

Ткаленко О.М., Миколайчук В.Р., Савчук В.С., Буханчук Б.В.

Державний університет телекомунікацій, Київ

ОПТИМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ З НЕВІДОМОЮ АМПЛІТУДОЮ У НЕКОРРЕЛЬОВАНОМУ ШУМІ

Анотація. Розглянуто основні джерела шумів і перешкод, особливості виявлення сигналів у шумах, методи боротьби з ними при передачі на різні відстані. У ряді завдань прийому сигналів за наявності шуму не можна обмежуватися таким загальним критерієм, як відношення сигнал/шум. Виникає потреба у використанні більш тонких статистичних властивостей процесів, які дають змогу кількісно оцінити достовірність даних. Шуми становлять важливу проблему в науці та техніці, оскільки вони визначають нижні межі як по відношенню до точності будь-яких вимірювань, так і по відношенню до величини сигналів, які можуть бути оброблені електронними засобами. Ситуація в роботі будь-якої інформаційної системи така, що на її вхід надходить спотворений випадковими перешкодами сигнал, в якому закодована деяка інформація, значення параметрів, реалізації процесу. Ця інформація та параметри, у свою чергу, є випадковими. Інформаційна система містить приймач сигналів - носіїв інформації, в яких здійснюються необхідні для вилучення інформації перетворення. Після них відбувається обробка інформації, призначеної для забезпечення виконання системою своїх функцій. Визначено адаптивне виявлення сигналів у шумі з використанням оптимального алгоритму виявлення для процедур аналізу. Запропоновано алгоритм виявлення сигналу з невідомою амплітудою в некорельованому шумі. Побудовано ймовірнісні характеристики виявлення сигналу з невідомою амплітудою в шумі. Були знайдені відповідні алгоритми виявлення як при дискретному спостереженні, так і при переході на безперервне спостереження сигналів. Також будують ймовірнісні характеристики виявлення, порівнюючи їх з випадками відомих параметрів сигналів і шумів, коли оптимальні алгоритми не є адаптивними.

Ключові слова: сигнал/шум, завада, алгоритм, величина, технічна система, адаптивний прийом, частота, вито пара.

Tkalenko O.M., Mykolaichuk V.R., Savchuk V.S., Bukhanchuk B.V.

State University of Telecommunications, Kyiv

OPTIMAL ALGORITHM FOR DETECTION OF SIGNAL WITH UNKNOWN AMPLITUDE IN UNCORRELATED NOISE

Abstract. The main sources of noise and interference, features of detecting signals in noise, methods of combating them during transmission over various distances are considered. In a number of tasks of receiving signals in the presence of noise, one cannot limit oneself to such a general criterion as the signal/noise ratio. There is a need to use finer statistical properties of processes that make it possible to quantitatively assess the reliability of data. Noises represent an important problem in science and technology, as they determine the lower limits both in relation to the accuracy of any measurements and in relation to the magnitude of signals that can be processed by electronic means. The situation in the operation of any information system is that its input receives a signal distorted by random interference, in which some information, parameter values, process implementations are encoded. These information and parameters, in turn, are random. The information system contains a receiver of signals - information carriers, in which the transformations necessary for extracting information are carried out. They are followed by the processing of information intended to ensure the system's performance of its functions. Adaptive detection of signals in noise is determined, while using the optimal detection algorithm for analysis procedures. An algorithm for detecting a signal with an unknown amplitude in uncorrelated noise is proposed. Probabilistic characteristics of signal detection with unknown amplitude in noise are constructed. Appropriate detection algorithms were found both during discrete observation and when switching to continuous observation of signals. Probabilistic detection characteristics are also constructed, comparing them with cases of known parameters of signals and noises, when the optimal algorithms are not adaptive.

Keywords: signal/noise, interference, algorithm, value, technical system, adaptive reception, frequency, twisted pair.

1. Постановка проблеми.

Основними джерелами шумів та завад прийнято вважати: індустриальні завади; наводки від сусідніх кіл; роз'єми низької якості; реактивний опір кабелю та низька якість кабелю; неточне узгодження кабелю з хвильовим опором передавача та приймача; живлення від різних фаз і наявність петель заземлення. Другорядними джерелами шумів є гальванічні та електролітичні процеси, трибоелектричний ефект і вібрації кабелів [1,5]. Пасивні методи боротьби з шумами та завадами полягають у зменшенні довжини кабельних мереж до розумного мінімуму та зменшення кількості кабелів; використанні кабелів та роз'ємів лише високої якості, від відомих фірм-виробників; прокладці кабелів з радіусами великого вигину, щоб уникнути завад від так званого трибоелектричного ефекту (накопичування заряду всередині кабелю); розділенні стволів сигнальних та силових кабелів; використанні узгоджених навантажень; у такому використанні апаратури, щоб її робочі режими були значно нижчими від граничних; у використанні найстійкішого до завад інтерфейсу. Активні методи боротьби з шумами та завадами полягають у використанні проміжних підсилювачів сигналів, які компенсують їх загасання в лінії через омичний опір і втрати на високих частотах через реактивність кабелю; переході на виту пару [3,4]; переході на оптоволоконний кабель за необхідності передавання сигналу на великі відстані. Інженерам доводиться шукати все більш складні та дорогі технічні рішення, щоб забезпечити передавання зображення та звуку на великі відстані без істотної втрати якості.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Закордонні та вітчизняні вчені приділяли багато уваги питанням виявлення сигналів у шумах, законам розподілу як сигналів, так і шумів, реалізації технічних систем, які здійснюють виявлення сигналів. Серед них можна виділити J.Bushberg, T.Stathaki, C.John, R.Jitendra та ін. Природа влаштована так, що фізичні сигнали – носії інформації завжди випадкові через наявність багатьох неврахованих факторів випадкового походження. Ці фактори призводять до появи шумів та завад, з якими взаємодіють корисні сигнали. Самі сигнали при передаванні по різних каналах, що входять до складу інформаційної системи, піддаються випадковим змінам [6-8]. Прикладами таких змін можуть служити флуктуації радіосигналів при розповсюдженні радіохвиль через іонізовані середовища або флуктуації радіолокаційних сигналів в процесі їх розсіювання об'єктами, що здійснюють випадкові рухи навколо центрів мас і випадкові переміщення одних елементів об'єкта відносно інших при нежорстких конструкціях [9,10].

3. Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є визначення адаптивного виявлення сигналів в шумах, знайшовши при цьому оптимальні алгоритми виявлення для процедур аналізу, виявлення сигналу з невідомою амплітудою у некоррельованому шумі.

4. Результати дослідження.

Визначимо адаптивне виявлення сигналів в шумах, знайшовши при цьому оптимальні алгоритми виявлення для процедур аналізу. Застосування цих процедур в разі перевірки двухальтернативних гіпотез призводить до складання на n -му кроці відношення правдоподібності і до порівняння його з відповідними порогами:

$$(X_n | a_1^*, a_2^*) = \frac{P_1(X_n | a_1^*)}{P_2(X_n | a_2^*)} \quad (1)$$

В задачах виявлення $P_1(X_n | a_1^*)$ - щільність ймовірності суміші сигналу і шуму (завади); a_1^* - оцінка максимальної правдоподібності вектора параметрів цієї суміші, отримана на основі спостережень X_n ; $P_2(X_n | a_2^*)$ - щільність ймовірності шуму (завади); a_2^* - оцінка максимальної правдоподібності вектора невідомих параметрів шуму.

Знайдемо відповідні алгоритми виявлення як при дискретному спостереженні, так і при переході до безперервного спостереження сигналів. Побудуємо також ймовірнісні характеристики виявлення, порівнявши їх з випадками відомих параметрів сигналів і шумів, коли оптимальні алгоритми не є адаптивними.

Нехай потрібно виявити наявність сигналу $as(t)$, де $s(t)$ - задана функція часу, і a - невідома амплітуда, при прийомі у гауссовому шумі $\xi(t)$, який при дискретному спостереженні будемо вважати не корельованим з дисперсією σ^2 , а при переході до безперервного спостереження - білим із спектральною щільністю N_0 . Априорні ймовірності наявності і відсутності сигналу позначимо p_1 і p_2 відповідно. Амплітуда a розподілена у широкому діапазоні $a_2 - a_1 = \Delta a$, в якому, як і раніше її можна вважати розподіленою рівномірно. Розглянемо спочатку класичну процедуру аналізу, при якій спостереження здійснюється на інтервалі $0 \leq t \leq T$ або при дискретному спостереженні довжина вибірки $n = T/\Delta t$ задана. Сигнал, який приймається, можна записати у вигляді реалізації:

$$X(t) = \lambda as(t) + \xi(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

або у вигляді вибірки:

$$X_n = \lambda a S_n + \varepsilon_n, \quad (3)$$

де $x_i = x(t_i)$; $s_i = s(t_i)$; $\xi_i = \xi(t_i)$; $\lambda = \lambda_1 = 1$ з ймовірністю p_1 та $\lambda = \lambda_2 = 0$ з ймовірністю p_2 ($p_1 + p_2 = 1$).

Згідно (1) оптимальний детектор повинен утворити відношення правдоподібності:

$$\Lambda(X_n | a^*) = P_1(X_n | a^*) / P_2(X_n), \quad (4)$$

де враховуючи, що функція кореляції шуму $K_\xi(t_i, t_j) = \sigma^2 t \delta_{ij}$,

$$P_1(X_n | a) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp \left[\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \right) (X_n - aS_n)^T (X_n - aS_n) \right],$$

$$P_2(X_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} X_n^T X_n \right). \quad (5)$$

Оцінка максимальної правдоподібності амплітуди a задовольняє рівнянню:

$$\frac{\partial}{\partial a} \ln P_1(X_n | a) = 0 \quad (6)$$

і має вигляд:

$$a^*(X_n) = \frac{X_n^T S_n}{S_n^T S_n} = \frac{1}{E} X_n^T S_n = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n x_i s_i, \quad (7)$$

де прийняте нормування $\sum_{i=1}^n S^2 i = E$.

Відношення правдоподібності приймає вигляд:

$$\Lambda(X_n | a^*) = \exp \left(\frac{1}{\sigma^2} a^* X_n^T S_n - \frac{1}{2\sigma^2} a^{*2} S_n^T S_n \right) = \exp \frac{a^{*2} E}{2\sigma^2} = \exp h^*, \quad (8)$$

де $h^* = a^{*2} E / 2\sigma^2$ - оцінка максимальної правдоподібності відношення сигнал/шум, що визначається відповідно (6) за формулою:

$$h^* = \frac{(X_n^T S_n)^2}{2\sigma^2 E} = \left(\frac{1}{2\sigma^2 E} \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i s_i \right)^2. \quad (9)$$

При переході до безперервного спостереження функціонал відношення правдоподібності $\Lambda[x(t) | a^*]$ виражається як і раніше формулою $\Lambda[x(t) | a^*] = e^{h^*}$, де:

$$h^* = \frac{a^{*2} E_0}{2N_0} = \frac{1}{2N_0 E_0} \left[\int_0^T x(t) s(t) dt \right]^2, \quad E^0 = \int_0^T s(t) dt, \quad (10)$$

і здійснений перехід до межі при $n \rightarrow \infty$, $\Delta t \rightarrow 0$, $n\Delta t = T$, $\sigma^2 \Delta t = N_0$.

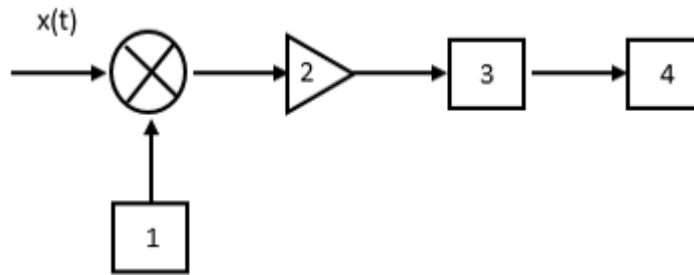


Рис.1. Функціональна схема оптимального детектору сигналу з невідомою амплітудою в шумі

Елементами функціональної схеми рис.1 є: 1 - генератор сигналу $s(t)$; 2 - інтегратор; 3 - квадратор; 4 - і реле.

Таким чином, оцінка відношення сигнал/шум, що визначає в даному випадку алгоритм виявлення, представляє собою відповідним чином нормований результат квадратичного детектування виходу кореляційного приймача. Функціональна схема оптимального детектору сигналу з невідомою амплітудою в шумі представлена на рис.1. Оптимальний детектор повинен порівнювати отримане відношення правдоподібності з порогом $C_{12} = [(g_{21} - g_{22}) / (g_{12} - g_{11})] (p_2 a_2 / p_1 a_1)$, де g_{ij} ($i, j = 1, 2$) - відповідні коефіцієнти втрат; $a_2 = 1$, а

$$a_1 = \omega_1(a^*) \frac{(2\pi)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\frac{E}{\sigma^2}}} = \frac{1}{2\sigma^2 E} = \frac{1}{\Delta a} \sqrt{\frac{2\pi\sigma^2}{E}}, \quad (11)$$

$$D_1 = -\frac{\partial^2 \ln P_1(X_n | a^*)}{\partial a^2} = \frac{E}{\sigma^2}. \quad (12)$$

Звідси поріг:

$$C_{12} = \frac{g_{21} - g_{22}}{g_{12} - g_{11}} \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{(\Delta a)^2 E}{2\sigma^2 \pi}}.$$

Якщо $a_1 = 0$, то

$$C_{12} = \frac{g_{21} - g_{22}}{g_{12} - g_{11}} \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{\pi}}. \quad (13)$$

де Δh - апіорний діапазон зміни відношення сигнал/шум. Останній вираз залишається в силі і при неперервному спостереженні, при якому відношення E/σ^2 всюди замінюється на E_0/N_0 . Функція оптимального адаптивного детектора повинна складатися у зіставленні оцінки відношення сигнал/шум h^* та порівнянні її з порогом $\ln C_{12} = C$. При перевищенні порогу приймається рішення про наявність сигналу. При достатньо великих величинах апіорної ймовірності відсутності сигналу і діапазону зміни відношення сигнал/шум поріг є позитивним і отриманий алгоритм додаткових пояснень не вимагає.

Виключаючи C для різних відношень сигнал/шум h , будемо характеристики виявлення $D(F)$, зображені на рис.2.

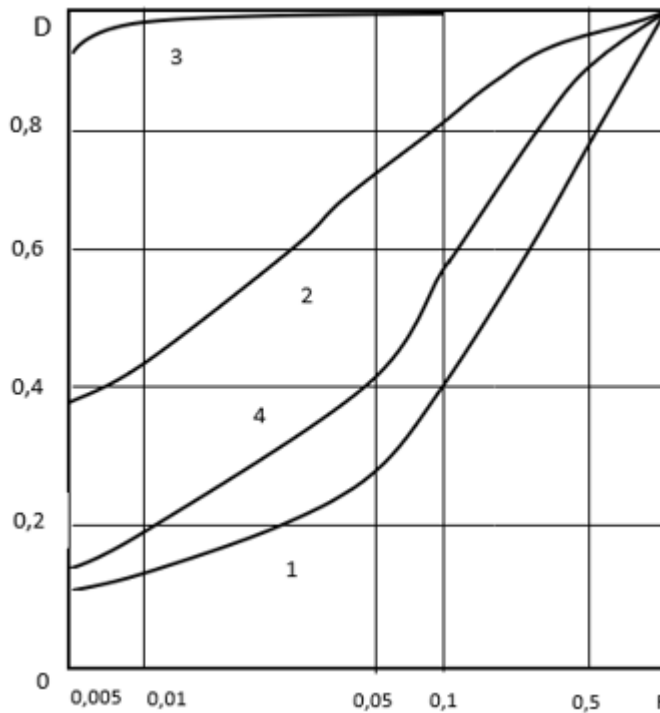


Рис.2. Характеристики виявлення сигналу з невідомою амплітудою в шумі (1) $h=1$; 2) $h=3$; 3) $h=10$; 4) випадок відомої амплітуди сигналу, $h=1$)

Представляє інтерес порівняння отриманих характеристик виявлення з відповідними характеристиками для виявлення при відомій амплітуді сигналу (відомому відношенні сигнал/шум). Такий оптимальний детектор, як відомо, діє у відповідності з алгоритмом, при якому приймається рішення про наявність сигналу, якщо:

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n x_i s_i \geq C \tag{14}$$

або при неперервному спостереженні:

$$\frac{1}{N} \int_0^T x(t)s(t)dt \geq C. \tag{15}$$

Йому відповідають характеристики виявлення:

$$F = \Phi(-C/\sqrt{2h});$$

$$D = \Phi(-C/\sqrt{2h} + \sqrt{2h}). \tag{16}$$

Отримані співвідношення дозволяють без будь-яких додаткових побудов записати алгоритм послідовного аналізу. У зв'язку з тим, що оцінка відношення сигнал/шум $h^*(n)$, яка отримана на n -му кроці спостережень і визначається виразом (9), представляє собою логарифм відношення правдоподібності на цьому кроці, оптимальний алгоритм послідовного аналізу зводиться до наступного. На кожному n -му кроці $h^*(n)$ порівнюється з двома порогоми $C_1(n)$ та $C_2(n)$. Якщо $h^*(n) \leq C_1(n)$, приймається рішення про відсутність сигналу, якщо $h^*(n) \geq C_2(n)$ - рішення про наявність сигналу, якщо ж $C_1(n) < h^*(n) < C_2(n)$ – спостереження продовжуються на $(n+1)$ -му кроці.

Поріг, з яким порівнюється $h^*(n)$, згідно (13) залежить від n тільки у випадку змінних коефіцієнтів $g_{ij}(n)$ і визначається як:

$$C(n) = \ln \left[\frac{g_{21}(n) - g_{22}(n)}{g_{12}(n) - g_{11}(n)} \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{\pi}} \right]. \tag{17}$$

У даному окремому випадку логарифм відношення правдоподібності збігається з оцінкою невідомого параметру обстановки (відношення сигнал/шум).

5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Таким чином, проектування систем передавання сигналів на великі відстані повинне проводитися з урахуванням їх захисту від шумів і завад. Всі можливі джерела завад слід передбачати на етапі проектування і тоді закладати в систему методи та засоби протидії їм. Захищати від впливу шумів та завад вже спроектовані без урахування електромагнітної сумісності системи, як правило, складно, дорого та малоефективно. Пасивні методи боротьби з шумами та завадами, загалом, дешевші, але менш ефективні. Найбільший ефект дають активні методи, що полягають у використанні спеціальних проміжних підсилювачів сигналу, передаванні балансного сигналу по витій парі і переходу на оптоволоконні лінії зв'язку. Знайдені правила прийняття рішень у розглянутій задачі оптимальні не тільки як адаптивні байесові правила, але вони також є мінімаксними.

Список використаної літератури

1. Іващенко П.В. «Основи теорії інформації: навч. Посіб»./ П.В. Іващенко – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. – 53 с.
2. Гумен М. Б. «Основи теорії процесів в інформаційних системах: підручник (у 2-х кн.). Кн.1. Аналіз детермінованих процесів»/М. Б. Гумен, В. М. Співак, С. К. Мещанінов, Г. Г. Власюк, Т. Ф. Гумен. – 2-е вид., зі змінами і доповн. – К: Кафедра, 2017. – 281 с.
3. К.П. Сторчак, О.М. Ткаленко, О.В. Полоневич, К.П. Косенко., В.М. Чорна. «Пошук, обробка та аналіз інформації» Навчальний посібник, ДУТ, Київ-2018. – 127 с.
4. Микитишин А.Г. Комп'ютерні мережі: навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник. – Львів, «Магнолія 2006», 2017. – 256 с.
5. Pianykh V. Ye. Electric and electronic circuit theory. Electric circuits: manual /: В.Ye. Pianykh, E.G. Aznakayev, M.S. Vidnyi. – К.: NAU, 2015. – 244 p.
6. Бодянський Є.В. Аналіз та обробка потоків даних засобами обчислювального інтелекту: монографія / Є.В. Бодянський, Д.Д. Пелешко, О.А. Винокурова, С.В. Машталір, Ю.С. Іванов. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 236 с.
7. Tkalenko O. Модель сигнального трафіку для передавання повідомлень в режимі реального часу / Tkalenko O. - Polish Science Journal (ISSUE 1(22), 2019) – Warsaw: Sp.z o.o. "iScience", 2020. – Pp.27-32.
8. Полоневич О.В., Косенко В.Р., Сторчак К.П., Ткаленко О.М. «Теорія інформаційних процесів та систем». Навчальний посібник, ДУТ, Київ-2018, - 101 с.
9. Іващенко П.В. «Основи теорії інформації: навч. Посіб»./П.В. Іващенко – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. – 53 с.
10. Гумен М.Б. «Основи теорії процесів в інформаційних системах: підручник (у 2-х кн.). Кн.1. Аналіз детермінованих процесів»/М. Б. Гумен, В. М. Співак, С. К. Мещанінов, Г. Г. Власюк, Т. Ф. Гумен. – 2-е вид., зі змінами і доповн. – К: Кафедра, 2017. – 281 с.

References

1. Ivashchenko P.V. "Fundamentals of information theory: teaching. Guide"./ P.V. Ivashchenko – Odesa: ONAZ named after O.S. Popova, 2015. – 53 p.
2. Gumen M. B. "Fundamentals of the theory of processes in information systems: a textbook (in 2 books). Book 1. Analysis of deterministic processes" /M. B. Humen, V. M. Spivak, S. K. Meshchaninov, H. G. Vlasyuk, T. F. Humen. – 2nd ed., with changes and additions. - K: Department, 2017. - 281 p.
3. K.P. Storchak, O.M. Tkalenko, O.V. Polonevich, K.P. Kosenko., V.M. black "Search, processing and analysis of information" Training manual, DUT, Kyiv-2018. - 127 p.

4. Mykytyshyn A.H. Computer networks: textbook for technical specialties of higher educational institutions / A.G. Mykytyshyn, M.M. Mytnyk, P.D. Stuhlyak, V.V. Beekeeper. - Lviv, "Magnolia 2006", 2017. - 256 p.
5. Pianykh B. Ye. Electric and electronic circuit theory. Electric circuits: manual /: B.Ye. Pianykh, E.G. Aznakayev, M.S. Bidnyi. - K.: NAU, 2015. - 244 p.
6. Bodyanskyi E.V. Analysis and processing of data flows by means of computational intelligence: monograph / E.V. Bodyanskyi, D.D. Peleshko, O.A. Vynokurova, S.V. Mashtalir, Yu.S. Ivanov. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. – 236 p.
7. Tkalenko O. Signal traffic model for real-time message transmission / Tkalenko O. - Polish Science Journal (ISSUE 1(22), 2019) - Warsaw: Sp.z o.o. "iScience", 2020. - Pp.27-32.
8. Polonevych O.V., Kosenko V.R., Storchak K.P., Tkalenko O.M. "Theory of information processes and systems". Study guide, DUT, Kyiv-2018, - 101 p.
9. Ivashchenko P.V. "Fundamentals of information theory: teaching. Guide" /P.V. Ivashchenko – Odesa: ONAZ named after O.S. Popova, 2015. – 53 p.
10. Humen M.B. "Fundamentals of the theory of processes in information systems: a textbook (in 2 volumes). Book 1. Analysis of deterministic processes" /M. B. Humen, V. M. Spivak, S. K. Meshchaninov, H. G. Vlasyuk, T. F. Humen. – 2nd ed., with changes and additions. - K: Department, 2017. - 281 p.