

УДК 621.396.67

А.А. Нагорнюк, А.А. Писарчук

*Житомирский военный институт им. С.П. Королева
Государственного университета телекоммуникаций, Житомир*

ОПТИМИЗАЦИЯ НАБОРА КУМУЛЯНТОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПА ФАЗОВОГО СОЗВЕЗДИЯ СИГНАЛОВ С ЦИФРОВОЙ ЛИНЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В статье поданы результаты оптимизации набора кумулянтов для распознавания формы фазовых созвездий сигналов с цифровой линейной модуляцией. Оптимизация осуществлена путем исследования вероятностных характеристик способа распознавания типа фазового созвездия, основанного на кумулянтном анализе сигналов, в соответствии с эвристическим методом полного перебора и методом статистических испытаний Монте-Карло. Получены оптимальные наборы кумулянтов для обеспечения заданных показателей эффективности системы распознавания вида модуляции, а также статистические вероятности правильного распознавания.

Ключевые слова: *распознавание модуляции, кумулянтный анализ, линейная цифровая модуляция, оптимизация, фазовое созвездие.*

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время широкое распространение получили коммуникационные системы с программно определяемой архитектурой (cognitive radio) [1]. В таких системах применяются виды сигналов с адаптивной модуляцией для обеспечения наилучшей спектральной эффективности передачи данных и максимальной канальной емкости. При пакетной передаче данных вид модуляции каждого пакета определяется в соответствии с качеством канала связи и требованиями к частоте появления ошибочных битов. Основными видами модуляции, которые используются в системах с программно определяемой архитектурой, есть разновидности линейной цифровой модуляции [1]. Радиосигналы с данными видами модуляций формируются на основе комплексных символов, принадлежащих к выбранному фазовому созвездию, форма которого зависит от кратности манипуляции и способа размещения информационных символов в созвездии [2].

В системах радиомониторинга для распознавания типа фазового созвездия сигнала все чаще используется математический аппарат статистики высших порядков, а особенно кумулянтный анализ [3 – 10]. Основными его преимуществами есть простота реализации алгоритмов распознавания, равенство нулю кумулянтов третьего и выше порядков для гауссового белого шума и сравнительно малая зависимость от ошибок частотной и тактовой синхронизации [8]. Поэтому развитие способов распознавания видов модуляции на основе кумулянтного анализа сигналов есть перспективным научным направлением.

Анализ литературы. В статьях [3 – 5] предложен способ распознавания типа фазового созвездия на основе кумулянтов четвертого порядка и метода дерева решений, в работах [6 – 8] используются кумулянты до восьмого порядка включительно и метод опорных векторов. В [9] для улучшения вероятности правильного распознавания предложен кумулянтный анализ модифицированных сигнальных созвездий и метод поиска минимальной метрики между рассчитанными и теоретически известными значениями кумулянтов. В [10] для принятия решения о виде модуляции на основе полученного набора кумулянтов используются нейронные сети. Основными недостатками существующих подходов есть ограниченное количество распознаваемых видов модуляций, а также отсутствие математически обоснованного подхода к выбору кумулянтов, значения которых используются для принятия решения о форме фазового созвездия сигнала.

Целью данных исследований есть оптимизация множества кумулянтов для распознавания заданных типов фазовых созвездий сигналов с линейной цифровой модуляцией.

Постановка задачи

Входными данными для распознавания вида цифровой линейной модуляции есть одномерный массив комплексных отсчетов сигнала r_k , $k=0..K-1$, полученных после квадратурного преобразования, дискретизации во времени с частотой F_s и квантования по уровню сигнальной смеси с выхода радиоприемного устройства, осуществления синхронизации по несущей и тактовой частотам, компенсации влияния канала распространения, децимации [11]. Отсчеты r_k на комплексной плоскости образуют фа-

зовое созвездие. В зависимости от вида линейной цифровой модуляции, а также особенностей формирования сигнала, на практике широко применяются следующие типы фазовых созвездий [9, 12]:

для амплитудной манипуляции (АМн) – АМн-2, АМн-4, АМн-8, АМн-16;

для фазовой манипуляции (ФМн) – ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16;

для квадратурной амплитудной манипуляции (КАМн) – КАМн-16, КАМн-32, КАМн-64, КАМн-128, КАМн-256, КАМн-v29-8, КАМн-v29-16, КАМн-v29-32, КАМн-star-8, КАМн-16в, КАМн-32в, КАМн-64в.

Цифры в конце аббревиатур приведенных типов фазовых созвездий указывают количество точек в созвездии, а буквы – нестандартную форму созвездия [9].

Поскольку тактовая и частотная синхронизация считаются реализованными на предварительных этапах обработки сигнала [2], то задача распознавания вида линейной цифровой модуляции сводится к распознаванию формы фазового созвездия сигнала [9].

Распознавание типа фазового созвездия на основе кумулянтного анализа осуществляется путем расчета смешанных кумулянтов разных порядков C_{pq} по формулам (1, 2) и сравнение их с теоретически известными значениями [3 – 10].

$$C_{pq} = \text{Cum} \left[\underbrace{r_k, \dots, r_k}_{p-q}, \underbrace{r_k^*, \dots, r_k^*}_q \right]; \quad (1)$$

$$C_n = \text{Cum}(r_1, r_2, \dots, r_n) = \sum_{\forall g} (-1)^{g-1} (g-1)! E \left[\prod_{j \in \mathcal{G}_1} r_j \right] \dots E \left[\prod_{j \in \mathcal{G}_q} r_j \right], \quad (2)$$

где Cum – оператор расчета кумулянта; r_k^* – сопряженное значение комплексного числа r_k ; $E(\cdot)$ – операция усреднения; $\mathcal{G} = (v_1, v_2, \dots, v_g)$ – множество всех возможных разложений для набора индексов $g = (1, 2, \dots, n)$.

При распознавании формы фазового созвездия используются смешанные кумулянты до восьмого порядка включительно [3-10]: $C_{20}, C_{21}, C_{40}, C_{41}, C_{42}, C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}$.

Расчет полного набора кумулянтов (четырнадцать единиц) требует значительных расходов вычислительных ресурсов и делает невозможной реализацию процесса распознавания в реальном времени [9]. Поэтому возникает необходимость оптимизировать совокупность кумулянтов с целью уменьшения расчетной сложности при условии обеспечения заданных показателей эффективности системы распознавания. Такую задачу можно интерпретиро-

вать как задачу оценивания информативности системы признаков, которая имеет следующую математическую формулировку.

Пусть получено множество кумулянтов разных порядков $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, которое есть избыточной совокупностью. Необходимо из n кумулянтов выбрать v наиболее информативных по заданному критерию, причем $v \leq n$. Совокупность выбранных кумулянтов должна удовлетворять следующим требованиям [13]:

Множество $C = \{C_1, C_2, \dots, C_v\}$ должно иметь достаточную информативность, то есть добавление к нему какого-нибудь признака не должно приводить к значительному изменению заданного критерия;

размерность совокупности выбранных кумулянтов должна быть наименьшей с целью минимизации расчетной сложности системы распознавания;

при одинаковой размерности набора кумулянтов порядок входящих в него кумулянтов должен минимальным.

Набор кумулянтов, который удовлетворяет выше перечисленным требованиям, будет оптимальным [13], а его поиск есть задачей данных исследований.

Изложение основного материала

В настоящее время существуют разные подходы к анализу информативности системы признаков: эвристический, информационный, статистический, вероятностный, нейросетевой [13]. Однако, принимая во внимание тот факт, что априорная информация о типе фазового созвездия, а также его вероятностные характеристики в системах радиомониторинга отсутствуют, то для оптимизации можно применить лишь эвристический или статистический подходы.

Поэтому для оптимизации набора кумулянтов выбран эвристический метод полного перебора всех возможных комбинаций признаков, который есть наиболее точной процедурой выбора информативности признаков [13], а также метод статистических испытаний Монте-Карло [14].

Число возможных наборов кумулянтов при полном переборе можно определить, используя математический аппарат комбинаторики [15]:

$$N_{\text{set}} = \sum_{m=1}^n C_m^n, \quad (3)$$

где $n=14$ – количество кумулянтов; C_m^n – сочетания из n элементов по m .

Применив формулу (3) получим число возможных наборов кумулянтов – $N_{\text{set}} = 16383$, что позволяет реализовать процесс оптимизации с использованием современной вычислительной техники.

Так как самым важным показателем функционирования системы распознавания вида модуляции есть вероятность правильного распознавания, то ее целесообразно принять в качестве основного критерия оптимизации. В таком случае полезность конкретного кумулянта в исходной совокупности n кумулянтов определяется по приросту вероятности ошибки правильного распознавания P_e (ошибка первого рода) при исключении данного кумулянта из исходной совокупности.

Принимая во внимание вышесказанное, критерий оптимальности при выборе набора кумулянтов состоит из следующих требований:

вероятность правильного распознавания типа фазового созвездия должна быть не меньше установленной P_{cm} , а в случае невозможности ее достижения – максимальной;

размерность набора кумулянтов должна быть минимальной, а порядок кумулянтов, входящих в данную совокупность, – наименьшим.

В качестве решающего правила для принятия решения в процессе оптимизации применен метод минимальной метрики, который определяет пространственные расстояния (метрику) между рассчитанным набором кумулянтов и наборами кумулянтов известного алфавита модуляций [8]. Преимуществами данного метода есть простота реализации и возможность расширения алфавита известных видов модуляции без существенного изменения разработанного способа распознавания (нужно лишь внести новые значения кумулянтов в эталонный набор) [9]. На практике широкое применение нашли метрики Минковского первого порядка (Манхэттенское расстояние) и второго порядка (расстояние Евклида) [9]. Однако Манхэттенское расстояние d_m более стойкое к влиянию отдельных больших разниц (выбросов) [9] и рассчитывается по формуле [16]:

$$d_m = \sum_{n=1}^N |C_n - C_n^m|. \quad (4)$$

Учитывая выше предложенный оптимизационный критерий, а также применив эвристический метод полного перебора и метод статистических испытаний, разработана схема программной оптимизации набора кумулянтов, представленная на рис. 1.

В основу схемы заложена вероятностная модель, связывающая искомую величину вероятности правильного распознавания типа фазового созвездия с параметрами сигнала и канала связи, математические модели которых поданы в [2, 12]. Математической основой данной модели есть усиленный закон больших чисел в форме Колмогорова: для того, чтобы среднее арифметическое независимых реализаций случайной величины сходилось с вероятностью единицы к ее математическому ожиданию необхо-

димо и достаточно, чтобы ее математическое ожидание существовало [17].

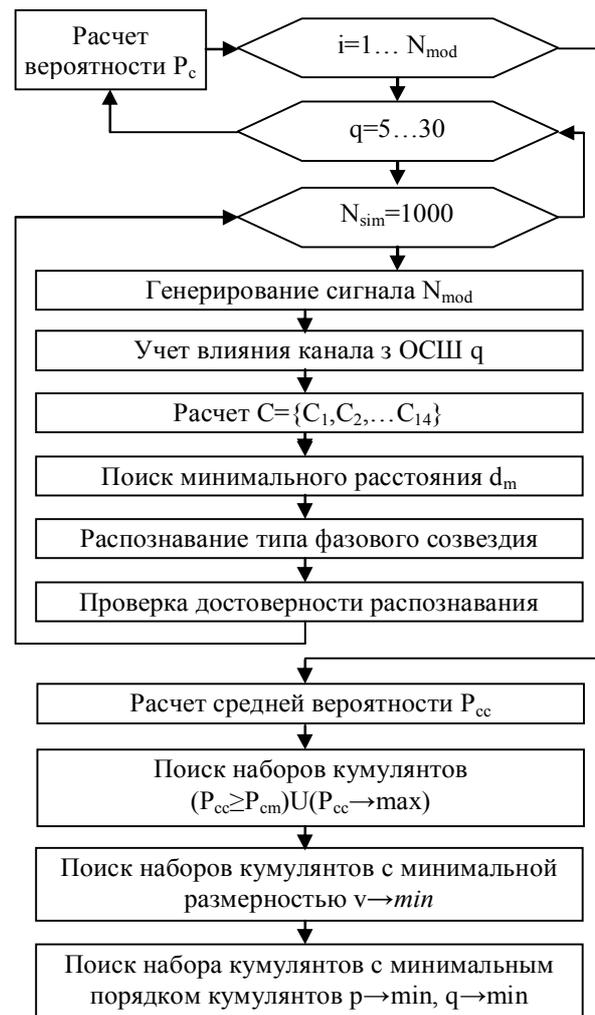


Рис. 1. Схема программной оптимизации набора кумулянтов для распознавания типа фазового созвездия сигналов

Функционально схема оптимизации состоит из четырех частей:

формирование сигнальных отсчетов для исследуемых типов фазовых созвездий, учет влияния канала связи, характеристики которого описываются гауссовой моделью и характеризуются конечным отношением сигнал/шум q (ОСШ);

распознавание типа фазового созвездия и определения достоверности проведенного распознавания;

накопление статистических данных и расчет массива вероятностей правильного распознавания, соответствующих возможным наборам кумулянтов;

поиск оптимального набора кумулянтов удовлетворяющего требованиям оптимизационного критерия.

В случае распознавания совокупности фазовых созвездий используется средняя вероятность правильного распознавания P_{cc} , которая для случая рав-

новероятных типов сигнальных созвездий определяется по формуле:

$$P_{cc} = \frac{1}{N_{mod}} \sum_{i=1}^{N_{mod}} P_c^{(i)}, \quad (5)$$

где $P_c^{(i)}$ – вероятность правильного распознавания i типа фазового созвездия;

N_{mod} – общее количество распознаваемых созвездий.

В результате проведения вычислительных экспериментов по схеме (рис. 1) для разных типов фазовых созвездий, а также их комбинаций, получены оптимальные наборы кумулянтов, которые представлены в табл. 1.

В таблице также приведены средние статистические вероятности правильного распознавания P_{cc} , соответствующие определенным наборам кумулянтов.

Таблица 1

Оптимальные наборы кумулянтов для распознавания типа фазового созвездия сигналов с линейной цифровой модуляцией

Вид модуляции	q, дБ							
	от 5		от 10		от 15		от 20	
	P_{cc}	Набор	P_{cc}	Набор	P_{cc}	Набор	P_{cc}	Набор
АМн-4	0,982	C60	1	C40	1	C40	1	C40
АМн-8	0,875	C60, C80, C84	1	C60	1	C60	1	C60
АМн-16	0,996	C84	1	C84	1	C60	1	C60
ФМн-2	1	C20	1	C20	1	C20	1	C20
ФМн-4	0,994	C82	1	C40	1	C40	1	C40
ФМн-8	0,984	C80	1	C80	1	C80	1	C60
ФМн-16	0,960	C42, c80	1	C42, C80	1	C42, C80	1	C42, C80
КАМн-16	0,993	C61	1	C61	1	C61	1	C40
КАМн-32	0,973	C82	1	C82	1	C82	1	C61
КАМн-64	0,813	C40, C61, C84	0,998	C82	1	C82	1	C61
КАМн-128	0,750	C40, C84	0,982	C40, C84	1	C40, C63	1	C82
КАМн-256	0,750	C82	0,923	C82	0,991	C61	1	C61
КАМн-16в	0,994	C61	1	C42	1	C42	1	C42
КАМн-32в	0,920	C61	1	C61	1	C61	1	C61
КАМн-64в	0,987	C60	1	C60	1	C60	1	C60
КАМн-v29-8	0,998	C40, C63	1	C40	1	C40	1	C40
КАМн-v29-16	0,989	C40	1	C40	1	C40	1	C40
КАМн-v29-32	0,987	C40	1	C40	1	C40	1	C20
КАМн-8-Star	0,991	C40	1	C40	1	C40	1	C40
АМн-м	0,854	C80, C84	0,992	C80, C84	1	C60	1	C60
ФМн-м	0,983	C80, C84	0,997	C42, C80	1	C42, C80	1	C42, C80
КАМн-м	0,818	C80, C82	0,984	C40, C80, C84	1	C40, C63	1	C82
Все виды	0,905	C42, C80, C82	0,987	C40, C80, C84	1	C40, C80, C84	1	C80, C82

Как видно из табл. 1 при больших значениях ОСШ, когда сигнальное созвездие малоискаженное, размерность набора кумулянтов для обеспечения оптимизационного критерия не превышает двух, а порядок самих кумулянтов зависит от количества и сложности распознаваемых фазовых созвездий.

Так для распознавания ФМн-2 нужно применить только кумулянт второго порядка C_{20} .

При уменьшении ОСШ размерность набора кумулянтов и их порядок увеличиваются, а средняя вероятность правильного распознавания уменьшается.

Выводы

Оптимизация набора кумулянтов в соответствии с эвристическим методом полного перебора и методом статистических испытаний Монте-Карло позволила уменьшить их число до трех при условии обеспечения заданных показателей эффективности системы распознавания вида модуляции сигнала. Это снизило расчетную сложность способа распознавания типа фазового созвездия и упростило требования, предъявляемые к вычислительным системам.

Последующие исследования в данном направлении следует направить на исследование оптимального набора кумулянтов при наличии ошибок тактовой и частотной синхронизации, а также искажений сигнала за счет его распространения в канале связи негауссового типа.

Список литературы

1. Doyle L. *The Essentials of Cognitive Radio* / L. Doyle. – Cambridge University Press, 2009. – 240 p.
2. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.* / Б. Скляр. Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Swami A. *Hierarchical digital modulation classification using cumulants* / A. Swami, M. Sadler // *IEEE transactions on communications*, vol. 48, 2000. – P. 234-246.
4. 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.*
5. Aslam M. *Automatic digital modulation classification using genetic programming with K-Nearest Neighbor* / M. Aslam, Z. Zhu, K. Nandi // *The 2010 Military communication conference. – Liverpool. – 2010. – P. 512-517.*
6. Ebrahimzadeh A. *A new signal type classifier for fading environment* / A. Ebrahimzadeh, G. Ardeshtir // *Journal of computation and information technology CIT 15, 2007. – P. 257-266.*
7. 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.*
8. Li J. *Automatic digital modulation recognition using feature subset selection* / Li J., Wang J., Fan X., Zhang Y. // *Progress in electromagnetics research symposium. – Hangzhou, 2008. – P. 351-354.*
9. Нагорнюк О.А. *Способ автоматизованого розпізнавання виду цифрової лінійної модуляції оснований на кумулянтному аналізі сигналів* / О.А. Нагорнюк, О.О. Писарчук // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки: зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2013. – Вип. 2 (67). – С. 67-76.*
10. Shermeh A. *An intelligent system for classification and communication formats using PSO* / A. Shermeh, R. Ghaderi // *Informatica Vol. 32, Issue 3, 2008. – P. 213-218.*
11. Горячкин О.В. *Вскрытие модуляционных параметров радиосигналов с неизвестной структурой* / О.В. Горячкин, А.А. Харитонова // *Инфокоммуникационные технологии – Т. 8, № 2. – Самара, 2010. – С. 65-72.*
12. Сергиенко А.Б. *Цифровая связь* / А.Б. Сергиенко. – СПб.: ГЭТИ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
13. *Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей. Монография* / [Дубровин В.И., Субботин С.А., Богуслаев А.В., Яценко В.К.]. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 279 с.
14. Mikhailov G. A. *Parametric estimates by the Monte Carlo method* / G. A. Mikhailov – Utrecht, Netherlands: VSP, 1999. – 376 p.
15. Черненко В.Д. *Высшая математика в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов: в 3 т.* / В.Д. Черненко – СПб.: Политехника, 2003. – Т. 3 – 476 с.
16. *Факторный, дискриминационный и кластерный анализы: пер. с англ. Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др.; под ред. И.С. Енюкова. – М. – 1989.*
17. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей. Изд. 4-е* / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

Поступила в редколлегию 13.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. В. П. Манойлов, Житомирський державний технологічний університет, Житомир.

ОПТИМІЗАЦІЯ НАБОРУ КУМУЛЯНТІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ФАЗОВОГО СУЗІР'Я СИГНАЛІВ З ЦИФРОВОЮ ЛІНІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

О.А. Нагорнюк, О.О. Писарчук

У статті подані результати оптимізації набору кумулянтів для розпізнавання форми фазових сузір'їв сигналів з цифровою лінійною модуляцією. Оптимізація здійснена шляхом дослідження ймовірнісних характеристик способу розпізнавання типу фазового сузір'я, основанийого на кумулянтному аналізі сигналів, відповідно до евристичного методу повного перебору і методу статистичних випробувань Монте-Карло. Отримано оптимальні набори кумулянтів для забезпечення заданих показників ефективності системи розпізнавання виду модуляції, а також статистична ймовірність правильного розпізнавання.

Ключові слова: розпізнавання модуляції, кумулянтний аналіз, лінійна цифрова модуляція, оптимізація, фазове сузір'я.

CUMULANTS SET OPTIMIZATION FOR RECOGNITION OF PHASE CONSTELLATION TYPE OF DIGITAL LINEAR MODULATION SIGNALS

O. A. Nahorniuk, O. O. Pysarchyk

The results of cumulants set optimization for recognition of phase constellations shape of linear digital modulation signals are given in the article. Optimization is carried out by research of probabilistic characteristic of phase constellation type recognition method based on the cumulant analysis of signals, in accordance with the heuristic method of exhaustive search and statistical tests Monte Carlo method. The optimal sets of cumulants for providing of the established efficiency indexes of the modulation type recognition system and statistical probabilities of correct recognition are got.

Keywords: modulation recognition, cumulant analysis, linear digital modulation, optimization, phase constellation.