

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИСТУ КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ РАДІОТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ

В статті розглянуто вирішення проблеми підвищення заводозахищеності багатофункціонального комплексу радіотелекомунікаційного засобу методами фрактального аналізу. Показано, яким чином можна вирішувати питання адаптації до виду завод шляхом своєчасної зміни способів обробки сигналів на основі рішень інтелектуальних елементів управління. Надається обґрунтування можливості застосування методів фрактального аналізу для такого виду обладнання. На основі виконаної формалізації процесу заводозахисту в термінах фрактального аналізу запропонований загальний опис фрактальної математичної моделі заводозахисту радіотелекомунікаційного засобу.

Ключові слова: радіотелекомунікаційні засоби, складні системи, канали управління, заводозахист, фрактальний аналіз, самоподоба (скейлінг), аттрактор, фракталоподобні структури.

Вступ. Особливістю вимог до функціонування радіотелекомунікаційні засобів (РТЗ) є доставка сигналів і повідомлень в будь-яких умовах застосування, що призводить до необхідності створення складних систем [1, 2]. В такій системі велику роль має підсистема управління якістю зв'язку, складовою якої є канали управління заводозахищеністю (КУЗ), які є об'єктами впливу завод для пошкодження чи ураження функціонування комплексу РТЗ. Мінімізація чи ліквідація впливу завод [3] на РТЗ залежить в першу чергу від здатності КУЗ протистояти цьому впливу, тому що відсутність режимів заводозахисту КУЗ більшості РТЗ є загальним, принциповим недоліком. Для зниження простою ліній та зменшення часу зміни режиму організаційних методів не є достатнім. Використання обладнання заводозахисту лінії поліпшує боротьбу з заводами, але є тимчасовим рішенням діючим на першому циклі протидії РТЗ. Тому пошук методів підвищення заводозахисту КУЗ є єдиним напрямком забезпечення надійного керування РТЗ, що є актуальним і своєчасним.

Постановка задачі. Підвищення заводостійкості КУ багатофункціонального комплексу РТЗ можливо за рахунок застосування сучасних цифрових складних методів модуляції, які пов'язані з використанням нових методів обробки сигналів [4, 5]. Відомо, що велика кількість реальних процесів і явищ може бути представлено за допомогою використанням моделей, що дозволяє визначити характеристики адаптації системи до впливів загрози середовища. Тому виникає необхідність вирішення проблеми підвищення заводозахищеності КУЗ новими методами [6, 7]. Одним з таких напрямків її підвищення є застосування методів і алгоритмів теорії нелінійних динамічних систем (фрактального аналізу) для цілеспрямованого аналізу та вибору поведінки окремих інтелектуальних підсистем РТЗ [8-13].

Основна частина. Для вирішення завдання підвищення заводозахищеності КУ необхідно по-перше обґрунтувати застосування методів фрактального аналізу і тільки потім виконати формалізацію процесу заводостійкості КУ в термінах фрактального аналізу.

Обґрунтування застосування методів фрактального аналізу для вирішення завдання підвищення заводозахищеності КУЗ. Відомо, що комплекс РТЗ розглядається як складна система [1, 2], яка передбачає можливість застосування сигналів з різними видами і параметрами цифрової модуляції і можливою зміною їх значень в ході одного сеансу зв'язку. Це призводить до створення складних структур, які володіють властивостями нелінійних динамічних систем та використовують різні методи адаптації до мінливої заводової обстановці, адаптації або самоорганізації під час зміни умов функціонування [6]. В сучасному виконанні такі РТЗ наділяються [14] інтелектуальними алгоритмами цифрової обробки сигналів. Але такі системи чутливі до малих збурень [7] - ефект «метелику», коли в подальшому ці збурення призводять до великих змін стану усєї складної системи. Оцінку впливу таких збурень виконують методами фрактального аналізу [9-13].

Відмінна риса методів фрактального аналізу полягає в тому, що вони поряд з загальними характеристиками випадкових процесів, які утворюються в результаті

використання процедури усереднення по великим тимчасовим інтервалам, дозволяють розкрити особливості локальної структури сигналів. У всіх фракталів незалежно від методу їх побудови є набір важливих властивостей та критеріїв.

До загальних важливих властивостей можна віднести такі:

- частини фрактальних структур подібні всій структурі в цілому;
- поблизу кожного елемента є велика кількість інших елементів, розділених проміжками різної довжини;
- послідовне збільшення роздільної здатності спостереження структури дозволяє безперервно виявляти все дрібніші самоподібні об'єкти.

Останнє пояснюється тим, що фрактал має властивість самоподібності, тобто складається з таких фрагментів, структурний мотив яких повторюється при зміні масштабу. Приклади фрактальних структур надані на рис.1.

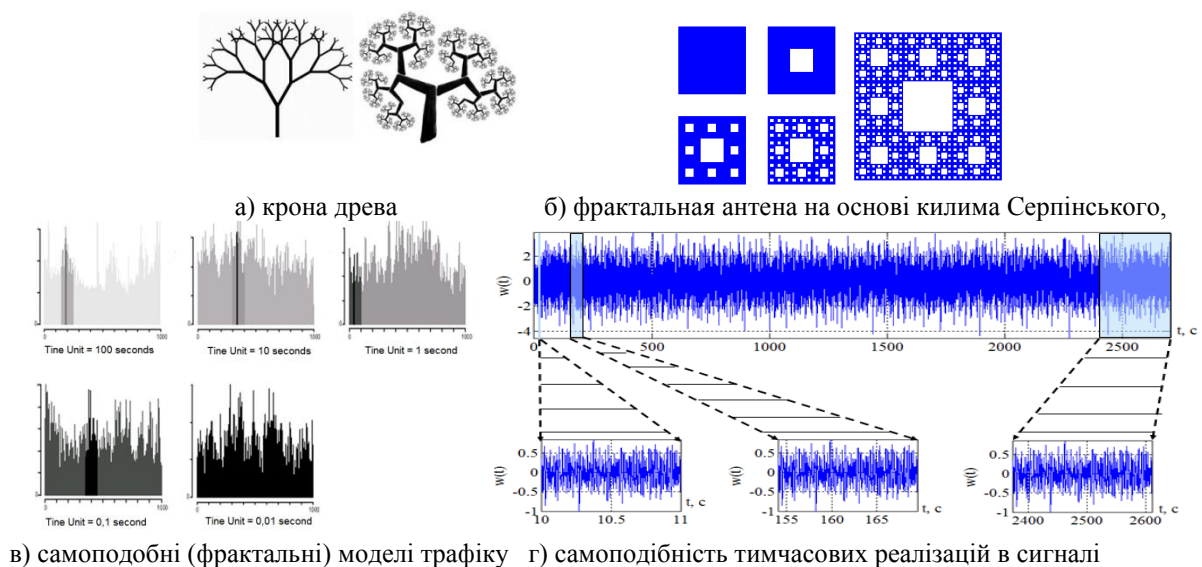


Рис.1 - Фракталоподібні структури.

З рис.1 видно, що природними прикладами фракталоподібної структури є крони дерев рис.1,а. У кроні дерева кожна з великих гілок поділяється як мінімум на дві більш дрібні гілки, після чого поділ повторюється знову і знову. В результаті кожен з гілок можна розглядати як окремий мотив фрактальної структури, що повторюється. В телекомунікації приклади фракталів також присутні. Наприклад, в антенно-щоглових пристроях це конструкція фрактальних антен [11] на основі килима Серпинського (рис.1,б). В галузі мережевих технологій існує явище самоподоби трафіку [13, 14], (рис.1,в), в напрямку обробки сигналів – це фрактальна обробка образів (радіосигналів, зображень) [15], що графічно показано на рис.1,г.

Методи фрактального аналізу для наукових досліджень представляють зручний інструмент для моделювання різноманітних фізичних процесів в телекомунікації, при умові, що вони володіють властивостями самоподібності і мають вище названим закономірності подоби в різних просторових і часових масштабах. Оцінка фрактальних структур, виконується за допомогою критеріїв складності: *критерію самоподоби (скейлінгу)*, що визначається інваріантністю - фізичною величиною, значення якої в деякому фізичному процесі не змінюється з плином часу; *критерію фрактальної розмірності*, що характеризує не тільки топологію об'єктів, але і відображає процеси еволюції динамічних систем і пов'язана з їх властивостями [9-13].

Для наукових досліджень процесу завадозахисту КУЗ слід вважати, що процес функціонування РТЗ під час збурень можна уявити як деяку фазову траєкторію розвитку стану завадозахищеності КУЗ. Приклади таких збурень можна отримати під час спостереження за процесами функціонування каналів зв'язку під час дії і/або випадкового сигналу збурення, що заважає сигналу, і/або дії декількох цілеспрямованих шумоподібних сигналів на структуру сигналу КУЗ, які заважають цифровій обробці сигналів на приймальній стороні [16]. Також, відповідно до [12, 13] аналіз впливу завад показує, що фазові траєкторії розвитку стану КУЗ плином часу прагнуть до фракталів, а це дозволяє застосовувати методи фрактального аналізу для дослідження властивостей самоподібності цих процесів завадозахисту [7, 9].

Такий підхід до вирішення проблеми підвищення завадозахисту КУЗ системи РТЗ є новим, актуальним і дозволяє, задавши початковий стан даної системи щодо завадостійкості і знаючи її структурно-функціональні особливості, оцінити ймовірність завадозахищеності стану КУЗ системи РТЗ в будь-який інший час після цього часу, що виникає в наслідок взаємодії з навколишнім середовищем в умовах так званого конфліктного інформаційного впливу (пригнічення каналів), а також оцінити різноманітні заходи протидії завадам за рахунок зміни структури КУЗ.

Формалізація процесу завадозахисту КУЗ в термінах фрактального аналізу.

Наслідком припущення того, що комплекс РТЗ розглядається як складна система є те, що його багатофункціональність призводить до необхідності розбиття системи на кілька рівнів, на кожному з яких збираються і агрегуються (узагальнюються) дані, які передаються на більш високі рівні або можуть обмінюватися інформацією між собою на одному рівні. Інформація на кожному рівні обробляється з відповідною швидкістю елементом системи управління - процесором. Час реакції на різних рівнях суттєво різниться і збільшується з підвищенням рівня і одночасно із збільшенням обсягу інформації, що обробляється. В такій структурі складної системи об'єктивно існують критичні елементи, які можуть сильно впливати на функціонування системи під час виникнення порівняно малих збурень.

З теорії нелінійних систем відомо, що складна система є нестійкою динамічною системою [6 - 8], тому якість зв'язку суттєво змінюється під впливом завад зовнішнього та внутрішнього середовища відносно заданих початкових значень параметрів. Динамічний діапазон значення повинен обиратись з достатнім ступенем точності, щоб забезпечити потрібний рівень якості зв'язку. Тому малі збурення можуть сильно впливати на поведінку об'єктів, розташованих на різних рівнях ієрархічної структури. Зміну значень параметрів у часі можна представити у вигляді деякої траєкторії зміни кожного параметру. Звідси завданням системи управління буде утримання цієї траєкторії в межах заданого діапазону біля обраної нормованої траєкторії.

Відомо, що під час прийому сигналів джерелом невизначеності є неповне апріорне знання часу появи і характеру демодульованого сигналу, а також неоптимальні умови прийому. Це проявляється як випадкові зміни рівня сигналу на вході, що обумовлено зовнішніми (специфічними видами перешкод, які залежать від умов поширення, атмосферних явищ і навмисних дій, а також спеціальних завад) і внутрішніми факторами (наведення різного походження, власні шуми, випромінювання від електронних елементів). Інформація про відхилення реальної фазової траєкторії від нормованої є необхідною для прийняття рішення, її отримання необхідна умова для прийняття рішень щодо якості сигналу.

Припустімо, що в РТЗ завадозахист КУЗ відповідають так звані процесори КУЗ - елементи системи управління, які мають інтелектуальні властивості для прийняття рішень на зміну фазової траєкторії на основі інформація про відхилення. Практично процесори КУЗ функціонально призначені для управління процедурами обробки сигналів на своєму рівні, з'єднані з аналогічними процесорами на своєму і різних рівнях і з центральним процесором, який приймає остаточні рішення по найголовнішим питанням функціонування та координує загальну дію всього

комплексу РТЗ. Така ієрархічна структура спрощує спостереження за складним процесом обробки сигналів і дозволяє його формалізувати, але вносить деяку ступень невизначеності в функціонування кожного процесора. Перевагою підходу формалізації є те, що РТЗ має структуру, в якій під час певних умов впливу зовнішніх динамічних змінних є деяка внутрішня ступень свободи для прийняття рішень відповідним інтелектуальним процесором. Процесор може мати сукупність образів стабільних станів, тобто образів, що характеризуються збереженням необхідного стану під час зміни параметрів збурення в деякому інтервалі, під час якого загальна система продовжує знаходитися у стійкому стані.

В теорії фракталів такі властивості процесору КУЗ мають назву аттрактор, тому що цієї процесор своїми діями створює такої стан РТЗ, який можна розглядати як деяку крапку, що залучає (притягує) всі траєкторії розвитку інших параметрів у вигляді фазового простору динамічної системи з периферії (множина станів елементів КУЗ) деякий тривалий час. Аттрактор є місцем крапки біфуркації. Відповідно з теорії самоорганізації [6, 7] термін «крапка біфуркації» передбачає зміну усталеного режиму роботи системи, тобто фактично це місце, де виникає критичний стан системи, при якому система стає нестійкою відносно флуктуацій і виникає невизначеність - буде стан системи хаотичним або вона перейде на новий, більш диференційований і високий рівень впорядкованості.

При такому підході точка біфуркації певного процесору передбачає, що під час деякого впливу середовища більш допустимого значення на цієї процесор, він не справляється з визначенням керуючих впливів на траєкторію стану (створює стан невизначеності). За алгоритмом він видає іншим процесорам сигнали невизначеності (аварії), які в наслідок взаємодії між процесорами на рівні обробки сигналів внутрішніх процесів можуть провокувати виникнення свого стану невизначеності і в подальшому передачу сигналу помилки на інший рівень - на центральний процесор. Кількість таких сигналів від різних рівнів поширюючись зростатиме лавина подібно, тому існує ймовірність, що центральний процесор також не зможе прийняти рішення за невизначеністю, хоча ця ймовірність менша за ймовірність аварії на нижньому рівні.

Відносно розгляду завадозахисту КУЗ це означає: чи буде втрачений зв'язок в наслідок впливу завади, з наслідками якої процесор КУЗ певного рівня не спроможний справитися, або система своєчасно перебудується завдяки спільній роботі всіх інтелектуальних процесорів і забезпечить зв'язок потрібної якості. Тоді із зору нелінійних динамічних систем вибір траєкторії в крапках біфуркації буде визначатися станом внутрішніх ступенів свободи системи. Зрозуміло, що для такого вибору важливі лише інформаційні вказівки процесорам КУЗ певного рівня, яка траєкторія краща. Формалізацію завадозахисту КУЗ можна розглядати як систему з управлінням, яке визначається станом внутрішньої динамічної системи і керується центральним процесором. Відповідно до цього формального опису динамічної системи на основі моделей нелінійної безперервної динаміки безліч просторових станів кожного ієрархічного рівня слід розділяти на дискретні елементи.

Загальний опис фрактальної математичної моделі завадозахищеності КУЗ.

У термінах простору-часу загальний опис фрактальної математичної моделі завадозахищеності КУЗ включає в себе набір динамічних змінних і набір параметрів в фазовому просторі, який відповідає цьому ієрархічному рівню.

Фазовий простір доцільно представити нелінійною системою. Відомо [17], що поведінка нелінійних систем n -го порядку, де визначені n змінних стану і r входів, описується системою звичайних n диференціальних рівнянь першого порядку у вигляді:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r, g_1, \dots, g_r),$$

.....

(1)

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r, g_1, \dots, g_r),$$

де компонентами внутрішнього стану системи є змінні вектору станів x :

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad (2)$$

сигналами управління (змінними управління) є змінні вектору управління u :

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T,$$

сигналами збурення управління є змінні вектору впливу g :

$$g = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T,$$

з початковими умовами

$$x_1 = x_{10}, \quad x_2 = x_{20}, \quad \dots, \quad x_n = x_{n0} \quad \text{при } t = 0 \quad (3)$$

Змінні вектору станів (2) можуть мати будь-який фізичний зміст, але умовно їх можна представити як координати деякої точки S . Оскільки вони певним чином змінюються, то це відповідає переміщенню точки в просторі у вигляді певної траєкторії $L(S)$. Отже, траєкторія руху $L(S)$ точки S може бути наочною геометричною ілюстрацією поведінки системи в процесі управління, що називається фазовим простором. Тоді за значеннями правих частин (1) в кожен момент часу можна визначити напрям руху точки S і відповідно прогнозувати поведінку реальної системи. Метою системи управління для забезпечення заводозахисту є обчислення на основі таких даних сигналів управління, за допомогою яких система виконуватиме поставлені завдання, незважаючи на вплив збурень. Даний опис відомий як рівняння точки S в просторі станів [17]. Головною перевагою його є можливість використання для їх вирішення чисельних методів лінійної алгебри. Один з методів розв'язання системи (1) є апроксимація похідних за часом різницевиими рівняннями:

$$x[(k+1)\tau] \approx x(k\tau) + \tau f(x, u, g),$$

де τ - інтервал вибірки, k - її порядковий номер.

Якщо відомі початкові умови (3), то можна розрахувати в моменти часу t_i значення параметрів стану $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$ які є наближеннями точного рішення в моменти часу t_i .

Слід відмітити, що важливим є правильний вибір інтервалу вибірок τ . На рис.1, в вказані часові інтервали вибірки (Time Unit - вузол зубів, елемент самоподоби (скейлінгу)). Для прийняття рішення процесором доцільно застосовувати спосіб вибору інтервалу часу τ , заснований на обчисленні середньої взаємної інформації між двома станами, що потрібне для оцінки ступеню зміни деякого параметру. Якщо задані дві множини вимірів A і B , то взаємна інформація між елементами A_i і B_j визначається як кількість інформації, яку вони мають по відношенню один до одного:

$$I_{A_i B_j} = \log \left[\frac{P_{AB}(A_i, B_j)}{P_A(A_i)P_B(B_j)} \right] \quad (4)$$

У разі коли стани A_i і B_j незалежні, то взаємна інформація дорівнює нулю. Тоді усереднюючи по всіх вимірах (4), отримуємо:

$$I_{AB} = \sum_{\forall A_i B_j} P_{AB}(A_i, B_j) \log \left[\frac{P_{AB}(A_i, B_j)}{P_A(A_i)P_B(B_j)} \right] \quad (5)$$

Замінюючи A_i і B_j на $x(k\tau)$ і $x((k\tau + 1))$, отримуємо середню взаємну інформацію як функцію зміни траєкторії.

Система рівнянь (1) може мати кілька рішень, кожне з яких у фізичному сенсі відповідає певній точці стійкості. Для динамічно нестійкої системи рішення буде сильно залежати не тільки від вибору початкових умов, але і від стану внутрішніх ступенів свободи.

Таким чином знайдені рішення – це траєкторії системи в фазовому просторі, які відповідають аттракторам. У загальному випадку система може прагнути до будь-якого аттрактору. Але головним є те, що аналіз отриманих траєкторії дозволяє визначити вигляд аттрактору, наприклад, рівноваги, періодичних коливань або strange attractor. Це надає можливість побудувати більш точну модель поведінки системи. Так коли структура strange attractor фрактальна - неперіодична і режим функціонування нестійкий (малі відхилення від режиму наростають), то можна стверджувати, що заводо захищеність КУЗ незадовільна і потребує підвищення. Разом з тим виникає задача – яким чином вивести систему з такого аттрактору. Наприклад, з метою збереження цілісності і функціональної працездатності радіосистеми це зміна її енергетичних параметрів - підвищення потужності сигналу, а коли це неможливо, то зміна структури сигналу або виду модуляції.

Щоб при нудити систему до прийняття рішення по вибору подальшого напрямку розвитку, слід повідомити процеси КУЗ її системи, тобто передати певну кількість керуючої інформації, яка забезпечить інтелектуальне визначення вибору раціонального рішення.

При отриманні такої інформації в складних фізичних системах з багатьма аттракторами може розвиватися процес упорядкування, а саме - самоорганізація. Коли в системі, що знаходиться в нестійкому однорідному стані спонтанно виникають нові структури, потім, із появою і взаємодією нових структурних елементів, що з'явилися, починає розвиватися нова ієрархія взаємодії структурних елементів РТЗ.

Для формалізації процесу появи нових структур висувається припущення, що будь-якій детермінований об'єкт в фізично охоплених межах спостереження залишається незмінним, і оцінка його характерних властивостей завжди прагне до певної межі. Але при зміні масштабу відображення цього детермінованого об'єкту площа фрактальних утворень також змінюється. Звідси, вимірюючи деякий параметр при різних масштабах фізичного об'єкта, можна отримати корисну інформацію опису відповідних процесів функціонування багатофункціонального комплексу РТЗ. З метою отримання корисної інформації про зміну траєкторії треба мати і оцінити різну кількість інформації про фрактальну структуру. За визначенням Шеннона, кількість інформації визначається як $I = - \sum_i p_i \log p_i$, де p_i - ймовірність появи i -го символу.

Тобто інформація відповідає єдиній вибірці з величезного числа можливих станів, і міра цієї інформації - $I = \log N$, де N - число можливих станів системи.

Чим більше станів може приймати об'єкт, тим більше інформації можна отримати на основі його поточного стану. Визначення фрактальної розмірності за методом Хаусдорфа-Безиковича базується на математичній абстракції практичного способу вимірювання об'єктів, коли об'єкт покривається еталонами певної міри:

$$d_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log \frac{1}{r}}, \quad (6)$$

де N - кількість елементів, d_H - розмір еталонного елемента r .

Такий перехід не може бути застосований, тому що мінімальне значення обмежено фізичною розмірністю нескінченно малого елемента [11, 12].

Максимальне число елементів N і мінімальна довжина елемента на максимальному кроці кінцеві і фізично визначаються мінімальним масштабом середовища вимірювань. Тому розмірність інформаційної системи з урахуванням припущень визначається так:

$$d_I = \frac{\log \frac{I_n}{I_0}}{\log \left(\frac{r_0}{r_n} \right)}, \quad (7)$$

де I_i - кількість інформації одного стану.

Чисельне визначення фрактальної розмірності (6) об'єктів шляхом покриття об'єкту одиничними зразками непрактичне і незручне. Тому більш часто використовується [8] визначення кореляційної розмірності:

$$d_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=0}^{N(r)} p_i^2}{\log r} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r}, \quad (8)$$

де $C(r)$ - кореляційний сума (або кореляційний інтеграл), яка є відношенням числа точок, попарні відстані між якими менше, до квадрату загального числа точок N :

$$d_H = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i,j} \theta[r - |x_i - x_j|]}{N^2}, \quad (9)$$

коли коефіцієнт вибору траєкторії $\theta(\beta)$ відповідає правилу $\theta(\beta) = \begin{cases} 1, & \beta \geq 0 \\ 0, & \beta < 0 \end{cases}$.

В виразі (9) d_H вважають кореляційної розмірністю системи при умові

$$C(r) \sim r^{d_H} \quad (10)$$

З огляду величини $C(r)$ із (10) бачимо, що вона визначається приблизно, тому доцільно провести серію підрахунків для різних значень одиничного еталона.

Наведений метод справедливий при досить малих значеннях r . З (9) випливає, що при збільшенні r величина $C(r)$ буде прагнути до 1. Головним є те, що при дуже малих значеннях r число пар точок, відстань між якими не перевищує r , стає досить малим. Тому на практиці цей метод можна використовувати тільки в обмеженому діапазоні значень r , який і може бути використаний для визначення кореляційної розмірності.

Висновки. Таким чином, система управління може формувати вплив на параметри елементів, що надає можливість протидіяти заваді на канал управління системи РТЗ.

1. Результати дослідження свідчать, що виконавча (інформаційна) частина системи управління РТЗ в залежності від оцінки ступеня впливу збурення на процес передачі сигналів впливає на керовані параметри з метою адаптації окремих елементів КУЗ щодо впливу певного виду завади. Зміна вихідної величини (кількість помилок) може контролюватися пристроєм збору і аналізу даних.

2. В сучасних РТЗ в умовах постійно зростаючого арсеналу засобів РЕБ завадостійкість в більшій мірі починає визначатися інформаційними властивостями елементів структури щодо вибору моделі захисту, яка може об'єднати існуючі ресурси (процесори цифрової обробки сигналів) в структури, що можуть адаптуватися до будь-яких завад. Тобто, поряд зі звичайним обміном енергією з зовнішнім оточенням, необхідним для збереження відкритої самоорганізованої структури автоматизовані РТЗ отримують можливість інтелектуального розвитку.

Рекомендації.

1. Впровадження інтелектуальних елементів управління в багатofункціональні РТЗ пов'язане з ускладненням компонент системи управління, але це необхідне для отримання ступенів свободи. Використання запропонованої в статті фракталоподобної моделі КУЗ для

РТЗ і алгоритму взаємодії ієрархічних рівнів дозволяє застосовувати методи і алгоритми теорії нелінійних динамічних систем для аналізу заводо захищеності КУЗ для забезпечення належного функціонування РТЗ в умовах інформаційного конфлікту.

2. Фрактальний аналіз може бути використаний як метод виділення важливих структурних особливостей систем, що досліджуються, наприклад, для проведення операції кластеризації. Фрактальність дає одиницю виміру характеристик ієрархічно організованих систем і, таким чином, дозволяє перейти до динамічних параметрах, коли фракталоподоба моделі систем, що самоорганізуються, застосовуються для обчислювальних експериментів, за допомогою яких проводяться дослідження розвитку структурних об'єктів.

Список використаних джерел:

1. Бераланфи фон Л. Общая теория систем – критический обзор. / В кн. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс. – 1969. – С. 23-82.
2. Месарович М. Общая теория систем: математические основы/М. Месарович, Н. Такахага. – М.: Мир, 1978. –311с.
3. Серих С. О. Оцінка можливостей постановників завод та впливу їх енергетичних показників на функціонування засобів зв'язку / С.О.Серих, Ю.І. Катков // Сучасний захист інформації.- 2017. – №1. – С.66-72.
4. Прокис Дж. (Proakis). Цифровая связь. Пер с англ./ Под редакцией Д. Д. Клоеского – М.: Родно и связь, 2000.-800 с.
5. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. / Э.Айфичер, Б. Джервис. М.: ИД "Вильямс", 2004. – 992 с.
6. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур и упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин.– М.: Мир, 1979. – 512 с.
7. Николис Г. Динамика иерархических систем: эволюционное представление / Г. Николис. – М. : Мир, 1989. – 488 с.
8. Серих С.О. Скрытность повідомлень в сетях із радіодоступом та напрямки її підвищення / С.О. Серих // Сучасний захист інформації. – 2015. - №2. – С. 77-83.
9. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р.М. Кроновер. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
10. Потапов А.А. Теория фракталов и скейлинг / А.А. Потапов, В.А. Черных. – М.: Физматлит, 2009. – 820 с.
11. Потапов А.А. Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты / А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. - 200 с.
12. Шелухин И.О. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. / И.О. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин. – М.: Радиотехника, 2003. - 480 с.
13. Шелухин И.О. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. / И.О. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
14. Люгер Дж. Ф. - Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е изд. Пер. с англ. - М.: Вильямс, 2003. — 864 с. — ISBN 5-8459-0437-4, 0-201-64866-0. (Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving 4/e George F. Luger)
15. Werner, D. H. On the Synthesis of Fractal Radiation Patterns / D. H. Werner, P. L. Werner // Radio Sci. – 1995. – Vol. 30, No.1 – P.29-45.
16. Варакин Л.Е Системы связи с шумоподобными сигналами. – М. Радио и связь» 1985. – 384 с.
17. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов.: Наука, Издание 3, 1975. – 768 с.

Надійшла: 18.03.2018

Рецензент: к.т.н. Курченко О.А.