якої BDS (англ. Brock, Dechert, Scheinkman) – статистика дозволяє визначити близькість “образу” сигналу в псевдофазовому просторі до “білого” шуму.

У [5] показано, що сигнали з OFDM-модуляцією володіють низьким рівнем структурної та IID-скритності, що підтверджується відповідними розрахунками BDS-статистики та невеликою кількістю необхідних двійкових операцій для розкриття структури сигналу. Запропоновано під час формування піднесучих таких сигналів використовувати хаотичні процеси та послідовності. В [9] запропоновано варіант підвищення структурної скритності СПІ заснованої на використанні сигналів з OFDM-модуляцією. Він полягає в тому, що для передачі повідомлень пропонується використовувати сформовані стохастичним чином ортогональні системи сигналів, які описуються власними векторами діагональних позитивно визначених симетричних матриць. Запропонований метод дає змогу значно підвищити структурну скритність сигналів з OFDM-модуляцією. Але він є обчислювально складним, не забезпечує високий рівень IID-скритності та не досліджено роботу запропонованого методу в умовах впливу завад. У [10] запропоновано метод прихованої передачі інформації в системах з OFDM-модуляцією. Кожна піднесуча сигналу з OFDM-модуляцією генерувалась з використанням поліномів Чебишева першого роду різних порядків. Отримані результати вказують на високий рівень IID-скритності. Але не показано спосіб відновлення такого повідомлення на приймальній стороні та якість роботи в складній електромагнітній обстановці.

У [11] формування піднесучих для сигналів з OFDM-модуляцією пропонується здійснювати за допомогою аналітичних хаотичних послідовностей. Це надає змогу забезпечити одночасно необхідний рівень структурної та IID-скритності СПІ. При цьому, на відміну від відомих методів формування хаотичних сигналів [8], [12] - [15], запропонований – надає змогу передавати інформацію у каналах радіозв'язку. Оцінювання ефективності відновлення хаотичних сигналів з OFDM-модуляцією показало, що для забезпечення необхідного рівня відтворення повідомлення на приймальній стороні, відношення сигнал/шум на вході приймача має бути $q > 4$. Однак, було досліджено лише вплив адитивного “білого” шуму на такі сигнали, що є недостатнім для подальшого їх використання в умовах реальної заводої обстановки.

Метою роботи є дослідження ефективності функціонування системи зв'язку з хаотичними сигналами з OFDM-модуляцією в умовах впливу навмисних завад.

Виклад основного матеріалу дослідження. У [11] було запропоновано та досліджено метод формування піднесучих для хаотичних сигналів з OFDM-модуляцією з використанням одномірного хаотичного відображення поліному Чебишева 1-го роду 3-го порядку $x_{n+1} = 4x_n^3 - 3x_n$, з параметрами $n=1...N$ – кількість відліків у послідовності та x_0 – початковим значенням послідовності. Відомо [8], [11], що недоліком використання таких відображень є структурованість їх “образів” в псевдофазовому просторі, що суттєво відрізняє їх від випадкових процесів. Тому для ускладнення структури “образу” та зміни статистичних характеристик вхідної хаотичної послідовності використовується концепція аналітичного

сигналу [8]. На множині дискретних значень було отримано аналітичний сигнал у комплексній формі, відповідно до виразу $\dot{x}_n = x_n + jy_n$, де $y_n = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$: уявна частина аналітичного сигналу задана перетворенням Гільберта до вхідної послідовності $x_n = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$. Застосування перетворення Гільберта забезпечує отримання амплітуди

$A_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ і фази $\psi_n = \arctan\left(\frac{x_n}{y_n}\right)$ сигналу [8]. Після перенесення комплексної амплітуди

на гармонічну частоту модуляції ω було одержано аналітичну хаотичну послідовність (АХП) у вигляді $s_n = \text{Re}(A_n e^{j\omega n}) = A_n \cos(\psi_n + \omega n)$. Далі для організації скритної передачі інформації елементи “1” інформаційної послідовності $\{r_v\}_{v=1}^V$, ($r \in 0,1$) передавались з частотою в АХП ω_1 , а елементи “0” з ω_0 , відповідно до:

$$s_n = \begin{cases} A_n \cos(\psi_n + \omega_1 n), & r = 0, \\ A_n \cos(\psi_n + \omega_2 n), & r = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Під час переходу від дискретного хаотичного сигналу до його безперервного представлення в заданій смузі частот у діапазоні від 0 до деякої верхньої граничної частоти $f_e = F$ використовувався метод інтерполяції Шеннона – Котельникова [16]. Було зроблено припущення, що вираз (1) представляє собою вузькосмуговий процес, який повністю визначається послідовністю своїх миттєвих значень $\{s_n = s(nT_0), n = 0, \pm 1, \dots, \pm N - 1\}$, відстань між якими дорівнює інтервалу $T_0 \leq 1/2F$. Після перенесення отриманого сигналу на несучу частоту хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією можна записати:

$$s(t) = \sum_a \left(\sum_n s_{a,n} \gamma_n \cos(2\pi f_a (T_0 t - n)) \right), \quad (2)$$

де $\gamma_n(t) = \text{sinc}(T_0 t - n)$;

$f_a = aF$, $f_1 = 2F$, $a = 1 \dots A$ – номери переданих хаотичних піднесучих.

Дослідження мінімальної відстані між частотами в аналітичній хаотичній послідовності. Необхідно відмітити, що на вхід приймального пристрою поступає адитивна суміш корисного сигналу та шуму, тому обробку такого сигналу необхідно здійснювати відомими методами статистичної теорії радіотехнічних систем. Для цього після надходження сигналу в приймач та розділення його на піднесучі можна здійснити кореляційну обробку прийнятого сигналу [16]. Для визначення частоти в АХП, з якою передається “0” або “1”, вхідний сигнал на інтервалі тривалості одного інформаційного символу множиться на множину АХП з різними частотами $\{\omega_i = i\Delta_\omega\}_{i=1}^{100}$, які змінюються із кроком $\Delta_\omega = 0.01$. Далі по максимальному відгуку визначається частота в АХП та приймається одна з двох гіпотез H_0 – елемент повідомлення з частотою АХП ω_0 , або H_1 – елемент повідомлення з частотою АХП ω_1 . Взаємна кореляційна функція АХП, яка складається з двох АХП з різними частотами ω в (1) і АХП $\{A_n \cos(\psi_n + \omega_i n)\}_{n=1}^N$ сформованою на множині $\{\omega_i\}_{i=1}^{100}$ в залежності від відношення сигнал/шум q в дБ показана на рис. 1.

Відношення сигнал/шум визначалась за виразом:

$$q = 10 \lg \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right), \quad (3)$$

де σ_s – спектральна щільність потужності корисного сигналу;

σ_n – спектральна щільність потужності шуму.

Аналіз отриманих взаємнокореляційних функцій (див. рис. 1) показує, що зі

збільшенням відношення сигнал/шум q на вході приймального пристрою піки кореляційних функцій зменшуються, до повного зникнення. Це вказує на те, що для ефективності виявлення викидів кореляційної функції, які дозволяють виділяти компоненти сигналу (1) з частотами АХП ω_0 та ω_1 , які зв'язані з різними елементами бінарного повідомлення, відношення сигнал/шум q на вході приймального пристрою має бути $q > -15$ дБ.

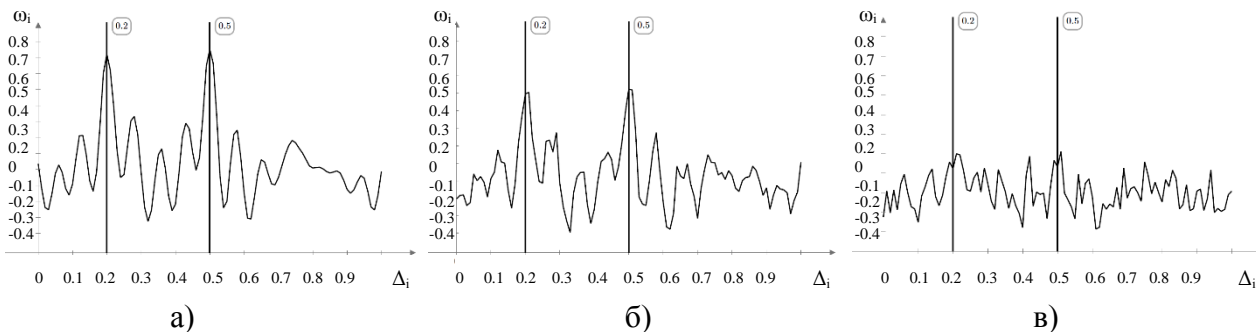


Рисунок 1 – Взаємні кореляційні функції АХП при:
а) відсутності “білого” шуму; б) $q = -3$ дБ; в) $q = -15$ дБ

Важливим під час вибору ω в АХП є дослідження мінімальної відстані $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ між частотами в АХП, якими модулюються значення в інформаційній послідовності, при якій забезпечується необхідний рівень відновлення повідомлення $P_{np} \geq 0.95$. Ймовірність правильного відновлення повідомлення в залежності від відношення сигнал/шум q на вході приймача розраховувалось відповідно до:

$$P_{np}(q) = k(q) / K, \quad (4)$$

де k – число реалізацій, в яких виконується умова правильного відновлення при заданому відношенні сигнал/шум q ;

K – загальна кількість випробувань.

На рис. 2 наведено ймовірність правильного відновлення в залежності від відношення сигнал/шум q для чотирьох випадків $\Delta\omega$: 1 – $\Delta\omega = 0.3$; 2 – $\Delta\omega = 0.15$; 3 – $\Delta\omega = 0.1$; 4 – $\Delta\omega = 0.03$. Загальна кількість реалізацій у кожному випадку була рівною $K = 1000$.

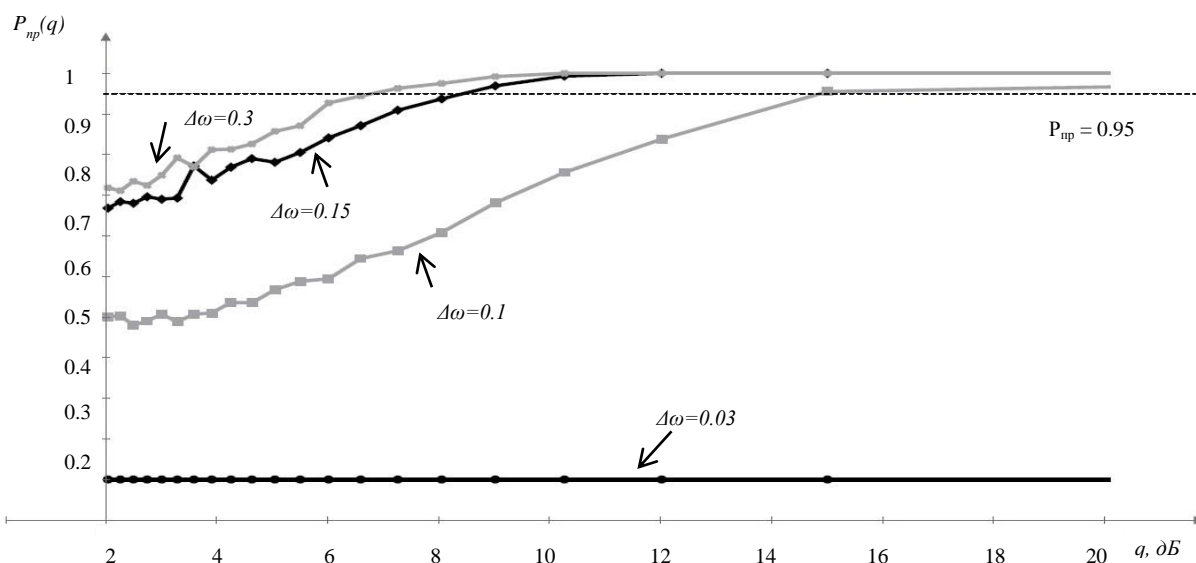


Рисунок 2 – Графік залежності ймовірності правильного відновлення в залежності від відстані $\Delta\omega$ між частотами в АХП та відношення сигнал/шум q

З рис. 2 очевидно, що для забезпечення якісного відновлення інформації відстань між частотами АХП в (1) має бути $\Delta\omega \geq 0.3$. Оскільки, в такому випадку необхідний рівень $P_{np} \geq 0.95$ забезпечується під час відношення сигнал/шум $q \geq 6.8$ дБ. У випадку зменшення $\Delta\omega$ якість відновлення знижується, до повної неможливості розрізнення частоти АХП за $\Delta\omega \leq 0.03$.

Дослідження ефективності функціонування систем передачі інформації з хаотичними сигналами з OFDM-модуляцією в умовах впливу навмисних завад. У реальних каналах радіозв'язку спостерігається складна завадова обстановка, що не дає однозначно стверджувати про можливість забезпечення високого рівня відновлення хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією, особливо під час роботи засобів РЕП противника. На даний час, для подавлення систем і засобів радіозв'язку можуть використовуватись різні види штучних завад, які випромінюються відповідними станціями [17]. За принципом дії штучні завади поділяються на деструктивні, маскуючі та імітуючі, також можуть використовуватись їх комбінації. Маскуючі та імітуючі завади, як правило, є адитивними, тобто в приймачі, що подавляється, вони додаються до корисного сигналу. Деструктивні завади створюються за допомогою штучних електромагнітних випромінювань великої потужності, використання яких призводять до незворотних змін вхідних елементів приймальних пристроїв об'єктів подавлення. Параметри імітуючих завад цілеспрямовано робляться близькими до параметрів сигналів об'єктів, що імітуються, що може призвести, наприклад, до зміни в інформації, що передається [18].

Представляє інтерес проведення дослідження функціонування СПІ в умовах впливу маскуючих завад, які представляють собою електромагнітні коливання, в яких хоча б один параметр (амплітуда, частота, фаза, тривалість або період проходження імпульсів) є випадковою функцією часу. Такі завади виключають або дуже ускладнюють прийняття рішення про виявлення і розпізнавання (класифікацію) сигналів в приймальному пристрої. Найбільш універсальними маскувальними завадами є безперервні шумові завади, оскільки вони можуть бути використанні для подавлення систем і засобів радіозв'язку під час їх функціонування в різноманітних режимах роботи. Безперервні шумові завади в залежності від способу формування поділяються на прямошумові (немодульовані) і модульовані. Останні формуються шляхом модуляції високочастотних гармонічних коливань низькочастотним шумом по амплітуді (амплітудна модуляція, АМ), частоті (частотна модуляція, ЧМ), фазі (фазова модуляція, ФМ) або одночасно за декількома параметрами [19].

Промодельємо вплив на хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією адитивної амплітудно-модульованої шумової завади (АМШЗ). АМШЗ представляє собою гармонічне коливання, модульоване по амплітуді шумом [20]. Така завада на вході приймача може бути записана наступним чином:

$$u_{AMШЗ}(t) = Um \left[1 + k_a u_{mod}(t) \right] \cos \omega_0 t, \quad (5)$$

де Um – амплітуда несучого коливання;

k_a – крутизна модуляційної характеристики передавача;

$u_{mod}(t)$ – модулююча шумова напруга;

ω_0 – несуча частота.

Нижче наведений енергетичний спектр (див. рис. 3а) та часові реалізації (див. рис. 3б) хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією на 8 піднесучих та АМШЗ.

Спектр АМШЗ перебиває спектр хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією лише в дуже вузькому діапазоні частот (див. рис. 3а), що вказує на внесення незначних викривлень вхідному сигналу. Це підтверджується порівнянням отриманих часових реалізації хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією та хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією під час впливу адитивної суміші “білого” шуму та АМШЗ (див. рис. 3б), де видно незначні зміни амплітуди вхідного сигналу. Однак, необхідно більш детально дослідити вплив АМШЗ на

хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією в залежності від спектральної щільності потужності σ в u_{mod} (5) в АМШЗ та відношення сигнал/шум q на вході приймача. Для цього на рис. 4 наведено ймовірність правильного відновлення бінарного повідомлення розраховану відповідно до (4) під час значення $\sigma = 0.01$, $\sigma = 0.3$ та $\sigma = 2$ в залежності від відношення сигнал/шум q на вході приймача. Загальна кількість випробувань була рівною $K = 1000$.

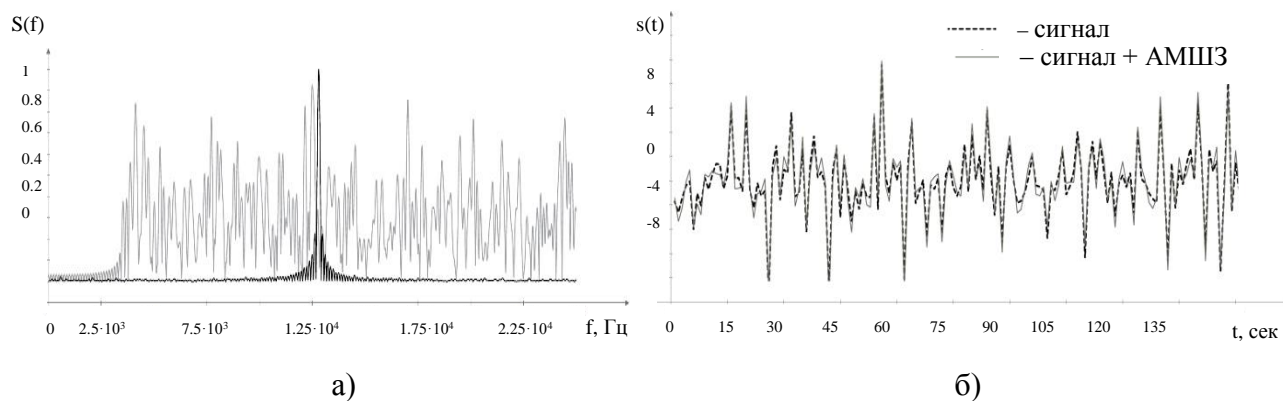


Рисунок 3 – Хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією на 8 піднесучих та АМШЗ:
а) енергетичний спектр; б) часова реалізація сигналу та сигналу під час впливу АМШЗ

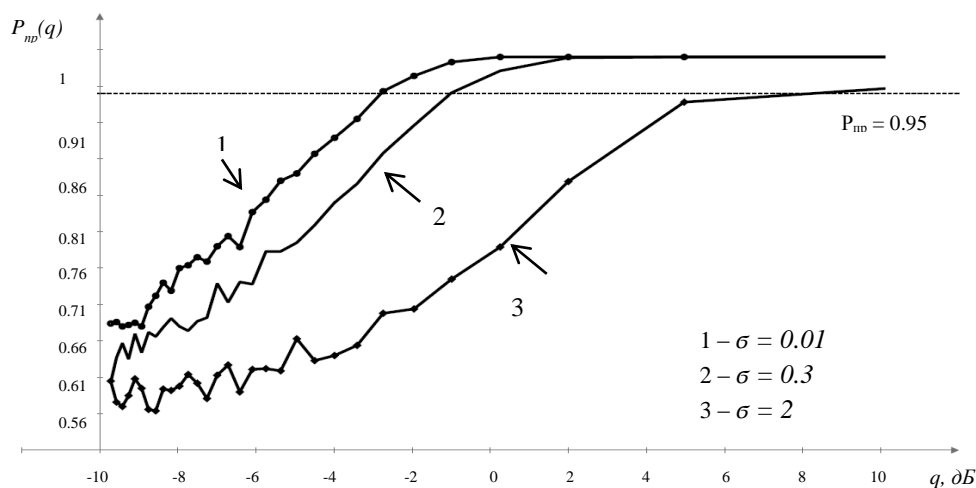


Рисунок 4 – Графік залежності ймовірності правильного відновлення повідомлення в залежності від спектральної щільності потужності модулюючого шуму АМШЗ та відношення сигнал/шум q

З отриманих кривих видно, що зі збільшенням рівня спектральної щільності потужності σ в u_{mod} (5) АМШЗ ймовірність правильного виявлення падає. Так, під час значення $\sigma = 0.01$ необхідний рівень ймовірності правильного виявлення повідомлення забезпечується під час відношення сигнал/шум $q = -2.8$ дБ, в той час, якщо $\sigma = 2$ воно зменшується на 10.08 дБ, тобто $q = 8$ дБ. Це пояснюється тим, що збільшення σ в АМШЗ збільшує амплітуду завади та, як наслідок, вносить значніші відхилення амплітуди первинного сигналу.

Промодельюємо вплив на хаотичні сигнали з OFDM-модуляцією адитивних частотно-модульованих шумових завад (ЧМШЗ). ЧМШЗ представляють собою високочастотні гармонічні коливання, які модулюються шумовою напругою зі змінною частотою. Спектри коливань, модульованих за частотою, близькі за своєю структурою до спектрів коливань, модульованих по фазі. Математично модель такої завади може бути записана [19]:

$$u_{\text{ЧМШЗ}}(t) = Um \cos \left(2\pi f_0 t + \psi + \sum_{k=0}^{N-1} m_k \sin(2\pi F_k t + \varphi_k) \right), \quad (6)$$

де Um – амплітуда несучого коливання;

f_0 – частота несучого коливання;

ψ – фазовий зсув несучого коливання;

F_k, φ_k – частота та фазовий зсув k -ї гармоніки модульованого шуму;

N – кількість модульованих гармонічних складових в шумі;

$m_k = a \frac{Um_k + dU_k}{F_k}$ – індекси частотної модуляції, a – деякий параметр, що характеризує

нелінійний елемент модулятора;

Um_k, dU_k – амплітуди гармонічних складових шуму та їх флуктуації.

На рис. 5 наведений енергетичний спектр хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією на 8 піднесучих та спектр ЧМШЗ (див. рис. 5а), а також вигляд ЧМШЗ в часовій області та її вплив на сигнал (див. рис. 5б).

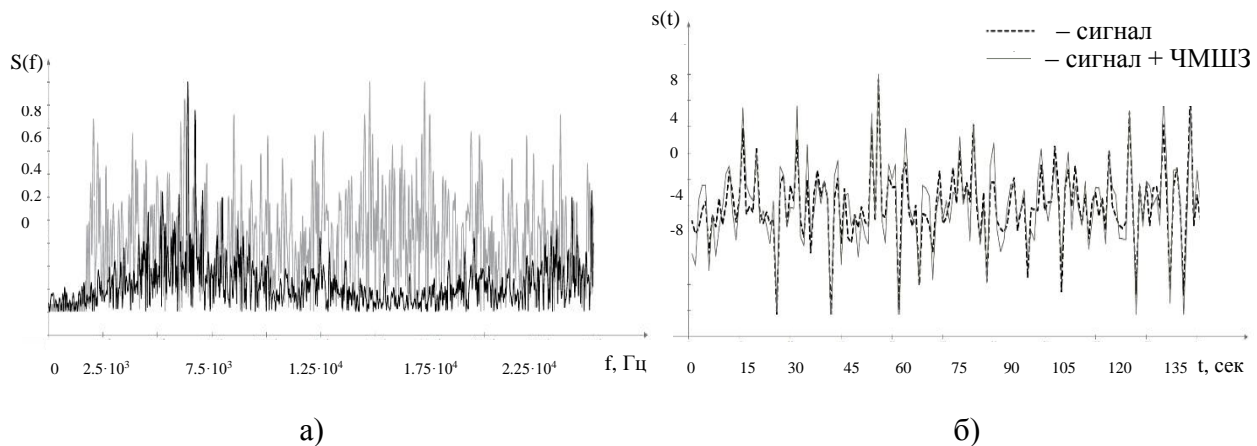


Рисунок 5 – Хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією на 8 піднесучих та ЧМШЗ: а) енергетичний спектр; б) часова реалізація сигналу та сигналу під час впливу ЧМШЗ

Аналіз енергетичного спектру (див. рис. 5а) вказує на те, що ЧМШЗ перебиває більший діапазон частот хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією, порівняно з АМШЗ, що призводить до внесення значно більших викривлень в первинний сигнал. Це підтверджується виглядом отриманих часових реалізацій (див. рис. 5б) хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією та адитивної суміші сигналу, “білого” шуму і ЧМШЗ.

Дослідимо вплив ЧМШЗ на піднесучу хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією сформовану відповідно до (2) на несучій частоті $f_n = 0.2$ (див. рис. 6). Для цього сформуємо ЧМШЗ з різною шириною спектру ($\Delta F = F_{k1} - F_{kR}$, $r = 1..R$ – кількість частот гармонік F_{kR} модульованого шуму в ЧМШЗ), тобто значення частот гармонік модульованого шуму в ЧМШЗ для:

– першого випадку $F_{k1} = 0.19, F_{k2} = 0.2, F_{k3} = 0.21, F_{k4} = 0.23$;

– другого випадку $F_{k1} = 0.2, F_{k2} = 0.25, F_{k3} = 0.35, F_{k4} = 0.4$;

– третього випадку $F_{k1} = 0.2, F_{k2} = 0.55, F_{k3} = 0.6, F_{k4} = 1.2$.

Порівняльний аналіз отриманих кривих вказує на те, що чим ширше спектр ΔF ЧМШЗ, тим більший вплив вона здійснює на хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією і, як наслідок, для забезпечення необхідного рівня відновлення такого повідомлення $P_{np} \geq 0.95$ на вході

приймального пристрою має бути більше відношення сигнал/шум. Так для випадку, коли $\Delta F_1 = 0.04$ ефективно відновлення повідомлення буде забезпечуватись під час відношення сигнал/шум $q = 7$ дБ. Для випадку $\Delta F_2 = 0.2$, потрібне відношення сигнал/шум збільшується на 2.5 дБ, тобто $q = 9.5$ дБ. У випадку $\Delta F_3 = 1$, $P_{np} = 0.95$ під час $q = 13.7$ дБ.

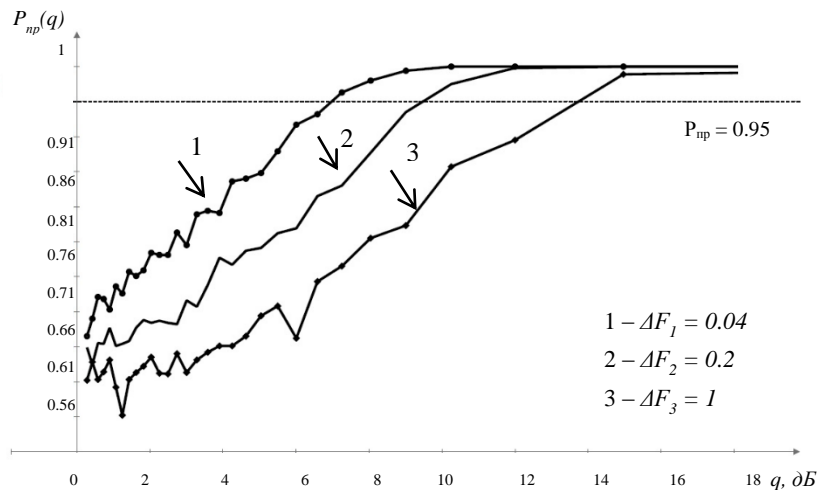


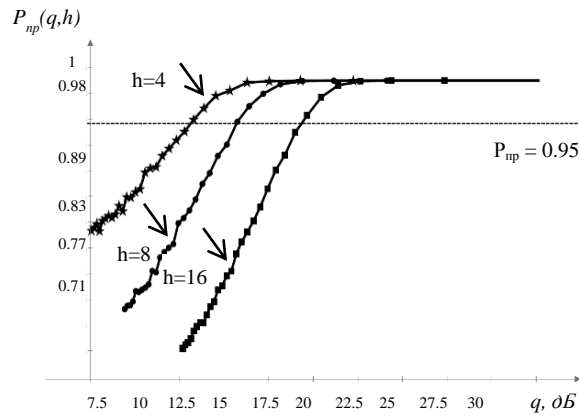
Рисунок 6 – Графік залежності ймовірності правильного відновлення повідомлення на піднесучій хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією в залежності від відношення сигнал/шум та ширини спектру ЧМШЗ

Дамо емпіричну оцінку ймовірності правильно відновлення бінарного повідомлення відповідно до (4), в хаотичному сигналі з OFDM-модуляцією (2) під час впливу “білого” шуму, АМШЗ та ЧМШЗ. Оцінка елемента повідомлення зводиться до перевірки гіпотези про наявність або відсутність в відновленому повідомленні, на заданому інтервалі часу, в кожній піднесучій символу “0” або “1” з частотами в АХП ω_0 або ω_1 відповідно, а якість оцінки визначається значенням ймовірності правильно відновлення повідомлення.

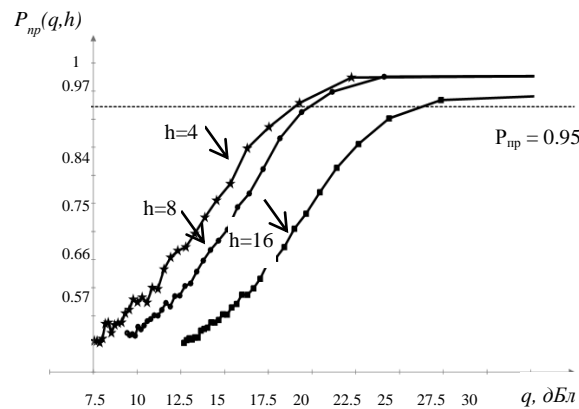
На рис. 7 наведені результати моделювання залежності ймовірності правильного відновлення бінарного повідомлення $P_{np}(q, h)$ за наявності адитивної суміші “білого” шуму різної потужності, АМШЗ з параметром $\sigma = 0.3$ та ЧМШЗ з частотами гармонік модульованого шуму $F_{k1} = 0.2$, $F_{k2} = 0.3$, $F_{k3} = 0.43$, $F_{k4} = 0.5$. Розрахунки проводились для хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією на $h = 4$, $h = 8$ та $h = 16$ піднесучих. Кількість реалізацій кожного сигналу була рівною $K = 1000$.

З отриманих залежностей (див. рис. 7а) видно, що зі збільшенням кількості піднесучих в хаотичному сигналі з OFDM-модуляцією, необхідний рівень відношення сигнал/шум q для забезпечення імовірності правильного відновлення $P_{np} \geq 0.95$ збільшується. Так під час приймання лише адитивної суміші корисного сигналу та “білого” шуму для забезпечення необхідного рівня відновлення сигналу відношення сигнал/шум при $h = 4$ має бути $q > 13$ дБ, а під час додаткової наявності АМШЗ воно зростає на 5 дБ, тобто $q > 18$ дБ. Зі збільшенням кількості піднесучих в сигналі, наприклад, $h = 16$ та наявності в каналі зв'язку АМШЗ відновлення відбувається при $q > 26$ дБ, що на 7 дБ більше, ніж у випадку відсутності завад.

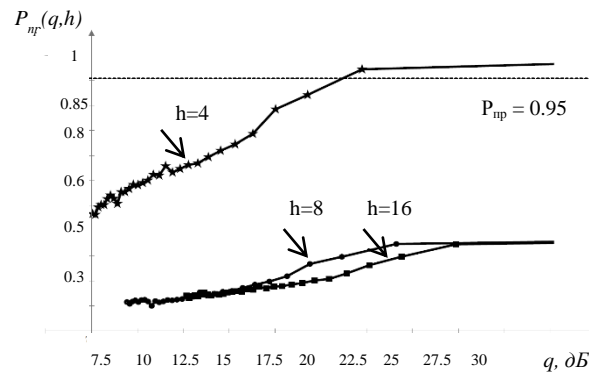
Однак, найбільші спотворення в сигнал вносить наявність ЧМШЗ в каналі зв'язку, так при кількості піднесучих в хаотичному сигналі з OFDM-модуляцією $h > 4$, необхідний рівень імовірності правильного відновлення не забезпечується, що вказує на низьку ефективність функціонування такої СПІ під час впливу ЧМШЗ.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Залежність імовірності правильного відновлення повідомлення з хаотичного сигналу з OFDM-модуляцією на 4, 8, 16 піднесучих від відношення сигнал/шум q :

а) під час наявності “білого” шуму; б) під час наявності “білого” шуму та АМШЗ;

в) під час наявності “білого” шуму та ЧМШЗ

Висновки. Досліджено ефективність роботи систем передачі інформації з хаотичними сигналами з OFDM-модуляцією з аналітичними хаотичними послідовностями. Експериментально встановлено, що під час формування хаотичних сигналів з OFDM-модуляцією відстань між частотами в АХП, якими маніпулюють елементи бінарного повідомлення “0” та “1”, має бути $\Delta\omega \geq 0.3$, оскільки такі значення забезпечують високий рівень імовірності правильного відновлення повідомлення P_{np} при менших значеннях сигнал/шум q на вході приймача.

З аналізу впливу АМШЗ та ЧМШЗ на хаотичний сигнал з OFDM-модуляцією на 4, 8 та 16 піднесучих, можна зробити висновок, що зростання кількості піднесучих в сигналі, призводить до збільшення відношення сигнал/шум на вході приймача, яке необхідне для забезпечення необхідної якості відновлення бінарного повідомлення $P_{np} \geq 0.95$. Наявність в каналі зв'язку АМШЗ дозволяє відновити сигнал на приймальній стороні, однак потребує більших відношень сигнал/шум. Найбільш негативний вплив на хаотичні сигнали з OFDM-модуляцією має наявність ЧМШЗ. Так, під час коли кількість піднесучих $h > 4$ відбувається повна втрата інформації. Тому в подальшому важливим є розроблення методів для підвищення якості відновлення хаотичних сигналів з OFDM-модуляцією в умовах впливу маскуючих завад, особливо ЧМШЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. Заславець, В. Долина, та О. Чечуй, “Особливості розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах радіоподавлення (радіоелектронного конфлікту)”, *Системи озброєння і військова техніка*, № 1 (61), с. 7-12, 2020, doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
- [2] И.К. Насыров, та В.В. Андреев, “Моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем”, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, т. 22, № 4, с. 79-87, 2020, doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87>.
- [3] M.K. Cuomo, and V.A. Oppenheim, “Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications”, *Physical Review Letters. American Physical Society (APS)*, vol. 71, iss. 1, pp. 65-68, 1993, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.65>.
- [4] С.В. Зайцев, “Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами”, *Математические машины и системы*, № 1 (4), с. 166-175, 2011.
- [5] K. Vasiuta, U. Zbezhkowska, V. Slobodyanuk, and O. Kovalchuk, “Stealth Evaluation of the OFDM Communication System”, in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 2020, pp. 363-367, doi: <https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468046>.
- [6] Т.Г. Гурський, “Математична модель радіолінії з використанням технології OFDM в умовах впливу навмисних завад”, *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, № 2, с. 9-14, 2008.
- [7] Л.Л. Бортнік, О.Г. Жук, та О.В. Кувшинов, “Аналіз варіантів застосування імітаційних завад в радіоканалах з OFDM”, *Сучасний захист інформації*, № 4, с. 58-63, 2012.
- [8] P.Yu. Kostenko, V.V. Slobodyanuk, and A.N. Barsukov, “Stealthiness of analytical chaotic signals”, *Radioelectronics and Communications Systems*, no. 60, pp. 132-140, 2017, doi: <https://doi.org/10.3103/S0735272717030050>.
- [9] А.П. Жук, та А.С. Иванов, “Повышение структурной скрытности системы передачи информации с кодовым разделением каналов”, *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*, № 3, с. 26-28, 2011.
- [10] К.С. Васюта, У.Р. Збежховська, В.В. Слободянюк, В.С. Загривий та В.І. Чистов, “Метод прихованої передачі інформації в системах з Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) модуляцією”, *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 2 (43), с. 132-139, 2021, doi: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.18>.
- [11] К.С. Васюта, У.Р. Збежховська, В.В. Слободянюк, І.В. Захарченко, О.Л. Кащишин, М.С. Дубинський, та Ю.М. Рябуха, “Метод підвищення скритності систем передачі інформації на основі модуляції з ортогональним частотним розділенням і мультиплексуванням хаотичних піднесучих”, *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*, № 3, с. 79-93, 2021, doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.3.07>.
- [12] A. Litvinenko, and A. Aboltins, “Chaos based linear precoding for OFDM”, in *Proc. 2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, Riga, 2015, pp. 13-17, doi: <https://doi.org/10.1109/RTUWO.2015.7365709>.

- [13] Z. Wang, and S. Chen, "A Chaos-Based Encryption Scheme for DCT Precoded OFDM-Based Visible Light Communication Systems", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, pp. 1-7, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/2326563>.
- [14] N.R. Raajan, B. Monisha, R. Vishnupriya, N. Rangarajan, G. N. Jayabhavani, and C. Nishanthini, "Chaotic Interleaving for Secured OFDM", *Research Journal of Information Technology*, vol. 5, iss. 3, pp. 449-455, 2013, doi: <https://doi.org/10.3923/rjit.2013.449.455>.
- [15] M.A. Khan, M. Asim, V. Jeoti, and R.S. Manzoor, "On secure OFDM system: Chaos based constellation scrambling", in *Proc. 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, 2007, pp. 484-488, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2007.4658435>.
- [16] С.Е. Фалькович, та П. Ю. Костенко, *Основы статистической теории радиотехнических систем*, Харків, Україна: НАУ ХАИ, 2006.
- [17] І.М. Бондаренко, *Системи радіозв'язку. Кн.2, ч.1. Радіолінії зв'язку*, Харків, Україна: ХІ ВПС, 2003.
- [18] А.О. Петров, О.В. Рибальський, О.О. Скопа та В.О. Хорошко, "Використання сигналподібних завод у системах активного захисту інформації", *Сучасна спеціальна техніка*, № 1(28), с. 69-75, 2012.
- [19] Р. Антипенский, "Разработка моделей преднамеренных помех системам аналоговой связи", *Компоненты и Технологии*, № 74, с. 177-182, 2007.
- [20] К.С. Васюта, О.В. Тесленко, В.М. Купрій та О.А. Малишев, *Основы побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору: конспект лекцій*, Харків, Україна: ХУПС, 2013.

Стаття надійшла до редакції 17.08.2022.

REFERENCE

- [1] V. Zaslavets, V. Dolyna, and O. Chechui, "Peculiarities of Calculation of Interference Lines of Radio Communications in Conditions of Radio-Supply (radio-Electronic Conflict)", *Systems of Arms and Military Equipment*, 2020, no. 1 (61), pp. 7-12, doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
- [2] Y.K. Nasurov, and V.V. Andreev, "Modeling an information channel using chaotic signals of nonlinear dynamic systems", *Power engineering: research, equipment, technology*, 2020, vol. 22, iss. 4, pp. 79-87, doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87>.
- [3] M.K. Cuomo, and V.A. Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications", *Physical Review Letters. American Physical Society (APS)*, vol. 71, iss. 1, pp. 65-68, 1993, doi: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.65>.
- [4] S. Zaitsev, "Mathematical model of a communication channel with OFDM signals and intentional interference", *Mathematical Machines and Systems*, no. 1 (4), pp. 166-175, 2011.
- [5] K. Vasiuta, U. Zbezhkowska, V. Slobodyanuk, and O. Kovalchuk, "Stealth Evaluation of the OFDM Communication System", in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 2020, pp. 363-367, doi: <https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468046>.
- [6] T. Hurskyi, "Mathematical model of a radio line using OFDM technology under the influence of intentional interference", *Collection of scientific works of the Military Institute of Telecommunications and Informatization of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, no. 2, pp. 9-14, 2008.
- [7] L. Bortnik, O. Zhuk, and O. Kuvshynov, "Analysis of options for the application of simulated interference in radio channels with OFDM", *Modern Information Security*, no. 4, pp. 58-63, 2012.
- [8] P. Kostenko, V. Slobodyanuk, and A. Barsukov, "Stealthiness of analytical chaotic signals", *Radioelectronics and Communications Systems*, no. 60, pp. 132-140, 2017, doi: <https://doi.org/10.3103/S0735272717030050>.

- [9] A. Zhuk, and A. Ivanov, "Improving the structural secrecy of the information transmission system with code division of channels", *High tech in earth space research*, no. 3, pp. 26-28, 2011.
- [10] K. Vasiuta, U. Zbezhkowska, V. Slobodyanuk, V. Zahryvyi and V. Chystov, "The method of hidden information transmission in systems with Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, no. 2 (43), pp. 132-139, 2021, doi: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.18>.
- [11] K. Vasiuta, U. Zbezhkowska, V. Slobodyanuk, I. Zakharchenko, O. Kashchyshyn, M. Dubinsky, Y. Ryabukha, O. Koval "The method of increasing the stealthiness of information transmission systems based on modulating with orthogonal frequency division and multiplexing of chaotic subcarriers", *Radioelectronic and computer systems*, no. 3, pp. 79-93, 2021, doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.3.07>.
- [12] A. Litvinenko, and A. Aboltins, "Chaos based linear precoding for OFDM", in *Proc. 2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, Riga, 2015, pp. 13-17, doi: <https://doi.org/10.1109/RTUWO.2015.7365709>.
- [13] Z. Wang, and S. Chen, "A Chaos-Based Encryption Scheme for DCT Precoded OFDM-Based Visible Light Communication Systems", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, pp. 1-7, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/2326563>.
- [14] N.R. Raajan, B. Monisha, R. Vishnupriya, N. Rangarajan, G.N. Jayabhavani, and C. Nishanthini, "Chaotic Interleaving for Secured OFDM", *Research Journal of Information Technology*, vol. 5, iss. 3, pp. 449-455, 2013, doi: <https://doi.org/10.3923/rjit.2013.449.455>.
- [15] M.A. Khan, M. Asim, V. Jeoti, and R.S. Manzoor, "On secure OFDM system: Chaos based constellation scrambling", in *Proc. 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, pp. 484-488, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2007.4658435>.
- [16] S. Falkovych, and P. Kostenko, *Fundamentals of the statistical theory of radio engineering systems*. Kharkiv, Ukraine: NAU KhAI, 2006.
- [17] I. Bondarenko, *Radio communication systems. Book 2, part 1. Radio lines of communication*. Kharkiv, Ukraine: KhAFI, 2003.
- [18] A. Petrov, O. Rybalskyi, O. Skopa, and V. Khoroshko, "The use of signal-like interference in active information protection systems", *Modern special equipment*, no. 1 (28), pp. 69-75, 2012.
- [19] R. Antypenskyi, "Development of deliberate interference models for analog communication systems", *Components and Technologies*, 2007, no. 74, pp. 177-182.
- [20] K. Vasiuta, O. Teslenko, V. Kuprii, and O. Malyshev, *Fundamentals of construction of airspace reconnaissance radar equipment: lecture notes*. Kharkiv, Ukraine: KhAFU, 2013.

KONSTIANTYN VASIUTA,
ULIANA ZBEZHKOVSKA,
VALERII SLOBODYANUK

ANALYSIS OF FUNCTIONING EFFICIENCY OF INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS WITH CHAOTIC SIGNALS WITH OFDM-MODULATION WITHIN THE CONDITIONS OF INTENTIONAL INTERFERENCE

Recently, during the development of new information transmission systems, more and more attention has paid to the development of complex types of signals that can provide a high level of stealth during information transmission. One of the ways to generate such signals is to use chaotic

sequences and processes, the properties of which are close to the properties of “white” noise. However, when using chaotic signals in real communication channels, there is a question about the effectiveness of their recovery on the receiving side, especially during the influence of intentional interference. Therefore, the aim of research is the analysis of functioning efficiency of information transmission systems with chaotic signals with OFDM-modulation within the conditions of intentional interference. In order to achieve the defined goal, the following tasks have been set: to investigate the minimal required distance between the frequencies in analytical chaotic sequence, whereby maintain the necessary quality of recovering the message and the influence on such information transmission system amplitude-modulated noise interference and frequency-modulated noise interference. It has been solved by using methods of nonlinear dynamics and methods of the statistical theory of observation processing. The following results are obtained: the minimal necessary distance between frequencies in analytical chaotic sequences, which is manipulated by the elements of the information sequence, has been detected. It can maintain the best level of recovery the message during the low lever of signal-to-noise ratio on receiver entry. The influence of spectral power density of amplitude-modulated noise interference on chaotic signals with OFDM-modulation has been analyzed. It has shown that when it increase the higher level of signal-to-noise ratio is required on receiver. The analysis of the spectral width of frequency-modulated noise interference showed that it’s increase lead to descent the probability of correct detection. It has been shown that the increase of the number of subcarriers in chaotic signals with OFDM-modulation lead to quality loss of signal detection. The scientific novelty of the obtained results lies in the following: for the first time, investigated the minimal required distance between the frequencies in analytical chaotic sequence, during what the correlation receiver can recover the transmitted message with high quality. It has been showed that the required level of recovering the information sequence from chaotic signals with OFDM-modulation can be obtained only during the influence on it the “white” noise and amplitude-modulated noise interference.

Keywords: intentional interference, OFDM-modulation, analytical chaotic sequence, probability of correct detection, information transmission system.

Васюта Костянтин Станіславович, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, заступник начальника з навчальної роботи, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, ORCID 0000-0002-1978-3717, kohafish@ukr.net.

Збежховська Уляна Романівна, ад’юнкт, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, ORCID 0000-0001-6213-5531, lyasya3@gmail.com.

Слободянюк Валерій Валерійович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, ORCID 0000-0002-8291-8194, sloval@i.ua.

Vasiuta Konstantyn, doctor of technical science, professor, honored worker of science of Ukraine, deputy chief in academic work, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

Zbezhkhovska Uliana, postgraduate student, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

Slobodyanuk Valerii, candidate of technical science, senior instructor in department of aviation radiotechnical navigation and landing systems, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.