УДК 621.391.8 DOI: 10.31673/2412-4338.2023.011728

Домрачева К.О., Беркман Л.Н., Захаржевський А.Г.
Державний університет телекомунікацій, Київ

ОПТИМАЛЬНИЙ ПРИЙОМ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РАНГОВИХ МЕТОДІВ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Анотація: *У статті запропоновано рішення задачі виявлення сигналу в апріорно невизначених умовах і розроблено алгоритм виявлення сигналу на фоні перешкод. Встановлено, що гнучкість процедури ранжування дає можливість вирішувати різноманітні задачі виявлення сигналу в умовах апріорної невизначеності. Досліджено властивості рангових алгоритмів багатопозиційних сигналів OFDM. Проаналізовано унікальні характеристики рангу порівняно з іншими типами непараметричних перетворень. Критерієм відбору є не тільки вивчення заданих інваріантних властивостей рівня неправдоподібних сповіщень про тип розповсюдження, але й, що дуже важливо, максимально можливе збереження інформації про сигнал, що дозволяє практично повністю відновити вихідну інформацію, тобто високу ефективність виявлення сигналу. У даний час немає досить ефективних і прийнятних методів прямої оцінки багатомірного розподілу. У зв'язку з цим доцільна така організація вхідної вибірки, при якій її елементи статистично незалежні. Процедури ранжирування дають можливість вирішити широкий спектр проблем виявлення сигналу в попередніх умовах невизначеності. Унікальною особливістю рангу в порівнянні з іншими типами непараметричних перетворень є можливість майже повністю відновити вихідну інформацію. Досліджено формування вибіркових масивів даних і алгоритми їх ранжування для багатопозиційних сигналів із фазорізницевою модуляцією високої кратності. Однією з важливих задач, пов'язаних з ранговою обробкою інформації, є питання про місце переходу від вхідних даних до рангів. Аналіз показує, що процедуру ранжування можна проводити практично на будь-якому етапі обробки і кожний з відповідних методів ранжування має свої переваги і недоліки.*

Ключові слова: *оптимальний прийом, ранжування, апріорна невизначеність, багатопозиційні сигнали, модуляція.*

Domracheva K., Berkman L., Zakharzhevsky A.
State University of Telecommunications, Kyiv

OPTIMAL RECEIPT OF MULTIPOSITION SIGNALS USING RANKING METHODS IN CONDITIONS OF PRIOR UNCERTAINTY

Abstract: *The article proposes a solution to the problem of signal detection in a priori uncertain conditions and develops a signal detection algorithm against the background of interference. It was established that the flexibility of the ranking procedure makes it possible to solve various problems of signal detection in conditions of a priori uncertainty. The properties of ranking algorithms of multi-position OFDM signals are studied. The unique characteristics of rank compared to other types of nonparametric transformations are analyzed. The selection criterion is not only the study of the given invariant properties of the level of implausible notifications about the type of propagation, but also, which is very important, the maximum possible preservation of information about the signal, which allows for almost complete recovery of the original information, that is, high efficiency of signal detection. Currently, there are no sufficiently effective and acceptable methods of direct estimation of multivariate distribution. In this regard, it is advisable to organize the input sample in such a way that its elements are statistically independent. Ranking procedures make it possible to solve a wide*

range of signal detection problems under prior uncertainty conditions. A unique feature of the rank in comparison with other types of non-parametric transformations is the ability to almost completely recover the original information. The formation of selective data arrays and their ranking algorithms for multi-position signals with phase-difference modulation of high multiplicity are studied. One of the important problems related to rank processing of information is the question of the place of transition from input data to ranks. The analysis shows that the ranking procedure can be carried out at almost any stage of processing and each of the relevant ranking methods has its advantages and disadvantages.
Key words: *optimal reception, ranking, a priori uncertainty, multi-position signals, modulation.*

1.Вступ

Сучасні системи зв’язку, які застосовуються в неоднорідних за функціями та структурою телекомунікаційних мережах належать до категорії великих систем і потребують швидкої цифровізації. Такі системи мають свої особливості:

- кожна система являє собою набір взаємозалежних елементів, які утворюють єдине ціле, упорядкованих певним чином, причому внаслідок об’єднання її складових (елементів) або розчленування на групи та підсистеми утворюються сукупності, котрі у процессі функціонування телекомунікаційнит систем (ТС) мають власне цільове завдання;
- єдність мети функціонування для всієї системи;
- ієрархічну структуру зв’язків підсистем;
- складність поведінки системи, зумовлену характером випадкових зовнішніх впливів;
- стійкість щодо зовнішніх завад.

Якщо перші три ознаки є загальними для всіх типів систем, то дві останні (випадковість зовнішніх впливів і стійкість до них) характеризують велику кількість проблемно-орієнтованих систем обробки керуючих сигналів. Тому на практиці звичайний оптимальний метод прийому телекомунікаційної системи неприйнятний. Для ефективного застосування критеріїв В. А. Котельникова необхідно знати інформацію про апріорний розподіл ймовірностей.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У відомій науково-технічній літературі недостатньо досліджень принципів побудови ефективної системи передачі інформації на основі багаточастотної модуляції OFDM, які мають практичне значення та враховують багаторазовий розвиток засобів і сучасних технологій. Як відомо, такі фактори, як флуктуаційний шум, лінійні спотворення, перехідні перешкоди, що проявляються як міжканальні та міжсимвольні спотворення, імпульсні перешкоди та короткі переривання зв’язку мають найбільший вплив на стійкість модему. Системи OFDM, що використовують орготональні канальні сигнали та багатопозиційну різницеву фазову модуляцію, є реальним способом подолання вищевказаного набору перешкод

Для успішної роботи телекомунікаційної системи в першу чергу необхідно забезпечити якісний контроль параметрів компонентів системи. Отже, фактично ми маємо вирішити задачу за умови апріорної невизначеності.

Згідно зі статистичним трактуванням задачі виявлення вхідних даних, котрі надходять на розв'язуючий пристрій, розглядатимемо як масив вибіркових значень X, що має визначений розподіл імовірностей. Випадковість масиву X зумовлена впливом випадкових завад, а також недосконалістю технічних засобів (похибками вимірювань або перетворень фізичних величин, шумами приймально-підсилюючих пристроїв та ін.) На підставі апріорних відомостей про властивості масиву вибіркових значень X як за відсутності, так і за наявності сигналу, формулюються відповідно досліджувальна та альтернативна статистичні гіпотези (тобто деякі припущення про види розподілів імовірностей X).

В залежності від ступеня конкретизації цих припущень і прийнятого критерію якості вибираються тестова статистика *V(X),* тобто деякий функціонал від вхідних даних, і порогова константа *П.* Рішення приймається шляхом порівняння значення *V(X),* отриманого по даним конкретної реалізації масиву *X* з пороговою константою *П.* Якщо $V(X) \geq \Pi$, то приймається рішення на користь альтернативної гіпотези, тобто про наявність сигналу, у протилежному випадку - на користь припущеної гіпотези - про відсутність сигналу. Таким чином, розв'язуючий пристій повинен містити обчислювач тестової статистики *V(X)* і пороговий пристрій.

Результат роботи розв'язуючого пристрою можна розглядати як оцінку $\vec{\nu}$ - формального параметра ситуації ν , який дорівнює 0 при відсутності сигналу, і рівного 1 - при його наявності. Через присутність випадкових завад значення параметра $\vec{\nu}$ не завжди співпадає з дійсним значенням ν , а лише з деякою ймовірністю, яка при $\vec{\nu}$ =1 і ν =1 називається ймовірністю правильного визначення *D*, а при $\vec{\nu}$ =1 і ν =0 – ймовірністю хибної тривоги *a*. Параметри *D* і *a* характеризують якість роботи розв'язуючого пристрою, яка тим вища, чим менше значення *a* і більше *D*.

Як відомо, оптимальний демодулятор за критерієм Неймана-Пірсона максимізує ймовірність правильного прийому *D*, коли задано ймовірність хибної тривоги *a*. Значення *D* та *a* залежить від виду статистики *V(x)*. Можливість оптимального вибору *V(x)* визначається повнотою і достовірністю апріорної інформації про властивості розподілів масиву вибіркових значень *X*.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є виявлення шляхів оптимізації прийому багатопозиційних сигналів на фоні завад в умовах апріорної невизначеності.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- досліджено проблеми на різних етапах обробки виявлення сигналу на фоні завад,
- проведено аналіз методів статистичної обробки та представлено рішення задач виявлення сигналів в умовах апріорної невизначеності,
- розроблено алгоритм виявлення сигналів на фоні завад.

4.Аналіз властивостей рангових алгоритмів багатопозиційних сигналів OFDM

Формально процедуру обчислення рангу можна представити у вигляді:

$$R_i = \sum_{k=1}^{n} \operatorname{sgn}(x_i - x_k)\,. \tag{1}$$

Незалежно від конкретного закону розподілу вихідної вибірки $\{x_1,...,x_n\}$ спільний розподіл рангів $\{R_1,...,R_n\}$ є рівномірним:

$$P(R_1,...,R_n) = \frac{1}{n!}\,. \tag{2}$$

До визначення рангів (1) можна прийти 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. При апріорі відомому спільному розподілі вхідних вибіркових значень $\{x_1,\ ...,\ x_n\}$ зазначеній вимозі задовольняє нелінійне перетворення виду

$$z_i = F_i\left(x_i \,/\, x_1,\ ...,\ x_{i-1};\ \nu = 0\right), \tag{3}$$

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

Якщо розподіл вибірки збігається з правою частиною виразу (3), коли відсутній сигнал, то розподіл перетворених вибіркових значень $\{z_1, \ldots, z_n\}$ є рівномірним у гіперкубі з одиничним ребром:

$$f_z(z_1, \ldots, z_n) = \begin{cases} 1, & z_i \in [0, 1], \; i = \overline{1, n}; \\ 0, & z_i \overline{\in} [0, 1], \; i = \overline{1, n}. \end{cases} \tag{4}$$

Оскільки для неперервних розподілів перетворення (3) зворотне, то воно не пов'язано з втратами інформації. Отже, результат оптимальної обробки перетвореної вибірки *Z* тотожно збігається з відношенням правдоподібності вихідної вибірки *X*, тобто $U(Z) = U(SX) = \lambda(X)$

Відмінність лише в тому, що $\lambda(X)$ визначають у два етапи: на першому етапі обчислюють перетворення (3), на другому - перетворення $U(Z) = \lambda(S^{-1}Z)$. Труднощі виконання такого інваріантного перетворення полягають в наступному: в умовах непараметричної апріорної невизначеності вид розподілу завади невідомий. У такому разі можемо замінити у перетворенні (3) точне значення розподілу $F_i(\bullet/\bullet)$ його оцінкою $\hat{F}_i(\bullet/\bullet)$. Якщо оцінка можлива, то таке наближене перетворення, принаймні, асимптотично має ті ж інваріантні властивості з такою ж завадостійкістю, що і точне перетворення (3). Але для його здійснення вид розподілу завади знати не обов'язково.

У даний час немає досить ефективних і прийнятних методів прямої оцінки багатомірного розподілу. У зв'язку з цим доцільна така організація вхідної вибірки, при якій її елементи статистично незалежні. У цьому випадку перетворення (3) приймає вид

$$z_i = F_i(x_i / \nu = 0), \tag{5}$$

де в правій частині є одномірна інтегральна функція розподілу *i-го* елемента вибірки при відсутності сигналу.

Якщо функція розподілу $F_i(x_i / \nu = 0)$ не залежить від номера *i* вибіркового значення (вибірка статистично однорідна), то її оцінкою є так званий емпіричний розподіл

$$\vec{F}(x / \nu = 0) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \operatorname{sgn}(x - x_k), \tag{6}$$

який аналогічний відомому в радіотехніці статистично середньому часу перебування процесу під порогом *x*. Підстановка виразу (6) у формулу (5) приводить до інваріантного перетворення

$$z_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \operatorname{sgn}(x_i - x_k),$$

яке з точністю до константи збігається з визначенням рангу (1). Тому можемо зробити висновок, що при $n \to \infty$ і відсутності сигналу, ранжування асимптотично еквівалентно перетворенню (5). Звідси випливають всі основні властивості рангів і рангових статистик.

Ранжування має інваріантні властивості, подібні до властивостей перетворення (5): ранги, обчислені за вибіркою з довільним неперервним розподілом, що задовольняє рівності (1), розподілені по рівномірному закону (2). Варто зазначити, що розподіл (2) справедливий при будь-якому обсязі вибірки *n,* тобто похибка оцінювання функції розподілу за значенням *n* не впливає на інваріантні властивості рангів. Потім, з асимптотичної еквівалентності рангів і перетворення (5) випливає, що при великих обсягах вибірки можна наближено вважати

$$R_i \approx nF(x_i / \nu = 0), \tag{7}$$

причому точність (7) росте зі збільшенням *n*.

Якщо вид розподілу вхідної вибірки відомий, то вираз (7) можна перетворити:

$$x_i \approx F^{-1}\left(\frac{R_i}{n} / \nu = 0\right), \tag{8}$$

де $F^{-1}(x/\nu) = 0$ - функція, обернена до інтегральної функції розподілу $F(x/\nu) = 0$.

Отже, при збільшенні *n* втрати інформації за рахунок ранжування асимптотично зменшуються і у межах вхідну вибірку можна відновити.

Розглянемо цю властивість рангів на прикладі гармонійного сигналу з випадковою початковою фазою

$$s(t) = A\cos(\omega_0 t + \xi), \tag{9}$$

де *A* - амплітуда сигналу; ω_0 і ξ - відповідно його частота і початкова фаза.

Нехай сигнал *s(t)* проходить через пристрій ранжування, що обчислює значення

$$R(t_i) = \sum_{k=1}^{n} \operatorname{sgn}[s(t_i) - s(t_k)].$$

Даний вираз зручно представити в симетричному вигляді

$$R(t_i) = \frac{n+1}{2} + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n} sign[s(t_i) - s(t_k)], \tag{10}$$

де знакова функція

$$sign(z) = \begin{cases} 1, & z > 0; \\ 0, & z = 0; \\ -1, & z < 0. \end{cases} \tag{11}$$

Підставляючи вираз (9) у формулу (10), після елементарних тригонометричних перетворень одержуємо

$$R(t_i) = \frac{n+1}{2} + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n} sign\left\{\sin\left[\frac{\omega_0(t_i + t_k)}{2} + \xi\right]\sin\left[\frac{\omega_0(t_i - t_k)}{2}\right]\right\}.$$

Враховуючи, що знакова функція добутку двох величин дорівнює добутку знакових функцій цих величин, а також використовуючи розкладання функції *sign(sin x)* у ряд Фур'є:

$$sign(\sin x) = \frac{4}{\pi}\sum_{p=1}^{\infty} \frac{\sin[(2p-1)x]}{(2p-1)}, \tag{12}$$

одержуємо вираз

$$R(t_i) = \frac{n+1}{2} + \frac{4}{\pi^2}\sum_{p}^{\infty}\sum_{i=1} \frac{1}{(2p-1)(2l-1)} \times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{k=1}^{n} \cos\left[\frac{(\omega_p + \omega_l)t_i + (\omega_p - \omega_l)t_k}{2} + \xi_p\right] - \\ &- \cos\left[\frac{(\omega_p - \omega_l)t_i + (\omega_p + \omega_l)t_k}{2} + \xi_p\right] \end{aligned} \right\},$$

де $\omega_p = (2p-1)\omega_0$; $\xi_p = (2p-1)\xi$.

При великих значеннях *n,* сума у фігурних дужках приблизно дорівнює $n\delta_{pl}\cos[(2p-1)(\omega_0 t_i + \xi)]$, де символ Кронекера

$$\delta_{pl} = \begin{cases} 1, & p = l; \\ 0, & p \neq l. \end{cases} \tag{13}$$

З урахуванням цього виразу маємо

$$R(t_i) \approx n\left\{\frac{1}{2} + \frac{4}{\pi^2}\sum_{p=1}^{\infty}\frac{\cos[(2p-1)(\omega_0 t_i + \xi)]}{(2p-1)^2}\right\},$$

або після підсумку за індексом p

$$R(t_i) \approx n\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\arcsin[\cos(\omega_0 t_i + \xi)]\right\}. \qquad (14)$$

Права частина виразу (14) - це добре відома в радіотехніці пилкоподібна функція, частота і фаза якої збігаються з частотою і фазою вхідного сигналу. Амплітуда сигналу (14) не залежить від амплітуди сигналу на вході. Подібною властивістю володіє, як відомо, і жорстке обмеження. Але на відміну від жорсткого обмеження, ранжування краще передає характер зміни сигналу.

Проаналізуємо відновлення вхідного сигналу на основі відношення (8). Для цього запишемо інтегральну функцію розподілу гармонійного сигналу з випадковою, рівномірно розподіленою на інтервалі $[0,\ 2\pi]$ початковою фазою:

$$y = F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\arcsin(x/A). \qquad (15)$$

Після перетворення,

$$x = F^{-1}(y) = A\sin\left[\pi\left(y - \frac{1}{2}\right)\right]. \qquad (16)$$

Підставляючи в цей вираз замість довільного аргументу y нормоване - n значення рангу (14), одержуємо $F^{-1}\left(\frac{1}{n}R(t_i) \approx A\cos(\omega_0 t_i + \xi)\right)$, що співпадає з гармонійним сигналом з випадковою початковою фазою (9).

Розглянемо приклад ранжурування сигналу. Нелінійне перетворення рангів виконано за законом

$$x = \Phi^{-1}(R(t_i)/n), \qquad (17)$$

де $\Phi^{-1}(x)$ - функція, обернена до інтегральної функції нормального розподілу

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-z^2/2}dz. \qquad (18)$$

Високий ступінь співпадання між вхідним і перетвореним сигналами. Відмінність полягає лише в тому, що після ранжування і зворотного перетворення (17) відбулося центрування і нормування по дисперсії вихідного сигналу. Остання обставина є наслідком того, що процес на виході нелінійного перетворювача рангів має однаковий розподіл і параметри, як і закладені в характеристику перетворювача. Так, процес до ранжування мав нормальний розподіл з математичним очікуванням $a \neq 0$ і дисперсією $\sigma^2 \neq 1$, а перетворення (17) відповідає нормальному закону зі стандартними параметрами $a = 0$, $\sigma^2 = 1$. При необхідності вихідні параметри a і σ^2 можна відновити, але звичайно зручніше працювати із сигналом, що має стандартні характеристики.

Аналізуючи приклади, можна зробити висновок, що крім подібності між процедурами ранжування і нелінійного перетворення (5), мають місце і відмінності.

Розподіл рангів інваріантний до виду вихідного розподілу лише за умови, якщо елементи рангованих вибірок статистично однорідні. У всіх випадках елементи вибірок приймаємо статистично незалежними, тобто їхній розподіл не залежить від номера елемента. Для перетворення виразу (5) це не має значення.

Характеристика нелінійного перетворення (5) відповідає інтегральній функції розподілу завади, а ранжування по алгоритму (1) еквівалентно фактичному розподілу вибірки, що у залежності від ситуації може бути розподілом завади або суміші сигналу з завадою.

Ці відмінності накладають обмеження на область застосування рангових процедур у порівнянні з оптимальним інваріантним перетворенням (5). Насамперед необхідно, щоб при відсутності сигналу рангована вибірка була статистично однорідна. Це забезпечує стабілізацію рівня помилкових тривог при апріорі невідомого розподілу завади. Але не менш важливо, щоб поява сигналу дестабілізувала однорідність вибірки. У противному випадку в результаті ранжування буде загублено відмінність між ситуаціями $\nu = 0$ і $\nu = 1$.

Таким чином, незважаючи на скорочення числа інформативних відліків, чутливість розподілу рангів при наявності сигналу не тільки не зменшилася, а навіть збільшилася, що є суттєвим принципом для організації процедури виявлення сигналу на основі рангів.

Нехай крім досліджуваних сигнальних відліків $X : \{x_1, ..., x_n\}$ є деякі додаткові відліки $Y : \{y_1, ..., y_n\}$, які відповідають «чистій» заваді. Тоді розподіл завади можна оцінити по цій додатковій вибірці (опорна або «завадова» вибіркою). Відповідно замість алгоритму оцінки фактичного розподілу вибірки (6) одержимо алгоритм оцінки розподілу завади

$$\hat{F}(x / \nu = 0) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{m} \operatorname{sgn}(x - y_k) .$$

Підставивши цей вираз у перетворення (6), одержимо визначення рангів, що відрізняється від виразу (1):

$$R_i = \sum_{k=1}^{m} \operatorname{sgn}(x_i - y_k). \tag{19}$$

Очевидно, що при такому визначенні рангів будь-яка зміна розподілу вибірки *X* у порівнянні з вибіркою *Y* приводить до відхилення розподілу рангів від рівномірного, навіть якщо всередині кожної вибірки елементи будуть статистично однорідні. У даному випадку ознакою наявності сигналу є відхилення від однорідності сумарної вибірки, що складається з вибірок *X* и *Y*. Алгоритм (19) - це алгоритм ранжування по загальній опорній вибірці, а алгоритм (1) - ранжування без опорної вибірки.

Часто використовують визначення рангу, котре представляє собою суму виразів (1) і (19):

$$R_i = \sum_{i=1}^{n} \operatorname{sgn}(x_i - x_l) + \sum_{k=1}^{m} \operatorname{sgn}(x_i - y_k) , \tag{20}$$

- це алгоритм ранжування складової вибірки $\{x_1, ..., x_n, y_1, ..., y_m\}$. Основною перевагою (20) порівняно з алгоритмом (19) є збереження інформації про відповідність рівнів між сигнальними відліками, що має особливе значення при визначенні виміру параметрів сигналу.

При аналізі вважали, що масиви вибіркових значень *X* и *Y* одномірні, тобто їх можна описати відповідними векторами. На практиці структура цих масивів може бути набагато складнішою. Відповідно з'являється і більше варіантів для ранжування. Наприклад, якщо опорний масив двомірний, тобто утворює матрицю $\|y_{ik}\| \left(i = \overline{1,\ n};\ k = \overline{1, m}\right)$, то крім розглянутих варіантів з'являється можливість ранжування кожного елемента досліджуваної вибірки по індивідуальній опорній вибірці:

$$R_i = \sum_{k=1}^{m} \operatorname{sgn}(x_i - y_k). \tag{21}$$

Алгоритм (21) найбільш близький аналогу нелінійного перетворення (5), котре використовують у тих випадках, коли випробувана вибірка статистично неоднорідна як при наявності, так і при відсутності сигналу.

Отже, аналіз усіх специфічних особливостей: властивостей сигналів і завад, необхідність стабілізації помилкових тривог, забезпечення найкращої ефективності виявлення сигналу, можливості виміру параметрів сигналу, приводить до різних визначень рангу. Причому, розглянуті вище вирази (1), (2) - (21) далеко не вичерпують усіх можливих варіантів.

Гнучкість процедури ранжування забезпечує можливість вирішення широкого кола задач виявлення сигналів в умовах непараметричної апріорної невизначеності. Унікальною особливістю рангів у порівнянні з непараметричними перетвореннями інших типів є також можливість практично повного відновлення вихідної інформації. Тому можна зробити висновок: рішення задачі мініміізації помилкових тривог за допомогою ранжування, досягається висока ефективність виявлення сигналу. Ранги за своєю суттю є дискретними величинами, що приймають до того ж цілочисельні значення. Тому для їх обчислення вимагаються найпростіші операції типу порівняння і підсумовування.

5. Формування вибіркових масивів даних і алгоритми їх ранжування для багатопозиційних сигналів із фазорізницевою модуляцією високої кратності

Існує деяка неоднозначність у визначенні рангів, тому вибір способу ранжування в значній мірі залежить від прийнятої процедури формування вибіркових масивів, що містять досліджувану (“сигнальну”) X і опорну (“завадову”) Y вибірки. У зв'язку з цим синтез рангових виявників спочатку зводиться до організації масивів X та Y. Вибір процедури формування досліджуваного і опорного масивів проводиться евристично.

Звичайно елементи вибіркових масивів представляють відліки напруг на виході фізичних пристроїв обробки інформації (датчиків сигналів, просторово-часових фільтрів і ін.). Якщо вихідні напруги неперервні за часом, то перший етап формування досліджуваних вибірок складається з дискретизації цих напруг по відповідній координаті з деяким кроком Δ . Значення Δ вибирають з урахуванням наступних умов:

- повинні виконуватися відомі умови однозначного представлення неперервних сигналів дискретними відліками, за теоремою Котельникова;
- значення Δ повинно перевищувати інтервал залежності $\Delta_З$ завади по відповідній координаті.

Для завад, розподілених за нормальним законом, інтервал залежності завади співпадає з інтервалом кореляції Δ_k . У загальному випадку визначення $\Delta_З$ складно знайти. Тому практично завжди приймають $\Delta_З \approx \Delta_k$. У деяких випадках Δ_k перевищує $\Delta_З$, що приводить до похибок в установці рівня помилкових тривог і зниження ефективності виявлення.

Сформована в такий спосіб сукупність дискретних відліків утворює множину W, котра і є вихідною для формування усіх вибіркових масивів, що піддаються ранговій обробці. Загальний обсяг вибіркових масивів визначається діапазоном можливих значень інформаційних параметрів сигналу (час запізнювання, допплеровський зсув частоти, напрямок надходження) і кількістю просторових точок прийому.

З множини W необхідно виділити досліджувану вибірку відліків $X \subset W$, що формується для кожної групи розрізнення по інформативних параметрах сигналу.

Розглянемо приклад. Нехай потрібно знайти монохроматичний радіоімпульс

$$s(t)=\begin{cases} A\cos\omega_0 t, & t\in[\tau,\ \tau+T]; \\ 0 & t \overline{\in} [\tau,\ \tau+T], \end{cases} \tag{22}$$

де T - тривалість імпульсу; τ - невідомий момент приходу імпульсу.

У даному випадку множина *W* складається з усіх відліків вхідної напруги $u(t)$, отриманих на інтервалі спостереження $[0, T_н]$, де $T_н = T + \tau_{max}$; τ_{max} - максимально можливе значення τ.

Досліджувана вибірка *X* для групи розрізнення, котра відповідає припущенню про те, що запізнювання сигналу дорівнює τ_0, то відліки напруги - $u(t)$, отримані на інтервалі $[\tau_0, \tau_0 + T]$.

Таким чином, склад досліджуваної вибірки цілком визначається структурою виявника, видом і параметрами прийнятого сигналу і не залежить від того, які алгоритми обробки надалі застосовуються. Специфічними для рангових процедур є наступні формування досліджуваних масивів.

Після того як визначений склад вибірки *X*, то необхідно проаналізувати її властивості при відсутності сигналу. Якщо розподіл елементів масиву *X* у розглянутій ситуації збігається, тобто вибірка *X* статистично однорідна, то ранжування всіх її елементів виконується однаковим способом. Так, у розглянутому прикладі умовою однорідності масиву *X* є квазістаціонарність завади на інтервалі $[\tau, \tau + T]$.

Якщо при відсутності сигналу масив *X* статистично неоднорідний, то його необхідно розбити на блоки $X_1, ..., X_N$, щоб у *i-й* блок $X_i \subset X\left(i = \overline{l, N}\right)$ входили тільки статистично однорідні елементи. При цьому розподілу блоки $X_1, ..., X_N$ можуть відрізнятися один від одного. Наприклад, для виявлення розглянутого вище сигналу використовується група прийомних елементів, розташованих у *M* точках простору з координатами $\bar{r}_1, ..., \bar{r}_m$. Тоді випробуваний масив *X* складається з відліків напруг $u(t, r_i)\left(i = \overline{l, M}\right)$, узятих на інтервалі $[\tau_0, \tau_0 + T]$ у всіх точках прийому. Така структура масиву *X* визначається конструктивними особливостями виявника і властивостями сигналу. Якщо точки прийому рознесені на значні відстані, то властивості завад у них можуть істотно відрізнятися, що приводить до загальної неоднорідності масиву *X*. Це неважко усунути, якщо розбити *X* на блоки таким чином, щоб у *i-й* блок ввійшли відліки напруг $u(t, \bar{r}_i)$, які відносяться тільки до *i*-ї точки прийому.

У загальному випадку масив *X* необхідно доповнити опорним масивом *Y*, що спвпадає по своїх властивостях із властивостями масиву *X* при відсутності сигналу. Якщо досліджуваний масив розбитий на статистичні однорідні блоки, то аналогічну структуру повинний мати і опорний масив. Масив *Y* так само, як і масив *X*, формується з елементів множини *W*, однак на відміну від *X*, масив *Y* може мати елементи, що відносяться до різних груп розрізнення. При організації масиву *Y* необхідно прагнути до виконання наступних умов: максимально точної відповідності статистичних властивостей масивів *X* і *Y;* обсяг масиву *Y* повинний бути достатнім для забезпечення високої якості виявлення при заданому рівні помилкових тривог. Після ранжування масивів *X* та *Y* повинна зберігатися інформація про ті параметри сигналу, що використовуються для рішення задач виміру, класифікації і т.п. Для виконання цих умов необхідно в максимальному ступені враховувати конструктивні особливості системи і властивості завади.

Розглянемо формування опорної вибірки для приведеного прикладу виявлення тонального радіоімпульсу групою прийомних елементів. Нехай перехід від вхідних даних до рангів утворюється безпосередньо на виході прийомних елементів. Тоді, масив *W* утворюється сукупністю дискретних відліків $u(k\Delta t, \bar{r}_i)$, де *k* змінюється від *0* до $ent\left[\frac{T_н}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right]$, Δt - інтервал квантування за часом; *ent [•]* - символ цілої частини числа.

Припустимо, що розміщення прийомних елементів забезпечує виконання умови незалежності завади в різних точках прийому, а інтервал квантування перевищує інтервал кореляції завади за часом. Тоді для *l-ї* альтернативи за часом запізнювання сигналу елементами досліджуваної вибірки будуть відліки

$$x_{ik} = u\left(\left(l+k\right)\Delta t,\ \bar{r}_i\right), \qquad i = \overline{l,\ M}, \qquad k = \overline{l,\ n}, \tag{23}$$

де $n = ent\left[\frac{T}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right]$ - число відліків на інтервалі сигналу.

Якщо завада присутня на всьому інтервалі спостереження $\left[0,\ T_H\right]$ і однорідна у всій області простору, зайнятої прийомними елементами, то до складу опорної вибірки *Y* можна включити весь масив *W*. Обмеження обсягу *Y* пов'язано тільки з чисто технічними можливостями реалізації операції ранжування. При великих обсягах опорної вибірки ефективність рангових виявників практично збігається з потенційно досяжною. Однак завада з такими ідеальними властивостями не зустрічається. У кращому випадку можна лише вказати деякі межі за часом і простором, у яких властивості завади однорідні. Тоді опорна вибірка формується у цих межах (якщо технічні можливості дозволяють ранжувати відповідні обсяги даних). Зокрема, опорний масив *Y* може тотожно збігатися з *X* чи займати часовий інтервал, що відрізняється від інтервалу сигналу в меншу чи більшу сторону. Це відноситься і до просторової координати.

Якщо, як і в наведеному раніше прикладі, через значну відстань точок прийому властивості завад на виходах прийомних елементів помітно відрізняються, то опорний масив варто формувати окремо для кожної точки прийому часових відліків відповідного давача. У цьому випадку після ранжування втрачається частина інформації про співвідношення рівнів сигналу в різних точках прийому, що має значення для рішення задач виміру параметрів сигналу.

Однією з важливих задач, пов'язаних з ранговою обробкою інформації, є питання про місце переходу від вхідних даних до рангів. Аналіз показує, що процедуру ранжування можна проводити практично на будь-якому етапі обробки і кожний з відповідних методів ранжування має свої переваги і недоліки. Усі методи ранжування можна розбити на дві групи.

Ранжування до детектора. У цьому методі перехід від вхідних даних до рангів проводиться в лінійній частині виявника. Особливість цього методу ранжування полягає в тому, що обсяги ранжованих вибірок великі (порядку декількох сотень), тому повною мірою *виявляються асимптотичні властивості рангів*, зокрема, можливість *наближеного відновлення вихідної інформації*. Завдяки цій обставині рангові додетекторні виявники володіють високою завадостійкістю, близькою до потенційно досяжної. Проте рангові алгоритми цієї групи мають і недоліки: технічна реалізація процедури ранжування у високочастотних ланцюгах виявників сигналів є досить складною, а в деяких випадках і нерозв'язною задачею.

Ранжування після детектора. За цим методом ранжування здійснюється в низькочастотній частині виявника після детектування сигналу, внаслідок чого технічне здійснення цієї операції істотно спрощується. Особливістю даного методу є те, що більша частина процедур первинної обробки є такою ж, як і в традиційних системах. Це, з одного боку, відкриває можливість модернізації вже існуючих систем шляхом введення до них нескладних пристроїв рангової обробки без корінної перебудови їхньої структури; з іншого боку - забезпечується універсалізація самого пристрою рангової обробки, тому що специфіка конкретних сигналів і завад враховується традиційною обробкою, а самі рангові процедури післядетекторного виявлення досить однотипні. Недолік даного методу ранжування - малі обсяги ранжованих вибірок (порядку декількох десятків), що знижує ефективність виявлення порівняно з потенційно досяжними результатами. Ці втрати завадостійкості особливо відчутні в області малих рівнів помилкових тривог (10^{-5} і нижче).

Вибір місця переходу від вибіркових даних до рангів, складу досліджуваних і опорних вибірок цілком визначає алгоритм ранжування. Розходження між алгоритмами ранжування можна сформулювати відношенням між масивами *X* та *Y*. Так, при $X = Y$ маємо алгоритм ранжування без опорних вибірок (1), якщо $X \cap Y = \varnothing$, тобто не перетинаються множини *X* та *Y*, то маємо алгоритм ранжування по опорних вибірках (8), якщо ж $X \subset Y$, а доповнення множини *Y* по *X* немає, тобто $Y / X \neq \varnothing$, то одержуємо алгоритм ранжування вибірки (9) і т.д. Крім зазначених алгоритмів ранжування, можливі і проміжні, що допускають різний ступінь перекриття множин *X* та *Y*. Після того, як визначені способи формування і ранжування вибіркових масивів, необхідно вибрати спосіб обробки рангів, котрі залежать від їхніх статистичних характеристик (розподілів, моментів і т.д.).

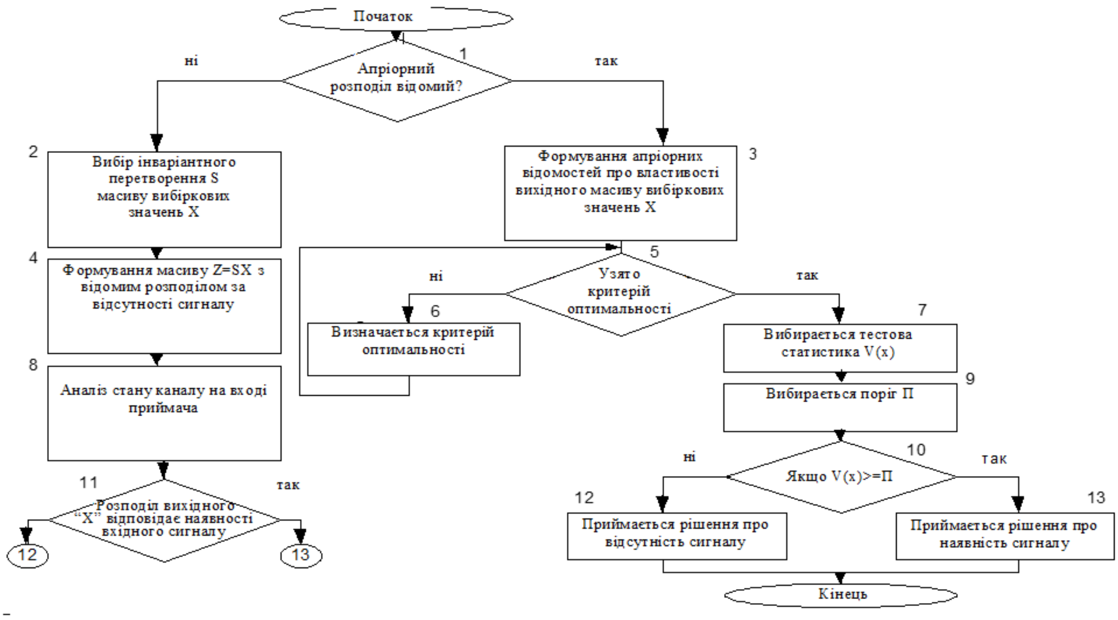

Рис.1. Алгоритми виявлення багатопозиційних сигналів OFDM на фоні завад

6. Висновки

Досліджено рішення проблеми використання ранжування для мінімізації помилкових спрацьовувань. Проаналізовано унікальні характеристики рангу порівняно з іншими типами непараметричних перетворень. Критерієм вибору є не тільки задана інваріантна властивість неправдоподібного рівня тривоги досліджуваного типу розподілу, але й максимально можливе збереження інформації про сигнал, що забезпечує майже повне відновлення вихідної інформації, тобто висока ефективність виявлення сигналу. Ще одна перевага полягає в тому, що ранги за своєю суттю є дискретними значеннями, які приймають цілі значення, тому їх обчислення вимагає найпростіших операцій, таких як порівняння та підсумовування.

Розроблено алгоритм оптимального прийому багатопозиційних сигналів у контексті перешкод з використанням рангового підходу в умовах попередньої невизначеності.

Список використаної літератури

1. Кривуца В.Г., Беркман Л.Н., Колобов О.С., Олійник В.В. Підходи до методів розрахунку параметрів систем управління мережами майбутнього - FGN // 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. Варфоломеєва, 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 фазорізницевої модуляції високого порядку // Зв'язок. – 2016. - №4(122).- С.3-7.

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

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

7. Варфоломеєва О. Г., Колобов С.О., Олійник В.В. Деякі підходи до вирішення завдання відновлення функціонування телекомунікаційної мережі // “Радиотехника” Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник, выпуск 163. - Харьков: ХНУРЭ.-2010. - , С.20 - 25.

8. 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.

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

10. Shevchenko O., Bondarchuk A., Polonevych O., Zhurakovskyi B., Korshun, N. Methods of the objects identification and recognition research in the networks with the IoT concept support / CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2923, p. 277–282

References

1. Kryvutsa V.G., Berkman L.N., Kolobov O.S., Oliynyk V.V. Approaches to methods of calculating the parameters of future network management systems - FGN // Communication. - 2009, No. 4(88). - P.2 - 5.

2. Kryvutsa V.G., Berkman L.N., Oliynyk V.V. Research of methods of optimization of information communication networks in critical situations// Communication. - 2010, No. 4(92). - P. 2 - 5.

3. Optimal reception of multi-position signals based on rank methods / O.G. Varfolomeeva, B.Yu. Zhurakovsky, O.V. Hladkykh, O.A. Khakhlyuk // Visnyk DUIKT.–2012. - Volume 10, No. 4. - with. 108 - 110.

4. Tolubko V.B., Berkman L.N., Kozelkov S.V., Formation of a multi-position signal of 5G technologies based on high-order phase difference modulation // Communication. – 2016. - No. 4(122).-P.3-7.

5. Tolubko V.B., Berkman L.N., Kozelkov S.V., Horokhovskyi E.P. Phase-difference modulation of high orders to ensure the specified immunity of information transmission channels of mobile networks of the 5th generation // Telecommunications and information technologies. – 2017. - No. 1(54).-P.5-10.

6. Optimal demodulator for incoherent reception of signals with phase difference modulation of the second order / V.B. Tolubko, L.N. Berkman, N.V. Korshun, O.A Khakhlyuk // Scientific notes of UNDIZ - 2017. No. 4(48). - pp. 5–11.

7. Varfolomeeva O.G., Kolobov S.O., Oliynyk V.V. Some approaches to solving the task of restoring the functioning of the telecommunications network // "Радиотехника" All-Ukrainian interdepartmental scientific-technical collection, issue 163. - Kharkiv: KhNURE.-2010. - , p. 20 - 25.

8. Kryvutsa V.G., Berkman L.N., Oliynyk V.V. Research of methods of optimization of information communication networks in critical situations// Communication. - 2010, No. 4(92). - P. 2 - 5.

9. Kryvutsa V.G., Berkman L.N., Kolobov O.S., Oliynyk V.V. Approaches to methods of calculating the parameters of future network management systems - FGN // Communication. - 2009, No. 4(88). - P.2 - 5.

10. Shevchenko O., Bondarchuk A., Polonevych O., Zhurakovskyi B., Korshun, N. Methods of the objects identification and recognition research in the networks with the IoT concept support / CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2923, p. 277–282