

УДК 621.37:621.39

МОЖАЄВ О.О., д.т.н., професор, НТУ «ХПІ»

Особливості розпізнавання радіосигналів за нелінійним відгуком акустооптичного спектроаналізатора

Стаття присвячена обліку нелінійності акустооптичного перетворення по потужності радіосигналу, що приймається. Запропонований алгоритм обліку нелінійності, який ґрунтується на методах розпізнавання сигналів з використанням повчальної вибірки.

Ключові слова: акустооптичні спектроаналізатори, функції самоподібності.

Постановка завдання і аналіз літератури

Акустооптичні спектроаналізатори, які реалізують можливість проведення паралельної обробки сигналів в широкій смузі частот і практично в реальному масштабі часу, а також які виконують роль вимірювачів частоти, широко використовуються в сучасних радіотехнічних системах. Такий спектроаналізатор є аналогом багатоканального приймача, в якому частотне розділення каналів ґрунтується на принципах акустооптичної взаємодії.

Відомо, що характеристики виявлення радіоканалу визначаються енергією сигналу [1]. У відомій літературі акустооптичний спектроаналізатор вважають лінійною системою [2]. Це твердження ґрунтується на тому, що складові частини акустооптичного спектроаналізатора, такі як лінзи, дзеркала, оптичні фільтри, модулятори, шар простору, діафрагми та ін. є лінійними, інваріантними відносно зрушень в координатній і частотній областях відповідно і характеризуються коефіцієнтом передачі, або коефіцієнтом пропускання.

Практичне використання акустооптичних аналізаторів спектру в радіотехнічних системах підтверджує це положення при виявленні сигналів малої енергії.

При цьому відгук на виході аналізатора відповідає сигналу на вході та однозначно характеризує частоту вхідного сигналу (тобто кожній частоті вхідного сигналу відповідає один осередок фотоприймача на приладах із зарядовим зв'язком).

У разі перевищення енергією радіосигналу певного порогу на виході спектроаналізатора формується складний сигнал, по якому важко визначити частоту вхідного радіосигналу. Це, можливо, обумовлено нелінійним характером залежності передатної функції радіоканалу і оптичних елементів від потужності радіосигналу, що приймається.

У існуючих спектроаналізаторах не реалізовані методи обробки сигналів, що дозволяють врахувати нелінійний характер акустооптичного перетворення.

Таким чином, облік впливу нелінійного характеру перетворень в акустооптичних аналізаторах спектру є актуальним науковим завданням.

Метою даної статті є облік особливостей розпізнавання вхідних радіосигналів за нелінійним відгуком акустооптичного спектроаналізатора.

Результати теоретичних досліджень

Можливі наступні підходи до рішення цієї задачі. Перший з них припускає строгий математичний опис проходження сигналу великої потужності через усі елементи радіотехнічної системи. Цей підхід дозволяє створити оптимальні алгоритми однозначного визначення частоти радіосигналу великої потужності по складному відгуку акустооптичного аналізатора спектру. Але цей підхід дуже громіздкий і трудомісткий в реалізації, тому він далі не розглядається.

В якості альтернативи аналітичному підходу можна запропонувати підхід, який ґрунтується на методах розпізнавання сигналів з використанням навчальної вибірки [3 – 6]. Сутність цього підходу полягає в наступному.

Вважатимемо, що на вхід системи поступають монохроматичні сигнали. За допомогою радіоканалу вимірюються тривалість імпульсу, період повторення імпульсів і інші параметри, окрім частоти. Вважаємо, що на вхід акустооптичного спектроаналізатора поступає сигнал постійної частоти, проте у разі великої енергії сигналу на виході може бути сукупність імпульсів різних частот (рис. 1).

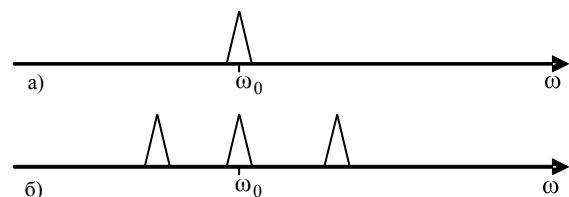


Рис. 1. Сигнал на вході (а) та на виході (б) спектроаналізатора

При зміні енергії змінюється кількість імпульсів і їх розташування на осі частот. Таким чином, для розпізнавання пред'являється сукупність імпульсів, яку можна записати у вигляді вектору $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, де x_i – частота i -го імпульсу. Будемо вважати, що в залежності від розміру вхідного сигналу n може змінюватися від 1 до N , де N – кількість дозволених дискрет за частотою. Оскільки про розподіл вектору \mathbf{x} інформації нема, доцільно отримати цю інформацію на етапі навчання, метою якого є побудова еталонних описів вихідних сукупностей сигналів (векторів \mathbf{x}) залежно від двох параметрів вхідних сигналів – інтенсивності (I) та частоти (ω), які представимо вектором $\mathbf{B} = (I, \omega)^T$.

Будемо також вважати, що кількість дозволених дискрет за інтенсивністю одно M . Таким чином, параметричний простір векторів вхідних сигналів має розмірність $K = M \cdot N$. У загальному випадку, при вхідній дії B_j , $j = 1, \dots, K$, щільність розподілу вихідних параметрів напишемо у вигляді $p(\mathbf{x}, n / B_j)$. В умовах априорної невизначеності питання про те, яким є розподіл вектору \mathbf{x} , не настільки важливе. На перших етапах дослідження досить, якщо припущення про нормальність не суперечить спостереженнями і способам вимірювань. Отже, прийнемо, що зазначений розподіл є нормальним і має вигляд

$$p(\mathbf{x}, n / B_j) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} (\det \mathbf{R})^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{a}_j)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{a}_j) \right], \quad (1)$$

де $\mathbf{a} = m_1 \{x\}$ – вектор математичних очікувань компонент x_i , $i = \overline{1, n}$; \mathbf{R}^{-1} – квадратна матриця з $n \times n$ рядків і стовпців, зворотна матриці \mathbf{R} з елементами $R_{ij} = m_1 \left[(x_i - a_i) (x_j - a_j)^T \right]$,

$i, j = \overline{1, n}$, $\det \mathbf{R}$ – визначник \mathbf{R} .

Тоді побудова еталонних описів векторів \mathbf{x} зводиться до такої процедури. Маємо K класів вхідних впливів. Для кожного з класів шляхом m -кратної подачі на вхід відповідного сигналу з параметрами B_j по вихідних сигналах обчислюється вибіркового вектор середніх

$$\hat{a}_j = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m x_i^{(j)}, \quad x_i^T = (x_{i1}, \dots, x_{in}) \quad (2)$$

та вибіркова кореляційна матриця

$$\hat{R}_j = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m (x_i^{(j)} - \hat{a}_j) (x_i^{(j)} - \hat{a}_j)^T, \quad (3)$$

які є оцінками правдоподібності (A – знак оцінювання) вектору середніх a_j та кореляційної матриці R_j , нормальної сукупності, яка розглядається.

Вибіркові вектор середніх (2) та кореляційна матриця (3) є отриманими оцінками, крім того (2) незміщена оцінка, тоді як оцінка (3) зміщена. Незміщена оцінка кореляційної матриці виходить множенням (3) на $m/(m-1)$. Таким чином, етап навчання полягає в обчисленні для кожного з класів вектору середніх \hat{a}_j і кореляційної матриці \hat{R}_j .

Тепер можна перейти до формулювання задачі розпізнавання, яка при описаних вище умовах відноситься до типу задач параметричного розпізнавання на випадок багатьох класів (альтернатив). Завдання формулюється таким чином. нехай є K класів вхідних сигналів і кожен клас описується, як це встановлено в ході навчання, n_j – мірним нормальним розподілом $N(\mathbf{x}, n_j; \hat{a}_j, \hat{R}_j)$,

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{n_j})^T$. Є контрольна вибірка $x_p = (x_{p1}, \dots, x_{pn})^T$, що належить до одного з класів. Потрібно визначити, до якого класу вона належить.

На основі загальних принципів побудови вирішального правила в багатоальтернативних завданнях його можна записати в наступному вигляді: контрольна вибірка $x_p = (x_{p1}, \dots, x_{pn})^T$ належить до класу l , $1 \leq l \leq K$, для якого функція правдоподібності $\omega_p(l)$ є максимальною:

$$\omega_p(l) = \max \{ \omega_p(k) \}, \quad 1 \leq k \leq K, \quad (4)$$

де

$$\omega_p(k) = (2\pi)^{-\frac{p}{2}} (\det \hat{R}_k)^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\left(\frac{1}{2} \right) (x_p - \hat{a}_k)^T \hat{R}_k^{-1} (x_p - \hat{a}_k) \right]$$

– щільність ймовірності p -мірного нормального закону.

Зазначимо, що в нашому випадку порівнянню підлягають лише класи, що мають p -мірну розмірність векторів вихідних сигналів. У розгорнутому записі правило (4) означає, що рішення про наявність сигналу класу l приймається в тому випадку, коли одночасно виконуються L нерівностей

$$\omega_p(l) \geq \omega_p(k), \quad k=1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, L,$$

де L – кількість класів, які мають p -мірну розмірність.

Переходячи до логарифмів функцій правдоподібності $Q_{pl} = \omega_p(l)$, запишемо вирішальне правило у вигляді: $x_p \in l$, якщо виконані умови:

$$Q_{pl} - Q_{pk} = \ln \omega_p(l) - \ln \omega_p(k) = \left(\frac{1}{2} \right) \left[\begin{aligned} & (x_p - \hat{a}_l)^T \hat{R}_l^{-1} (x_p - \hat{a}_l) - (x_p - \hat{a}_k)^T \hat{R}_k^{-1} (x_p - \hat{a}_k) + \\ & + \left(\frac{n}{2} \right) \cdot \ln \left(\frac{\det \hat{R}_k}{\det \hat{R}_l} \right) \end{aligned} \right] > 0.$$

Реалізація цього правила можлива різними відомими методами оптимізації (лінійного програмування, застосуванням нейронних мереж і тобто) та не є предметом аналізу статті. Коротко зупинимося на характеристиках достовірності рішень, що приймаються.

Визначення вірогідності помилкових рішень у багатоальтернативному випадку є трудомістким і досить громіздким завданням [1]. Відмітимо, що у разі повного апіорного знання при $K=2$ (двоальтернативний випадок) вірогідності помилок першого та другого роду (α та β відповідно) можуть бути розраховані аналітично з використанням табульованих функцій.

У цьому сенсі ймовірності α_l та β_l , $l=1, 2, \dots, K$, можна вважати узагальненнями ймовірності α та β на багатоальтернативний випадок. Їх можна представити як вірогідність парних помилок першого і другого роду для ізольованої пари класів. Помітимо, що значення вірогідності парних помилок α_{kl} та β_{kl} , $k=1, 2, \dots, K$, неможливо використовувати для обчислення α_l та β_l в силу залежності подій, які означають прийняття помилкових рішень. Однак ймовірності парних помилок для самих несприятливих класів (в сенсі їх розпізнавання) можуть служити в якості наближеної оцінки ймовірностей α_l та β_l .

Для ілюстрації розглянемо завдання розпізнавання приналежності вибірки $x_2 = (x_1, x_2)^T$ до однієї з двовимірних нормальних сукупностей із загальною кореляційною матрицею \hat{R} та векторами оцінок середніх \hat{a}_1 , \hat{a}_2 . Вважаємо, що вектори \hat{a}_1 , \hat{a}_2 та матриця \hat{R} отримані на досить великий навчальній вибірці.

Вибірка, яка спостерігалася

$x_2 = (x_1, x_2)^T$ відноситься до класу 2, якщо

$$\left(\frac{1}{2} \right) (\hat{a}_2 - \hat{a}_1)^T \hat{R}^{-1} [2(x_2 - \hat{a}_1 - \hat{a}_2)] \geq c,$$

та до класу 1, якщо виконується протилежна нерівність; c – обраний поріг. Величина порога визначається критерієм прийняття рішення. Наприклад, для критерія максимальної правдоподібності $c = 0$.

У асимптотичному випадку обсягів, які необмежено зростають, навчальних вибірок ймовірності помилкових рішень визначаються формулами [1]:

$$\alpha = 1 - F \left[\left(k + \frac{d}{2} \right) \sqrt{d} \right] ; \quad \beta = 1 - F \left[\left(k - \frac{d}{2} \right) \sqrt{d} \right],$$

де $F(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_{-\infty}^z \exp \left[- \left(\frac{x^2}{2} \right) \right] dx$ –

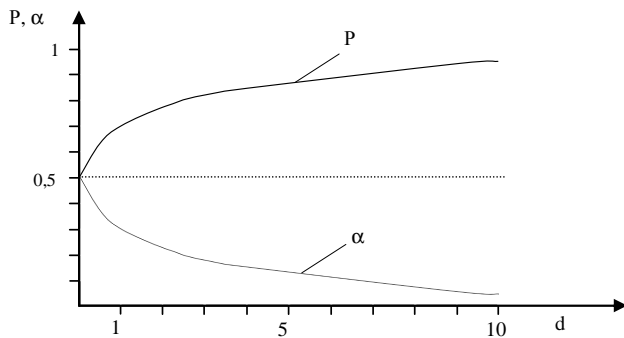
табульований інтеграл ймовірності;

$d = (\hat{a}_2 - \hat{a}_1)^T \hat{R}^{-1} (\hat{a}_2 - \hat{a}_1)$ – відстань Махаланобіса.

Достовірність прийнятих рішень (ймовірності правильних рішень) про приналежність контрольної вибірки до класів 1 та 2 визначається відповідними ймовірностями $P_1 = 1 - \alpha$ та $P_2 = 1 - \beta$. У разі обраного нами критерію максимальної правдоподібності $\alpha = \beta$ та $P_1 = P_2 = P = F \left(\frac{\sqrt{d}}{2} \right)$.

Залежності P та α від d наведені на рис. 2.

З аналізу графіка випливає, що ймовірність правильного розпізнавання зростає із збільшенням величини, яку d можна трактувати як зважене помилками вимірювання відстань між класами.

Рис. 2. Залежності P та α від d

Значимо, що поведінка ймовірності α є дзеркальним відображенням поведінки P .

Таким чином, для побудови алгоритму розпізнавання необхідно за навчальними вибірками визначити характеристики класів з співвідношень (2) та (3). Далі знаходяться два класи, що мають найменшу середньозважену відстань між собою. По цій відстані з використанням рис. 2 знаходяться оцінки ймовірнісних характеристик алгоритму. Якщо вони не задовольняють заданим, то можна спробувати їх поліпшити шляхом накопичення та статистичної обробки прийнятих реалізацій сигналів (пачок сигналів).

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлена можливість правильного розпізнавання вхідних радіосигналів у випадку нелінійного відгуку акустооптичного спектроаналізатора. Побудован алгоритм розпізнавання вхідного радіосигналу. Проведено оцінку параметрів розпізнавання вхідного радіосигналу та достовірності прийнятих рішень.

У подальших дослідженнях бажано провести оцінку зовнішнього впливу на достовірність прийнятого рішення про розпізнавання радіосигналу.

Література

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д.В. Тигин: Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
3. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 263 с.
4. Патрик Э. Основы теории распознавания образов. – М.: Сов. радио, 1980. – 408 с.
5. Райзин Д. Классификация и кластер / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 389 с.
6. Стрелков А.И., Лытвяга А.П., Стрелкова Т.А., Коротков В.В. Алгоритм обнаружения сигналов в акустооптических анализаторах спектра // Радиотехника. – 2003. – Вып. 131. – С. 7 – 13.

Можаяев А.А. Особенности распознавания радиосигналов по нелинейному отклику акустооптического спектроанализатора. Статья посвящена учету нелинейности акустооптического преобразования по мощности принимаемого радиосигнала. Предложен алгоритм учета нелинейности, основанный на методах распознавания сигналов с использованием обучающей выборки.

Ключевые слова: акустооптические спектроанализаторы, функции самоподобия.

Mozhaev A.A. The peculiarities of radio signal recognition according to the nonlinear response of acousto-optic spectrum analyzer. The article is devoted to the record of acousto-optical conversion according to the received signal power. The algorithm non-linearity record, based on the methods of signal detection using the training sample has been proposed.

Key words: acousto-optic spectrum analyzer, self-similarity functions.

Поступила 22.10.2013г