

О.А. Нагорнюк

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, Житомир

ВИКОРИСТАННЯ КУМУЛЯНТНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті обґрунтована актуальність удосконалення методів розпізнавання видів цифрової модуляції телекомунікаційних систем. Показано, що в якості модуляційних ознак для розпізнавання видів модуляції можуть використовуватись змішані кумулянти вищих порядків, які дозволяють синтезувати алгоритми розпізнавання цифрових радіосигналів на фоні гауссівського шуму з ймовірністю правильного розпізнавання, близькою до одиниці. Наводяться аналітичні вирази розрахунку змішаних кумулянтів через величини змішаних моментів до восьмого порядку включно та значення змішаних кумулянтів для найбільш розповсюджених видів радіосигналів з цифровою лінійною модуляцією. Розширено можливості прикладного пакета статистичних функцій «Statistics Toolbox» інтерактивного середовища програмування MATLAB. Розроблено рекомендації для синтезу алгоритмів розпізнавання виду модуляції на основі кумулянтного аналізу.

Ключові слова: телекомунікаційна система, радіосигнал, маніпуляція, фазове сузір'я, метод, розпізнавання, статистика, кумулянт, момент.

Вступ

Постановка проблеми. Автоматизоване розпізнавання виду модуляції радіосигналів є важливим завданням, яке вирішується в радіотехнічних системах різного призначення [1–3]. Так, в програмованих радіоприймачах за результатами розпізнавання виду модуляції обирається необхідний демодулятор сигналу, в засобах радіомоніторингу інформація про вид модуляції використовується для ідентифікації несанкціонованих джерел радіовипромінювання та вимірювання їх модуляційних параметрів, а в системах радіоелектронної боротьби – при виборі найбільш ефективного виду перешкоди. Для автоматизованого розпізнавання виду модуляції розроблена велика кількість методик, методів, способів та алгоритмів, які різняться між собою набором модуляційних ознак та методами прийняття рішення про вид модуляції [5–6]. Ефективними модуляційними ознаками, які пропонуються в наукових публікаціях, є статистичні величини, отримані з відліків миттєвої амплітуди, частоти, фази та їх комбінувань. Такими величинами є математичне сподівання, дисперсія, початкові і центральні моменти та кумулянти. Використанню кумулянтів для розпізнавання виду модуляції присвячено багато наукових праць, опублікованих в останні роки, що обумовлено їх перевагами порівняно з іншими модуляційними ознаками [4–15]. Оскільки значення кумулянтів від третього і вище порядків дорівнюють нулю для величин із нормальним законом розподілення ймовірностей, то застосування кумулянтів як модуляційних ознак дозволяє синтезувати ефективні

методи і алгоритми розпізнавання радіосигналів на фоні білого гауссівського шуму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В публікаціях [6–7] запропоновані підходи до розпізнавання виду модуляції на основі кумулянтів четвертого порядку, дерева рішень та методу мінімальної метрики. В [8–10] використовуються кумулянти до восьмого порядку та штучні нейронні мережі. В [9] для оптимізації кількості модуляційних ознак пропонується використовувати генетичний алгоритм, а в [10] для компенсації похибок синхронізації цифровий фільтр. В [11–13] кумулянти використовуються для розпізнавання сигналів в системах МІМО, асинхронних передачах та в каналах зв'язку з завамираннями. В [14] для підвищення ймовірності правильного розпізнавання запропоновано модифіковані фазові сузір'я. В [15] отримано оптимальні набори кумулянтів відповідно до евристичного методу повного перебирання та статистичного методу Монте-Карло. Однак, як показують результати аналізу, в відомій літературі не наводяться кінцеві аналітичні вирази для розрахунку всіх змішаних кумулянтів вищих порядків, а також відсутня загальна методика використання кумулянтів при розпізнаванні сигналів з цифровою модуляцією.

Тому **метою** досліджень є отримання математичних виразів для розрахунку змішаних кумулянтів до восьмого порядку включно, розрахунок значень кумулянтів для найбільш розповсюджених цифрових видів модуляції та розроблення загальної методики синтезу алгоритмів розпізнавання на основі кумулянтного аналізу.

Постановка завдання досліджень

Основними видами цифрової модуляції сучасних телекомунікаційних систем є різновиди фазової (ФМн), амплітудної (АМн) та квадратурної амплітудної (КАМн) маніпуляції [1]. Зокрема, такі ж види маніпуляції використовуються і при модуляції підпотоків радіосигналів з ортогональним частотним розділенням каналів [3]. Тому в даній статті основна увага буде приділена розпізнаванню радіосигналів з лінійною цифровою модуляцією.

Адитивну суміш радіосигналу з гауссівським шумом на виході проміжної частоти радіоприймача після виконання операції аналого-цифрового перетворення $r(n, U_i)$ можна представити виразом:

$$r(n, U_i) = s(n, U_i) + \xi(n), \quad (1)$$

де $s(n, U_i)$ – корисний сигнал; $\xi(n)$ – адитивний гауссівський шум; U_i – вектор параметрів сигналу.

Корисний сигнал для лінійної цифрової модуляції можна записати у вигляді:

$$s(n, U_i) = a_i e^{j\left(2\pi f_c \frac{n}{F_s} + \theta\right)} \sum_{k=1}^K s_k^{(i)} g\left(\frac{n}{F_s} - (k-1)T\right), \quad (2)$$

де $U_i = \left[a_i \ f_c \ \theta \ R_s \ g(n) \ M \ \{s_k\}_{k=1}^M \right]$ – вектор априорно невідомих параметрів сигналу; a_i – амплітуда сигналу; f_c – частота несучого коливання; θ – початкова фаза несучого коливання; $R_s = 1/T$ – символна швидкість; $g(n)$ – імпульсна характеристика формуючого фільтра; M – кратність маніпуляції;

$\{s_k\}_{k=1}^M$ – комплексні символи кінцевого алфавіту різновидів маніпуляцій; T – символний період; F_s – частота дискретизації; n – номер відліку в масиві.

Комплексні символи алфавітів $\{s_k\}_{k=1}^M$ описуються такими виразами [8]:

амплітудна маніпуляція:

$$s_{k,I}^{(AMn-M)} \in \left\{ \frac{2m-1-M}{\sigma_s^{(M-AMn)}}, m=1, \dots, M \right\}; \quad (3)$$

фазова маніпуляція:

$$s_k^{(FMn-M)} = e^{j\theta_m}; \quad (4)$$

$$\theta_m \in \left\{ \frac{2\pi m}{M}, m=0, \dots, M-1 \right\}; \quad (5)$$

квадратурна амплітудна маніпуляція:

$$s_k^{(KAMn-M)} = s_{k,I}^{(KAMn-M)} + js_{k,Q}^{(KAMn-M)}; \quad (6)$$

$$s_{k,I,Q}^{(KAMn-M)} \in \left\{ \frac{2m-1-\sqrt{M}}{\sigma_s^{(M-KAMn)}}, m=1, \dots, \sqrt{M} \right\}, \quad (7)$$

де індекси I та Q вказують на синфазну та квадратурну складові сигналу;

$\sigma_s^{(M-AMn)}, \sigma_s^{(M-KAMn)}$ – середньоквадратичні відхилення символів АМн та КАМн.

Розміщення модуляційних символів на комплексній площині є фазовим сузір'ям у класичному розумінні. Окрім фазових сузір'їв, що описуються виразами (3–7), використовуються й інші табульовані значення фазових сузір'їв, графічне подання яких наведено на рис. 1.

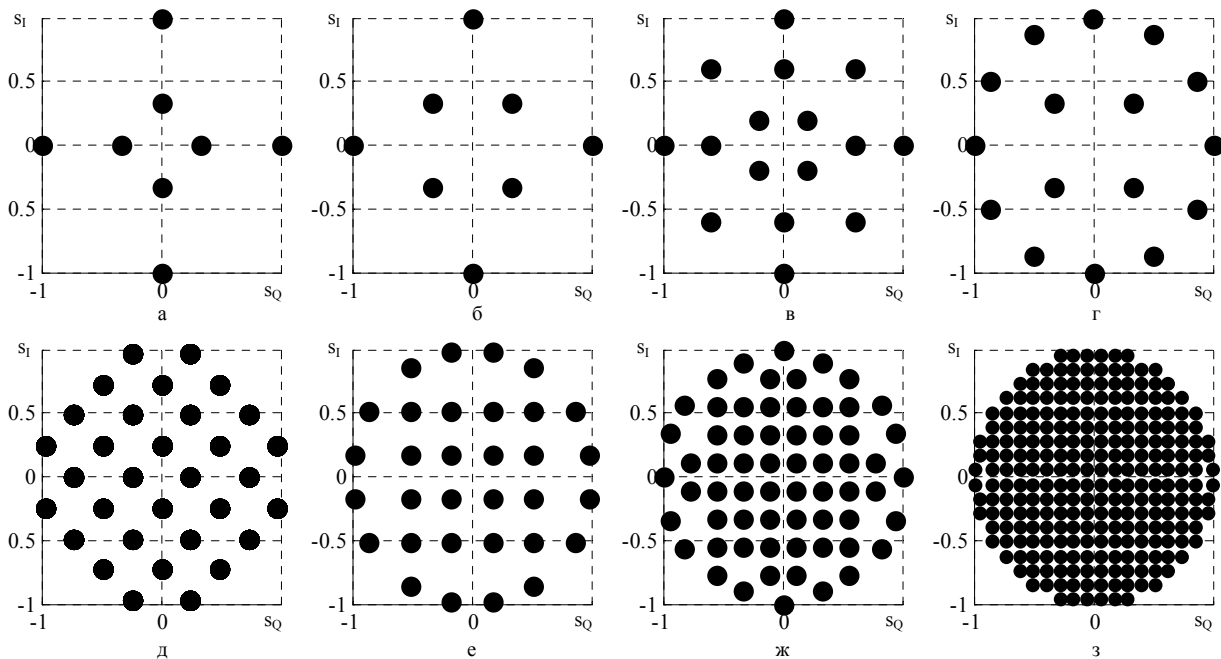


Рис. 1. Зовнішній вигляд ФС: а – КАМн-8-star; б – КАМн-8-v29; в – КАМн-16-v29; г – КАМн-16-m; д – КАМн-32-v29; е – КАМн-16-m; ж – КАМн-64-m; з – КАМн-256-m

Для лінійної цифрової модуляції форма фазового сузір'я визначає вид модуляції.

Після перетворення в цифровий код до аналізованого радіосигналу (1) застосовуються операції фільтрації, децимації, визначення та корекції несучої частоти, символної швидкості, еквалайзування [3]. Шляхом аналізу отриманих масивів відліків необхідно розпізнати вид модуляції цифрового сигналу.

Виклад основного матеріалу

Суть методів розпізнавання видів модуляцій на основі кумулянтного аналізу сигналів полягає в розрахунку змішаних кумулянтів, порівняння їх з відомими теоретичними значеннями та прийняті рішення про вид модуляції на основі найбільшого співпадіння розрахованих та теоретичних значень [4–5].

Враховуючи властивість адитивності кумулянтів можна записати:

$$\text{Cum}(r(n, U_i)) = \text{Cum}(s(n, U_i)) + \text{Cum}(\xi(n)) = \text{Cum}(s(n, U_i)), \quad (8)$$

де $\text{Cum}(\)$ – оператор розрахунку кумулянта.

Вираз (9) справедливий для кумулянтів третього та вище порядків, що дорівнюють нулю для гауссівського шуму. Завдяки властивості (9) під час аналізу сигналів з адитивним гауссівським шумом, метод на основі кумулянтів дозволяє забезпечити високу ймовірність правильного розпізнавання виду модуляції при низьких відношеннях сигнал/шум (ВСПШ).

Математично кумулянти p -порядку C_p – визначаються як коефіцієнти розкладання в ряд Маклорена логарифму характеристичної функції $G(u)$ [8]:

$$\ln G(u) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(iu)^p}{p!} C_p, \quad (9)$$

де p – порядок кумулянта.

Змішані кумулянти порядку p з кількістю комплексно-спряжених відліків q визначаються як [3]:

$$C_{pq} = \text{Cum} \left[\underbrace{r(n), \dots, r(n)}_{p-q}, \underbrace{r^*(n), \dots, r^*(n)}_q \right], \quad (10)$$

де $r^*(n)$ – спряжене значення комплексного відліку.

Кумулянт p -го порядку C_p визначається як сума початкових моментів до p -го порядку включно [8]:

$$C_p = \text{Cum}(r_1(n), r_2(n), \dots, r_p(n)) = \sum_{\forall \vartheta} (-1)^{q-1} (q-1)! E \left[\prod_{j \in \vartheta_1} r(j) \right] \dots E \left[\prod_{j \in \vartheta_b} r_j \right] r(j), \quad (11)$$

де $\vartheta = (\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_b)$ – множина всіх можливих розкладань індексів $(1, 2, \dots, b)$.

У випадку коли $p = 4$ набір можливих індексів буде $\vartheta = (1, 2, 3, 4)$. Тоді можливі такі типи розкладень: для $b=1$: $\{(1, 2, 3, 4)\}$, для $b=2$: $\{1, (2, 3, 4)\}$, $\{2, (1, 3, 4)\}$, $\{3, (1, 2, 4)\}$, $\{4, (1, 2, 3)\}$, $\{(1, 2), (3, 4)\}$, $\{(1, 3), (2, 4)\}$, $\{(1, 4), (2, 3)\}$, для $b=3$: $\{(1), (2), (3, 4)\}$, $\{(1), (3), (2, 4)\}$, $\{(1), (4), (1, 3)\}$, $\{(2), (3), (1, 4)\}$, $\{(2), (4), (1, 3)\}$, $\{(3), (4), (1, 2)\}$, для $b=4$ $\{(1), (2), (3), (4)\}$. Підставивши вказані значення в формулу (11) отримаємо вираз для розрахунку кумулянта четвертого порядку:

$$C_4 = \text{Cum}(r_1, r_2, r_3, r_4) = E[r_1, r_2, r_3, r_4] - E[r_1]E[r_2, r_3, r_4] - E[r_2]E[r_1, r_3, r_4] - E[r_3]E[r_1, r_2, r_4] - E[r_4]E[r_1, r_2, r_3] - E[r_1, r_2]E[r_3, r_4] - E[r_1, r_3]E[r_2, r_4] - E[r_1, r_4]E[r_2, r_3] + 2(E[r_1]E[r_2]E[r_3, r_4] + E[r_1]E[r_3]E[r_2, r_4] + E[r_1]E[r_4]E[r_1, r_3] + E[r_2]E[r_3]E[r_1, r_4] + E[r_2]E[r_4]E[r_1, r_3] + E[r_3]E[r_4]E[r_1, r_2]) - 6E[r_1]E[r_2]E[r_3]E[r_4], \quad (12)$$

де $E(\)$ – оператор розрахунку математичного сподівання.

Для сигналів із нульовим математичним сподіванням $E[r_k] = 0$ вираз (12) матиме вигляд:

$$C_4 = \text{Cum}(r_1, r_2, r_3, r_4) = E[r_1, r_2, r_3, r_4] - E[r_1, r_2] \cdot E[r_3, r_4] - E[r_1, r_3]E[r_2, r_4] - E[r_1, r_4]E[r_2, r_3]. \quad (13)$$

Для розрахунку змішаних кумулянтів використовуються комплексно-спряжені відліки, як показано у виразі (10). Так, при розрахунку змішаного кумулянта четвертого порядку ($p=4$) з двома комплексно-спряженими відліками ($q=2$) вираз (13) прийме вигляд:

$$C_{42} = \text{Cum}(r_k, r_k, r_k^*, r_k^*) = E[r_k, r_k, r_k^*, r_k^*] - E[r_k, r_k] \cdot E[r_k^*, r_k^*] - E[r_k, r_k^*]E[r_k, r_k^*] - E[r_k, r_k^*]E[r_k, r_k^*] = M_{42} - M_{20}M_{20} - M_{21}M_{21} - M_{21}M_{21} = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2, \quad (14)$$

де C_{42} – значення змішаного кумулянта 4-го порядку з 2-ма комплексно-спряженими відліками; M_{pq} – значення змішаного початкового моменту порядку p з кількістю комплексно-спряжених відліків q [8]:

$$M_{pq} = E \left[\underbrace{r_k, \dots, r_k}_{p-q}, \underbrace{r_k^*, \dots, r_k^*}_q \right]; \quad (15)$$

$$M_{42} = E \left[r_k, r_k, r_k^*, r_k^* \right], \quad (16)$$

де M_{42} – значення змішаного початкового моменту 4-го порядку з 2-ма комплексно-спряженими відліками.

Використовуючи співвідношення (11) можна розрахувати значення всіх змішаних кумулянтів вищих порядків. Однак зі збільшенням порядку кумулянта кількість можливих розкладень \mathfrak{P} значно збільшується і процес отримання аналітичних виразів для розрахунку кумулянтів стає занадто складним. Тому процес отримання аналітичних виразів був автоматизований шляхом розроблення та використання програмно-алгоритмічного забезпечення визначення всіх можливих типів розкладень та представлення змішаного кумулянта C_{pq} через значення змішаних початкових моментів M_{pq} .

Отримані аналітичні вирази для змішаних кумулянтів до 8-го порядку включно представлені нижче:

$$C_{20} = M_{20}; \quad (17)$$

$$C_{21} = M_{21}; \quad (18)$$

$$C_{40} = M_{40} - 3M_{20}^2; \quad (19)$$

$$C_{41} = M_{41} - 3M_{20}M_{21}; \quad (20)$$

$$C_{42} = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2; \quad (21)$$

$$C_{60} = M_{60} - 15M_{40}M_{20} + 30M_{20}^3; \quad (22)$$

$$C_{61} = M_{61} - 5M_{40}M_{21} - 10M_{41}M_{20} + 30M_{21}M_{20}^2; \quad (23)$$

$$C_{62} = M_{62} - 5M_{40}M_{20} - 8M_{41}M_{21} - 6M_{42}M_{20} + 24M_{21}^2M_{20} + 6M_{20}^3; \quad (24)$$

$$C_{63} = M_{63} - 9M_{42}M_{21} - 6M_{41}M_{20} + 18M_{21}M_{20}^2 + 12M_{21}^3; \quad (25)$$

$$C_{80} = M_{80} - 28M_{20}M_{60} - 35M_{40}^2 + 420M_{20}^2M_{40} - 630M_{20}^4; \quad (26)$$

$$C_{81} = M_{81} - 7M_{21}M_{60} - 21M_{20}M_{61} - 35M_{40}M_{41} + 210M_{20}^2M_{41} + 210M_{20}M_{21}M_{40} - 630M_{20}^3M_{21}; \quad (27)$$

$$C_{82} = M_{82} - M_{20}M_{60} - 12M_{21}M_{61} - 15M_{20}M_{62} - 15M_{40}M_{42} - 20M_{41}^2 + 30M_{20}^2M_{40} + 60M_{21}^2M_{40} + 240M_{20}M_{21}M_{41} + 90M_{20}^2M_{42} - 540M_{20}^2M_{21}^2 - 90M_{20}^4; \quad (28)$$

$$C_{83} = M_{83} - 3M_{20}M_{62} - 10M_{20}M_{63} - 15M_{21}M_{62} - 30M_{42}M_{41} - 5M_{40}M_{41} + 30M_{20}M_{21}M_{40} + 90M_{20}^2M_{41} + 120M_{21}^2M_{41} + 180M_{20}M_{21}M_{42} - 270M_{20}^3M_{21} - 360M_{20}M_{21}^3; \quad (29)$$

$$C_{84} = M_{84} - 12M_{20}M_{62} - 16M_{21}M_{63} - M_{40}^2 - 16M_{41}^2 - 18M_{42}^2 + 12M_{20}^2M_{40} + 192M_{20}M_{21}M_{41} + 72M_{20}^2M_{42} + 144M_{21}^2M_{42} - 54M_{20}^4 - 432M_{20}^2M_{21}^2 - 144M_{21}^4; \quad (30)$$

Як видно із виразу (18), значення змішаного кумулянта C_{21} дорівнює значенню змішаного початкового моменту M_{21} та відповідає енергії сигналу. Для забезпечення можливості порівняння змішаних кумулянтів, розрахованих для сигналів з різними енергетичними характеристиками, необхідно отримати їх нормовані значення [6]:

$$C_{pq}^N = \frac{C_{pq}}{(C_{21} - D_\xi)^{p/2}}, \quad (31)$$

де C_{pq}^N – нормоване значення змішаного кумулянта;

D_ξ – дисперсія адитивного гауссівського шуму.

На основі отриманих математичних виразів (17–30) реалізований програмний клас розрахунку змішаних кумулянтів в інтерактивному середовищі програмування MATLAB 2015b, що розширило можливості прикладного пакету статистичних функцій «Statistics Toolbox» [17–18].

Даний клас оптимізовано для зменшення розрахункової складності. При розрахунку сукупності кумулянтів різних порядків головний модуль класу аналізує типи початкових моментів, які входять до аналітичних виразів кумулянтів, та організовує процес розрахунку таким чином, щоб запобігти повторному виконанню однакових операцій. Так, якщо сукупність кумулянтів складається із двох кумулянтів C_{40} та C_{60} (аналітичні вирази (19; 22)), то під час розрахунку значення початкових моментів M_{20} та M_{40} зберігаються в оперативному запам'ятовуючому пристрої та використовуються як при розрахунку C_{40} , так і при розрахунку C_{60} . Також повторно використовуються піднесені до степеня відліки вхідного сигналу $r(n)$ при розрахунку змішаних моментів відповідно до виразу (15).

За допомогою розроблених програмних модулів отримані теоретичні значення змішаних кумулянтів для найбільш розповсюджених видів модуляції за таких умов:

- енергія сигналу дорівнює одиниці;
- ймовірність появи інформаційних символів описується рівномірним законом;
- шуми в сигналі відсутні.

Розраховані кумулянти представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення змішаних кумулянтів для різних видів модуляції

Змішаний кумулянт	Вид модуляції						
	АМн-4	АМн-8	АМн-16	ФМн-2	ФМн-4	ФМн-8	ФМн-16
C20	1	1	1	1	0	0	0
C21	1	1	1	1	1	1	1
C40	-1,36	-1,24	-1,21	-2	1	0	0
C41	-1,36	-1,24	-1,21	-2	0	0	0
C42	1,36	-1,24	-1,21	-2	-1	-1	-1
C60	8,31	7,21	6,94	16	0	0	0
C61	8,31	7,21	6,94	16	-4	0	0
C62	8,31	7,21	6,94	16	0	0	0
C63	8,31	7,21	6,94	16	4	4	4
C80	-111,63	-92,14	-87,77	-272	-34	1	0
C81	-111,63	-92,14	-87,77	-272	0	0	0
C82	-111,63	-92,14	-87,77	-272	34	0	0
C83	-111,63	-92,14	-87,77	-272	0	0	0
C84	-111,63	-92,14	-87,77	-272	-34	-33	-33
	Вид модуляції						
	КАМн-8	КАМн-16	КАМн-32	КАМн-64	КАМн-128	КАМн-256	КАМн-512
C20	0,67	0	0	0	0	0	0
C21	1	1	1	1	1	1	1
C40	-1	-0,68	-0,19	-0,62	-0,18	-0,61	-0,18
C41	-0,89	0	0	0	0	0	0
C42	-1	-0,68	-0,69	-0,62	-0,66	-0,6	-0,65
C60	4,74	0	0	0	0	0	0
C61	4,89	2,08	0,57	1,8	0,53	1,74	0,52
C62	4,74	0	0	0	0	0	0
C63	4,89	2,08	2,11	1,8	1,96	1,74	1,93
C80	-54,1	-13,93	-2	-11,5	-1,8	-11	-1,76
C81	-53,68	0	0	0	0	0	0
C82	-54,1	-13,95	-3,87	-11,5	-3,47	-11	-3,39
C83	-56,13	0	0	0	0	0	0
C84	-44,32	-13,97	-13,81	-11,5	-12,49	-11	-12,22
	Вид модуляції						
	КАМн-16m	КАМн-32m	КАМн-64m	КАМн-8-v29	КАМн-16-v29	КАМн-32-v29	КАМн-8-star
C20	0	0	0	0	0	0	0
C21	1	1	1	1	1	1	1
C40	0	0	0	1,27	0,52	0,19	1,64
C41	0	0	0	0	0	0	0
C42	-0,83	0,67	-0,62	0,59	-0,58	-0,69	-0,36
C60	0	0	0,15	0	0	0	0
C61	0	-0,14	0	-4,2	-1,52	-0,57	-5,28
C62	0	0	0	0	0	0	0
C63	2,87	1,96	1,75	1,57	1,49	2,11	0,16
C80	0	-0,34	0	-53,11	-5,62	-1,98	-88,9
C81	0	0	-0,68	-0,17	0	0	0
C82	-0,73	0,85	0,37	27,1	9,45	3,83	28,26
C83	0	0	0	0	0	0	0
C84	-20,93	-12,35	-10,6	-10,63	-8,54	-13,8	-0,4

З табл. 1 видно, що використовуючи змішані кумулянти, можна розпізнавати як класи модуляцій (АМн, ФМн, КАМн), так і види модуляцій (ФМн-2, КАМн-16 тощо). Проаналізувавши значення в табл. 1, можна зробити висновок, що при побудові алгоритму розпізнавання не потрібно використовувати всі значення кумулянтів, оскільки їх загальна сукупність має інформаційну надлишковість. Так при розпізнаванні класів АМн та ФМн сигналів можна використати лише кумулянт 2-го порядку C_{20} , що спрощує розрахунковий процес та зменшує вимоги до обчислювальних пристроїв. Більш детально процес зменшення інформаційної надлишковості при побудові алгоритму розпізнавання виду модуляції на основі кумулянтного аналізу представлено в [15].

Для прийняття рішення про вид модуляції розраховані значення кумулянтів порівнюються з теоретичними. Для цього найбільшого розповсюдження набули метод мінімальної метрики, метод опорних векторів, метод дерева рішень та нейронні мережі [4–14]. Кожен із підходів має свої переваги та недоліки. Так, метод дерева рішень дозволяє зменшити розрахункову складність при розпізнаванні великої кількості модуляцій за рахунок виключення із розрахунків кумулянтів, що не відповідають прийнятим на попередніх етапах рішенням [6]. Однак при зміні кількості видів модуляцій, що розпізнаються, необхідно заново перебудувати алгоритм прийняття рішення. Методи на основі опорних векторів та нейронних мереж потребують наявних тренувальних вибірок даних для розрахунку координат роздільних гіперплощин та конфігурування нейронної мережі [7–8; 16]. При використанні методу мінімальної метрики формується вектор розрахованих кумулянтів та здійснюється пошук мінімальної просторової відстані до векторів з відомими значеннями кумулянтів різних видів модуляцій [5]. Даний метод передбачає розрахунок всієї сукупності кумулянтів, що використовуються в алгоритмі розпізнавання, тому він має вищу розрахункову складність порівняно із методом дерева рішень. Однак, при зміні множини видів модуляцій, що розпізнаються, (наприклад додавання нового виду модуляції), на відміну від інших підходів, алгоритм розпізнавання на основі методу мінімальної метрики практично не потребує зміни (по-

трібно лише додати нові значення кумулянтів до еталонного алфавіту). Вказані особливості повинні враховуватись при виборі методу прийняття рішень конкретно для кожного випадку побудови алгоритму розпізнавання з урахуванням обчислювальних можливостей системи розпізнавання, вимог до ймовірності правильного розпізнавання, наявних тренувальних послідовностей, можливостей подальшої модернізації та інших початкових даних проектування [19].

Отже загальна методика синтезу алгоритмів розпізнавання модуляції сигналів на основі кумулянтного аналізу має включати такі етапи:

вибір оптимальної сукупності кумулянтів для забезпечення заданої ймовірності правильного розпізнавання та мінімальної розрахункової складності;

вибір методу прийняття рішення про вид модуляції враховуючи початкові дані проектування;

синтез алгоритму розпізнавання відповідно до вимог обраного методу прийняття рішення.

Висновки

Застосування кумулянтного аналізу при розпізнаванні виду модуляції сигналу на фоні адитивного гауссівського шуму дозволяє отримати високу ймовірність правильного розпізнавання при порівняно невеликій розрахунковій складності. З використанням спеціалізованого програмного забезпечення отримано аналітичні вирази для розрахунку змішаних кумулянтів до восьмого порядку включно на основі значень змішаних початкових моментів. Розширено можливості прикладного пакету статистичних функцій «Statistics Toolbox» інтерактивного середовища програмування MATLAB шляхом розроблення програмних модулів для розрахунку змішаних кумулянтів різних порядків та розраховано значення змішаних кумулянтів для найбільш розповсюджених фазових сузір'їв лінійної цифрової модуляції. Розроблено загальну методика синтезу алгоритмів розпізнавання виду модуляції на основі кумулянтного аналізу. Наступні роботи в даному напрямку доцільно спрямувати на дослідження можливостей кумулянтного аналізу для розпізнавання інших видів цифрової модуляції, зокрема сигналів з ортогональним частотним розділенням сигналів.

Список літератури

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; 4-е изд. испр. – М.: РиС, 2015. – 640 с.
2. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). Report ITU-R SM.2152. – Geneva : ITU, 2009 – 3 p.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая связь / А.Б. Сергиенко. – СПб.: ГЭТИ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
4. Zhu Z. Automatic modulation classification principles, algorithms and applications / Z. Zhu, K. Nandi. – London: John Wiley & Sons, 2015. – 194 p.

5. Thakur P. Trends in automatic modulation classification for advanced data communication networks / P. Thakur, S. Madan, M. Madan // *International journal of advanced research in computer engineering & technology*. – 2015. – Vol. 4. – 12 p.
6. Steiner M.P. Spectrum Sensing and Blind Automatic Modulation Classification in Real Time. Master of science in electrical and computer engineering / M.P. Steiner. – Blacksburg, Virginia. – 2011. – 75 p.
7. Cutno P. Automatic modulation classifier a blind feature-based tool: A thesis submitted for the degree of Master of Science / P. Cutno. – Ohio, 2016. – 40 p.
8. Smith A. Modulation classification of satellite communication signals using cumulants and neural networks / A. Smith, M. Evans, J. Downey // *Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop*. – Cleveland. – 2017. – 8 p.
9. Ebrahimzadeh A. An expert system for digital signal type classification / A. Ebrahimzadeh, M. Ebrahimzadeh // *Electrical engineering*. – 2007. – Vol. 58, № 6. – P. 334-341.
10. Pennacchio A. Eigenfilter-based automatic modulation classification with offsets for distributed antenna systems / A. Pennacchio, J. Costa, V. Bordini, G. Gado, S. Silva // *XXXIV Simposio Brasileiro de telecomunicacoes e processamento de sinais*. – Para. – 2016. – P. 260-261.
11. Muehlhau M. A novel algorithm for MIMO signal classification using higher-order cumulants / M. Muehlhau, M. Oener, O. Dobre, U. Jaekel, F. Jondral // *Radio and wireless symposium*. – Austin. – 2013. – 3 p.
12. Shi Q. Modulation classification for asynchronous high-order QAM signals / Q. Shi, Y. Gong, Y. Guan // *Wireless communications and mobile computing*. – 2011. – P. 1415-1422.
13. Zaerin M. Multiuser modulation classification based on cumulants in AWGN channel / M. Zaerin, B. Seyfe. – Tehran: Telecommunication Research Center, 2009. – 25 p.
14. Su W. Higher-order blind signal feature separation: an enabling technology for battlefield awareness / W. Su, J. Kosinski // U. S. Army CECOM Research Development and Engineering Center. – Monmouth, 2006. – 7 p.
15. Нагорнюк А.А. Оптимизация набора кумулянтов для распознавания типа фазового созвездия сигналов с цифровой линейной модуляцией / А.А. Нагорнюк, А.А. Писарчук // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – Харків: ХУПС. – 2014. – Вип. 1(14). – С. 147-151.
16. Ebrahimzadeh A. Digital signal types identification using a hierarchical SVM – based classifier and efficient features / A. Ebrahimzadeh, S. Seyedin // *Computing: Theory and Applications*. – 2007. – P. 521-525.
17. Matlab R2014b. Programming Fundamentals. – Natick: MathWorksc, 2014. – 100 p.
18. Ingle V.K. Digital signal processing using Matlab / V.K. Ingle, J.G. Proakis. – Stamford: Cengage learning, 2012. – 652 p.
19. Zaki M. Data Mining and Analysis: Fundamental Concepts and Algorithms / M. Zaki, W. Meira. – Cambridge University, 2013. – 651 p.

References

1. Remboskiy, A.M., Ashykhmin, A.V. and Kozmin, V.A. (2015), “Radiomonitoring: zadatchi, metody, sredstva” [*Radiomonitoring: tasks, methods, means*], RiC, Moscow, 640 p.
2. International telecommunication union (2009), *Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*, Geneva, 3 p.
3. Sergienko, A.B. (2012), “Cyfrovaja sviaz” [*Digital communication*], GETI “LETI”, St. Petersburg, 164 p.
4. Zhu, Z. and Nandi, K. (2015), *Automatic modulation classification principles, algorithms and applications*, John Wiley & Son, London, 194 p.
5. Thakur P., Madan, S. and Madan, M. (2015), Trends in automatic modulation classification for advanced data communication networks, *International journal of advanced research in computer engineering & technology*, Vol. 4, 12 p.
6. Steiner, M. (2011), *Spectrum Sensing and Blind Automatic Modulation Classification in Real Time: dissertation*, Virginia, 75 p.
7. Cutno, P. (2016), *Automatic modulation classifier a blind feature-based tool: dissertation*, Ohio, 40 p.
8. Smith, A., Evans, M. and Downey, J. (2017), Modulation classification of satellite communication signals using cumulants and neural networks, *Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop*, 8 p.
9. Ebrahimzadeh, A. and Ebrahimzadeh, M. (2007), An expert system for digital signal type classification, *Electrical engineering*, Vol. 58, No. 6, pp. 334-341.
10. Pennacchio, A., Costa, J., Bordini, V., Gado, G. and Silva, S. (2016), Eigenfilter-based automatic modulation classification with offsets for distributed antenna systems, *XXXIV Simposio Brasileiro de telecomunicacoes e processamento de sinais*, Para, pp. 260-261.
11. Muehlhau, M., Oener, M., Dobre, O., Jaekel, U. and Jondral, F. (2013), A novel algorithm for MIMO signal classification using higher-order cumulants, *Radio and wireless symposium*, Austin, 3 p.
12. Shi, Q., Gong, J. and Guan, Y. (2011), Modulation classification for asynchronous high-order QAM signals, *Wireless communications and mobile computing*, pp. 1415-1422.
13. Zaerin, M. and Seyfe, B. (2009), *Multiuser modulation classification based on cumulants in AWGN channel*, Tehran, 25 p.
14. Su, W. and Kosinski, J. (2006), Higher-order blind signal feature separation: an enabling technology for battlefield awareness, *U. S. Army CECOM Research Development and Engineering Center*, 2006, 7 p.

15. Nahorniuk, A.A. and Pysarchuk, O.O. (2014), "Optimizatsia nabora cumulantov dlia raspoznavania tipa fazovogo sozvezdia signalov s cifrovoj linejnoy modulaciej" [Subset cumulants optimization for phase constellation recognition of signals with linear digital modulation], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1 (14), pp. 147-151.
16. Ebrahimzadeh, A. and Seyedin, S. (2007), Digital signal types identification using a hierarchical SVM – based classifier and efficient features, *Computing: Theory and Applications*, 2007, pp. 521-525.
17. Matlab R2014b, (2014), *Programming Fundamentals*, MathWorksc, Natick, 100 p.
18. Ingle, V.K. and Proakis, J.G. (2012), *Digital signal processing using Matlab*, Cengage learning, Stamford, 652 p.
19. Zaki, M. and Meira, W. (2013), *Data Mining and Analysis: Fundamental Concepts and Algorithms*, Cambridge University, 651 p.

Надійшла до редколегії 16.04.2018

Схвалена до друку 15.05.2018

Відомості про автора:

Нагорнюк Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник Житомирського
військового інституту ім. С.П. Корольова,
Житомир, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7680-7201>

Information about the author:

Alexander Nahorniuk

Doctor of Philosophy
Lead Researcher of Zhytomyr Military Institute
named after S.P. Koroliyov,
Zhytomyr, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-7680-7201>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КУМУЛЯНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.А. Нагорнюк

В статье обоснована актуальность усовершенствования методов распознавания видов цифровой модуляции телекоммуникационных систем. Проведен анализ известных подходов к распознаванию вида модуляции на основе статистических величин высших порядков. Показано, что в качестве модуляционных признаков для распознавания видов модуляции могут использоваться смешанные кумулянты высших порядков, которые позволяют синтезировать алгоритмы распознавания цифровых радиосигналов на фоне гауссова шума с вероятностью правильного распознавания, близкой к единице. Получены аналитические выражения расчета смешанных кумулянтов через величины смешанных моментов до восьмого порядка включительно и значения смешанных кумулянтов для наиболее распространенных видов радиосигналов с цифровой линейной модуляцией. Расширены возможности прикладного пакета статистических функций «Statistics Toolbox» интерактивной среды программирования MATLAB. Разработаны рекомендации для синтеза алгоритмов распознавания вида модуляции на основе кумулянтного анализа. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов распознавания сигналов в системах радиомониторинга, программноопределяемого радио и радиоэлектронной борьбы.

Ключевые слова: телекоммуникационная система, радиосигнал, манипуляция, фазовое созвездие, метод, распознавание, статистика, кумулянт, момент.

USE OF CUMULANT ANALYSIS FOR RECOGNITION OF RADIOSIGNALS OF DIGITAL TELECOMMUNICATION SYSTEMS

O. Nahorniuk

Actuality of improving of the methods for recognition of digital modulation of telecommunication systems is substantiated in the article. The analysis of known approaches to recognition of the type of modulation on the basis of statistical quantities of higher orders is carried out. It is shown that as modulation features for modulation types recognition can be used higher orders joint cumulants, which allow to synthesize algorithms for digital radio signals recognition against the background of Gaussian noise with a probability of correct recognition close to one. Analytical expressions for the calculation of joint cumulants up to the eighth order inclusive from the values of joint moments for the most common types of radio signals with digital linear modulation are obtained. The means of the statistical functions application toolbox "Statistics Toolbox" of the interactive programming environment MATLAB are extended. The procedures of joints cumulants calculation are optimized to minimize the number of mathematical operations. Recommendations for the synthesis of algorithms for modulation type recognition based on cumulant analysis are developed. The obtained results can be used to develop algorithms for signal recognition in radio monitoring systems, software-defined radio and electronic warfare.

Keywords: telecommunication system, radio signal, modulation, phase constellation, method, recognition, statistics, cumulant, moment.