

УДК 621.391.8

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.044050

А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук, здобувач,

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИЯВЛЕННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ OFDM

Досліджено проблему оброблення різних етапів виявлення сигналу за умов завад, проаналізовано методи статистичного оброблення. Завданням оброблення інформації є визначення моменту зміни вхідного сигналу (зміна рівня сигналу, зміна частоти, виникнення імпульсного сигналу тощо). Зовнішні завади спотворюють вхідний сигнал, тому його можна розрізнити на основі статистичної різниці між завадами та змішуванням. Додаткові завади, які спотворюють вхідний сигнал в обладнанні телекомунікаційної системи, вносяться під час перетворення сигналу перед надходженням в обладнання цифрового оброблення. Розглянуто різні методи статистичного оброблення: оптимальні, адаптивні, неklasичні методи оптимізації на основі принципів незміщення, інваріантності, подібності тощо. Досліджувалося застосування непараметричних методів, коли функціональна форма розподілу вхідних даних була невідома і зазначалася лише загальна різниця між випадками наявності та відсутності сигналу. Особливої уваги заслуговує метод ранжування оброблення виявлення сигналу.

Ключові слова: багатопозиційні сигнали; ранжування; оптимальне приймання.

Вступ

Значний інтерес викликає теоретична проблема побудови майбутніх інформаційно-комунікаційних мереж FGN. Системний аналіз принципів їх побудови дає підстави стверджувати, що це будуть багатомірні мережі. Як ми всі знаємо, багатомірність розглядається як конструктивний принцип, це спосіб об'єднання різних об'єктів в єдине ціле, тому майбутні багатомірні мережі не обов'язково мають бути чітко визначені як транспортні мережі, мережі доступу та мережі підтримання та обслуговування.

Отже, в інфокомунікаційних мережах FGN, завдяки багатомірній структурі мережі та використанню багатоядерних обчислювальних засобів у вузлах, можна буде забезпечувати користувачам обмін інформацією та різноманітні послуги за схемою, яка є майже примітивною на перший погляд: користувачі – багатомірна мережа – користувачі.

Використовуючи цей підхід, доступ, транспорт, послуги, підтримання (синхронізація, сигналізація тощо) є внутрішніми справами інтегрованої мережі FGN, багатомірна архітектура якої загалом забезпечує можливі компоненти для спільного вирішення поставлених перед мережею завдань.

Сучасні системи зв'язку застосовуються до неоднорідних за функціями та структурою телекомунікаційних мереж, які належать до категорії великих систем і потребують швидкої цифровізації. Насправді традиційний оптимальний метод приймання для телекомунікаційної системи неприйнятний. Для ефективного застосування критерію В. А. Котельникова потрібно знати інформацію про апріорний розподіл імовірностей. Якщо цей розподіл невідомий, рекомендуються непараметричні методи. Якщо зміна робочих умов є плавною та достатньо передбачуваною, то використовується адаптивний підхід, за непередбачених обставин — підхід оброблення сигналу має бути інваріантним.

Адаптивні методи застосовуються, коли невідома невелика кількість параметрів сигналу і завад, тоді як у великій кількості випадків адаптація неефективна. Надання інваріантних властивостей непараметричним процесам досягається загальною технікою: на початковій стадії оброблення надмірність вхідної інформації зменшується завдяки скороченню спостережень вибіркового даних, чутливих до значень, розподіл яких є інваріантним відносно вхідних даних.

Процес ранжування вхідних відліків має найширшу інваріантну властивість, яка перетворює їх на послідовність цілих чисел — ранжування залежить від відносних рівнів цього зчитування в досліджуваному наборі. Ранг має багато властивостей, і теорія рангового процесу є більш ефективною, ніж непараметричні методи в практичних застосуваннях.

Основна частина

Завдання оброблення інформації (ОІ) стосовно вхідних впливів — це виявлення моменту зміни (чи появи) вхідного сигналу $S(t)$ (зміна рівня сигналу, зміна частоти, поява імпульсного сигналу тощо). Зовнішні завади $b_1(t)$ спотворюють вхідний сигнал, тому виокремити його можна на основі статистичних розходжень між завадою $b_1(t)$ і сумішшю $b_1(t) + S(t)$. Додаткові завади $b_2(t), \dots, b_5(t)$, що спотворюють

© А. Г. Захаржевський, 2023

вхідний сигнал в обладнанні ТС, вносяться під час перетворення сигналу до введення в цифрове обладнання оброблення. Алгоритм функціонування обладнання ТС має три етапи ОІ: первинний, вторинний і третинний (комплексний). Загальну структурну схему вхідної інформації в обладнанні ОІ наведено на рис. 1, де ДС — джерело сигналу; ПП — підсилювач-перетворювач вхідного сигналу; АЦП — аналого-цифровий перетворювач (перетворювач вхідної інформації для оброблення в обладнанні ОІ); $b_2(t)$, $b_4(t)$ — завади передавання сигналу у вхідних ланцюгах; $b_3(t)$, $b_5(t)$ — завади пристроїв підсилення і перетворення сигналу.

На етапі первинного оброблення вирішуються задачі виявлення, вимірювання інформативних параметрів і визначення сигналів на фоні завад. Результати первинного оброблення є сукупністю розв'язків щодо наявності чи відсутності сигналу зі всієї множини альтернатив, що перевіряються.

На етапі вторинного оброблення інформації здійснюється виявлення закономірностей у поведінці вхідного сигналу (траєкторія, вид кривої росту, тенденція зміни тощо). Під час третинного оброблення інформації відбувається спільне оброблення даних від різних джерел і виявляються загальні закономірності для створення сигналів керування об'єктом.

Такий розподіл на етапи оброблення є умовним, але зручним із погляду формулювання часткових критеріїв ефективності, він відбиває структуру більшості обладнання ТС оброблення сигналів у реальному часі. Найбільш складним у процесі розроблення структури і програмного забезпечення обладнання ТС є етап первинного оброблення сигналів, оскільки під час проектування обладнання ТС часто відсутні точні відомості щодо характеру завад, котрі змінюються.

Тому однією з основних проблем, що виникають, є забезпечення стійкості параметрів первинного оброблення до вигляду і характеру випадкових завад. Розв'язання цієї проблеми потребує насамперед розроблення відповідного алгоритмічного забезпечення систем первинного оброблення, яке братиме до уваги новітні технології математичної статистики.

Залежно від ступеня деталізації повідомлень використовують наведені далі методи статистичного оброблення.

Оптимальні методи. Оптимальні (класичні) методи використовують за умови, коли відомий функціональний вид розподілу вибіркового значення і всі його параметри. У цьому разі найвища якість визначення за відомим критерієм Неймана – Пірсона, який забезпечує функціонал відношення правдоподібності:

$$V(x) = \alpha(x) = \frac{f(x/v=1)}{f(x/v=0)}, \quad (1)$$

де $f(x/v)$ — спільний розподіл імовірностей масиву вибіркового значення у ситуації v .

Тоді порогова константа Π обчислюється як розв'язок рівняння

$$P_\lambda(\Pi/v=0) = 1 - a, \quad (2)$$

де $P_\lambda(\Pi/v)$ — інтегральна функція розподілу статистики (1).

Адаптивні методи. Адаптивні методи використовують, якщо розподіл вхідних даних відомий з точністю до масиву невідомих параметрів δ . У цьому разі оптимізація $V(x)$ за класичними критеріями неможлива. Потрібно звертатись до застосування некласичних методів оптимізації, побудованих на принципах незміщеності, інваріантності, подібності тощо. Використовують також некласичні критерії якості. Але незалежно від прийнятого методу загальний результат такий: у відношення правдоподібності, обчислене з відомим масивом параметрів δ , підставляємо оптимальну оцінку $\hat{\delta}$, здобуту або безпосередньо за масивом X , або за спеціальним масивом Y . Отже, ця група методів відрізняється від попередньої введенням до складу визначника блока адаптації, який оцінює невідомі параметри сигналу і завади.

Непараметричні методи. Непараметричні методи використовують, коли функціональний вид розподілу вхідних даних невідомий, а задано лише загальні відмінності між ситуаціями наявності і відсутності сигналу.

Нехай масив вибіркового значення X складається з n -елементів $\{x_1, \dots, x_n\}$. У багатьох випадках спільний n -вимірний розподіл імовірностей вибірок $\{x_1, \dots, x_n/v\}$ має властивість інваріантності до переставляння аргументів, тобто:

$$f\{x_1, \dots, x_n/v\} = f\{x_{k_1}, \dots, x_{k_n}/v\}, \quad (3)$$

де $\{k_1, \dots, k_n\}$ — довільне переставляння цілих чисел від 1 до n . Умова (3) в окремих випадках виконується, якщо

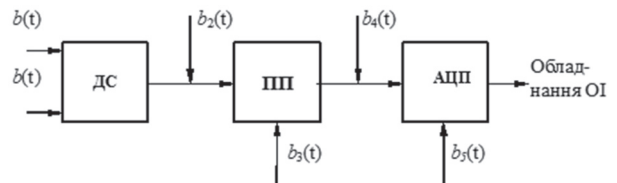


Рис. 1. Структура вхідної інформації в обладнанні оброблення інформації

$$f(x_1, \dots, x_n / v) = \prod_{i=1}^n f(x_i / v), \quad (4)$$

тобто вибірки $\{x_1, \dots, x_n\}$ статистично незалежні і мають однаковий одновимірний розподіл $f(x/v)$. Якщо умови (3) і (4) виконуються для $v = 0$ і не виконуються для $v = 1$, то задачу визначення сигналу можна сформулювати як перевірку виконання зазначених нерівностей. Конкретний вид розподілу при цьому знати не обов'язково.

Інформативним параметром розподілу, який не залежить від його конкретного виду, може бути властивість симетрії:

$$f(x/v = 0) = f(-x/v = 0), \quad (5)$$

на протиположності альтернативній гіпотезі про те, що розподіл несиметричний.

Існування відмінності між розподілами масиву X у ситуаціях $v = 0$ і $v = 1$ можна сформулювати як гіпотезу зсуву розподілу праворуч:

$$F(x/v = 1) \leq F(x/v = 0), \quad (6)$$

де F — одновимірна інтегральна функція розподілу вибірок $\{x_1, \dots, x_n\}$. Тоді

$$F(x/v) = \int_{-\infty}^x f(y/v) dy. \quad (7)$$

Фактично нерівність (6) означає, що за наявності сигналу вибіркові значення фізичних величин у середньому більші, ніж за його відсутності. Можливий також зсув розподілу ліворуч, якому відповідає нерівність, протилежна виразу (6). У такому разі сигнальні вибірки будуть у середньому менші за величиною, ніж завадові. Окремим випадком гіпотези зсуву є гіпотеза зсуву середнього значення:

$$f(x/v) = f(x - v\alpha), \quad (8)$$

де α — деяка константа.

Дослідження показують, що апріорна інформація, яка використовується під час синтезу непараметричних виявлень, має швидше якісний, ніж кількісний характер. Непараметричні методи оброблення відрізняються від класичних і адаптивних. Відмінність від останніх полягає в тому, що в непараметричних методах головний акцент робиться не на оптимізації характеристик системи, а на забезпеченні їх нечутливості до умов функціонування. Тому непараметричними вважають системи визначення сигналів, рівень a_0 хибних тривог яких інваріантний щодо функціонального виду розподілу завади. Оскільки рівень a_0 однозначно визначається функцією розподілу тестової статистики, то звідси випливають дві вимоги до $V(x)$: по-перше, її розподіл за відсутності сигналу має бути точно відомим і незмінним, яким би не був розподіл завади на вході системи; по-друге — у разі появи сигналу інваріантність розподілу $V(x)$ має порушуватись, щоб зберігалась можливість розпізнавання ситуацій $v = 0$ і $v = 1$. Синтез непараметричних процедур оброблення сигналів здійснюється переважно евристичними методами.

Деякі закономірності цих методів: практично всі непараметричні визначники містять як складовий елемент пристрої, що виконують деяке інваріантне перетворення S масиву вибірових значень X . У результаті цього перетворення утворюється новий масив $Z = SX$, розподіл елементів якого за відсутності сигналу ($v = 0$) точно відомий.

Перетворення S , яке вибирається евристично, дає змогу звести задачу визначення сигналу на фоні завод із невідомим розподілом до задачі перевірки простої гіпотези відносно розподілу масиву Z . Відповідно і синтез непараметричних визначників виконують у два етапи: на першому вибирають вид інваріантного перетворення S , на другому — спосіб оброблення перетворюваних даних.

Одним із найпростіших прикладів перетворення є жорстке обмеження:

$$Z_i = \text{sgn}(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \geq 0, \\ 0, & x_i < 0. \end{cases} \quad (9)$$

Якщо гіпотеза симетрії (5) правильна, то неважко переконатись, що поява одиниць і нулів на виході обмежувача (9) рівноймовірна:

$$P(z_i = 1/v = 0) = P(z_i = 0/v = 0) = 1/2. \quad (10)$$

Отже, (9) переводить масив із довільним симетричним відносно нульового рівня розподілом до нового масиву. З появою сигналу симетрія розподілу порушується (що особливо важливо). Тоді задачу виявлення можна звести до перевірки простої гіпотези (10) щодо альтернативної гіпотези $P(z_i = 1/v = 1) > 1/2$.

Розв'язком такої задачі є критерій знаків, який передбачає додавання знаків елементів вибірки

$$V(x) = \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i) \quad (11)$$

та аналіз нагромадженого значення з порогом. Статистика (11) — це кількість переваг в серії n незалежних досліджень, тобто підпорядковується біноміальному розподілу, причому за відсутності сигналу ймовірність переваги дорівнює $1/2$, а за його наявності перевищує $1/2$. Отже, (11) задовольняє дві вище наведені умови: при $\nu = 0$ її розподіл точно відомий і незмінний, яким би не був вихідний симетричний розподіл $f(x/\nu = 0)$, а при $\nu = 1$ розподіл статистики (11) чутливий до наявності сигналу.

Окрім жорсткого обмеження відомі також такі види перетворень.

Переставляння елементів вибірки. Якщо справедлива гіпотеза випадковості (3), то всі переставляння елементів вибірки рівноймовірні незалежно від виду їх розподілу.

Порядкові статистики. Вихідна вибірка $\{x_1, \dots, x_n\}$ упорядковується за величиною і організується у варіаційний ряд, в якому $x^{(1)}$ — найменший елемент вибірки; $x^{(2)}$ — другий за абсолютною величиною елемент; $x^{(R)}$ — R -й за абсолютною величиною елемент; $x^{(n)}$ — максимальний елемент, тобто:

$$x^{(1)} < x^{(2)} < \dots < x^{(R)} < x^{(n)}. \quad (12)$$

Випадкова величина $x^{(R)}$ називається R -ю порядковою статистикою. Її інваріантна властивість полягає в тому, що зі збільшенням обсягу вибірки значення $x^{(R)}$ збігається за ймовірністю з квантованим рівнем $R/(n+1)$ незалежно від виду розподілу вихідної вибірки (якщо лише для нього виконується рівність (4)).

Ранги. Рангом i -го елемента x_i масиву вибірових значень X вважається порядковий номер R_i цього елемента у варіаційному ряді, тобто:

$$x_i = x^{(R_i)}. \quad (13)$$

Як відомо, формально процедуру обчислення рангу можна подати у вигляді

$$R_i = \sum_{k=1}^n \text{sgn}(x_i - x_k). \quad (14)$$

Сукупність рангів $\{R_1, \dots, R_n\}$ усіх елементів вибірки $\{x_1, \dots, x_n\}$ утворює деяке переставляння чисел від 1 до n . Згідно з гіпотезою випадковості (3) усі такі переставляння рівноймовірні. Отже, незалежно від конкретного закону розподілу вихідної вибірки $\{x_1, \dots, x_n\}$ спільний розподіл рангів $\{R_1, \dots, R_n\}$ є рівновимірним:

$$P(R_1, \dots, R_n) = \frac{1}{n!}. \quad (15)$$

Аналіз методів виявлення сигналу показує, що наведений перелік інваріантних перетворень не є, безумовно, вичерпним, але він підтверджує неоднозначність вибору перетворень масиву S . Критерієм вибору є не тільки дослідження заданих інваріантних властивостей рівня неправдоподібних тривог до виду розподілу, а і максимально можливе зберігання інформації про сигнал, що дає змогу його виявити.

До визначення рангів (14) можна дійти в такий спосіб. Припустимо, що вид інваріантного перетворення S заздалегідь не обмежується, а розглядається задача вибору оптимального S , що за заданими інваріантними властивостями забезпечує і найкращу якість виявлення сигналу. З апіорі відомим спільним розподілом вхідних вибірових значень $\{x_1, \dots, x_n\}$ зазначену вимогу задовольняє нелінійне перетворення виду

$$z_i = F_i(x_i/x_1, \dots, x_{i-1}; \nu = 0), \quad (16)$$

або будь-яка монотонна функція від нього. У нашому разі $F_i(\bullet/\bullet)$ — інтегральний розподіл i -го елемента вибірки, обчислений за умови, що перші $(i-1)$ елементів фіксовані і сигнал відсутній.

Ранжування має інваріантні властивості, подібні до властивостей перетворення (16): ранги, обчислені за вибіркою з довільним неперервним розподілом, що задовольняє рівність (14), розподілені за рівномірним законом (15). Варто зазначити, що розподіл (15) справедливий із будь-яким обсягом вибірки n , тобто похибка оцінювання функції розподілу за значенням n не впливає на інваріантні властивості рангів. Потім, з асимптотичної еквівалентності рангів і перетворення (16) випливає, що в разі великих обсягів вибірки можна наближено вважати

$$R_i \approx nF(x_i/\nu = 0). \quad (17)$$

Розподіл рангів інваріантний до виду вихідного розподілу лише за умови, якщо елементи рангованих вибірок статистично однорідні. У всіх випадках елементи вибірок вважаємо статистично незалежними, тобто їхній розподіл не залежить від номера елемента.

Незважаючи на скорочення кількості інформативних відліків, чутливість розподілу рангів за наявності сигналу не тільки не зменшилася, а навіть збільшилася, що є істотним принципом для організації процедури виявлення сигналу на основі рангів.

Отже, аналіз усіх специфічних особливостей: властивостей сигналів і завод, потреби у стабілізації помилкових тривог, забезпечення найкращої ефективності виявлення сигналу, можливості вимірювання параметрів сигналу зумовлює різні визначення рангу.

Гнучкість процедури ранжування забезпечує можливість розв'язання широкого кола задач виявлення сигналів за умов непараметричної апріорної невизначеності. Унікальною особливістю рангів порівняно з непараметричними перетвореннями інших типів є також можливість практично повного відновлення вихідної інформації. Тому можна дійти висновку: розв'язком задачі мінімізації помилкових тривог за допомогою ранжування досягається висока ефективність виявлення сигналу. Ранги за своєю суттю є дискретними величинами, що набувають до того ж цілочисельних значень. А отже, для їх обчислення потрібні найпростіші операції, зокрема порівняння і підсумовування.

Висновки

1. Аналіз методів детектування сигналів показує, що одним із перспективних напрямів досліджень є розроблення методів, які використовують інваріантні властивості системи та забезпечують максимально можливе зберігання сигнальної інформації.

2. Було вивчено, що гнучкість процедури ранжування дає можливість розв'язувати широкий спектр проблем у виявленні багатопозиційних сигналів за умов непараметричної апріорної невизначеності.

Список використаної літератури

1. Підходи до методів розрахунку параметрів систем управління мережами майбутнього / В. Г. Кривуца, Л. Н. Беркман, О. С. Колобов, В. В. Олійник // Зв'язок. 2009. №4(88). С. 2–5.

2. Кривуца В. Г., Беркман Л. Н., Олійник В. В. Дослідження методів оптимізації інфокомунікаційних мереж у критичних ситуаціях // Зв'язок. 2010. №4(92). С. 2–5.

3. Оптимальний прийом багатопозиційних сигналів на базі рангових методів / О. Г. Варфоломеева, Б. Ю. Жураковський, О. В. Гладких, О. А. Хахлюк // Вісник ДУІКТ. 2012. Т. 10, № 4. С. 108–110.

4. Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Козелков С. В. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізничевої модуляції високого порядку // Зв'язок. 2016. №4(122). С. 3–7.

5. Фазорізничева модуляція високих порядків для забезпечення визначеної завадозахищеності каналів передавання інформації мобільних мереж 5-го покоління / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, Є. П. Гороховський // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. №1(54). С. 5–10.

6. Оптимальний демодулятор для некогерентного прийому сигналів із фазорізничевою модуляцією другого порядку / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Н. В. Коршун, О. А. Хахлюк // Наукові записки УНДІЗ 2017. № 4(48). С. 5–11.

A. Zakharzhevskiy

WAYS OF ENSURING EFFECTIVE DETECTION OF MULTIPosition OFDM SIGNALS

The problem of processing various stages of signal detection in interference conditions was investigated, statistical processing methods were analyzed. The task of information processing is to detect the moment of change in the input signal (change in signal level, change in frequency, occurrence of a pulse signal, etc.). External interference distorts the input signal, so it can be distinguished based on the statistical difference between interference and mixing. Additional interference that distorts the input signal in the equipment of the telecommunications system is introduced during the conversion of the signal before entering the digital processing equipment. Various methods of statistical processing are studied: optimal, adaptive, non-classical optimization methods based on the principles of non-displacement, invariance, similarity, etc. The application of non-parametric methods was investigated when the functional form of the distribution of the input data was unknown and only the general difference between the presence and absence of the signal was indicated. The ranking method of signal detection processing deserves special attention.

Adaptive methods are used if the distribution of input data is known with accuracy up to the array of unknown parameters. Non-parametric methods are used when the functional form of the distribution of input data is unknown, and only the general differences between the situations of the presence and absence of a signal are specified.

The analysis of signal detection methods shows that one of the promising directions of research is the development of methods that use the invariant properties of the system and ensure the maximum possible storage of signal information.

It was studied that the flexibility of the ranking procedure makes it possible to solve a wide range of problems in the detection of multi-position signals under conditions of non-parametric a priori uncertainty.

Keywords: multi-position signals; ranking; optimal reception.