

УДК 621.396

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-3-59-65

Научная статья

EDN: IGVRNI

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КУМУЛЯНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ QAM-МОДУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**В.К. Курбаналиев,
А.Е. Латышев, А.С. Якушев**
АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

Экспоненциальный рост объемов передаваемых данных требует разработки эффективных методов обработки и анализа сигналов, особенно в условиях априорной неопределенности. В данной статье представлен новый метод оценки смещения несущей частоты и начальной фазы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM) на основе кумулянтного анализа. В основе метода лежит использование свойств кумулянтов четвертого порядка, которые инвариантны к фазовым сдвигам. Разработан алгоритм, позволяющий точно определить значения несущей частоты и начальной фазы QAM-сигналов в условиях отсутствия априорной информации о параметрах сигнала. Экспериментальные результаты демонстрируют высокую точность и эффективность предложенного метода в задачах радиомониторинга и анализа радиочастотного спектра.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция (QAM), кумулянтный анализ, несущая частота, начальная фаза, априорная неопределенность, радиомониторинг

Original article

USING CUMULANT ANALYSIS TO RECOGNIZE QAM MODULATION UNDER CONDITIONS OF A PRIOR UNCERTAINTY

**V.C. KURBANALIEV,
A.E. LATYSHEV, A.S. YAKUSHEV**
CENTRAL RESEARCH RADIO ENGINEERING
INSTITUTE NAMED AFTER ACADEMICIAN
A.I. BERG

The exponential growth in the volume of transmitted data necessitates the development of efficient methods for signal processing and analysis, particularly under conditions of a priori uncertainty. This paper presents a novel method for estimating carrier frequency and initial phase offsets in quadrature amplitude modulation (QAM) signals based on cumulant analysis. The method leverages the properties of fourth-order cumulants, which are invariant to phase shifts. An algorithm is developed that enables accurate determination of carrier frequency and initial phase values for QAM signals in the absence of a priori information about signal parameters. Experimental results demonstrate the high accuracy and efficiency of the proposed method in radio monitoring and radio frequency spectrum analysis applications.

KEY WORDS: quadrature amplitude modulation (QAM), cumulant analysis, carrier frequency, initial phase, a priori uncertainty, radiomonitoring

ВВЕДЕНИЕ

Бурный рост цифровых технологий связи и внедрение новых стандартов передачи данных, таких как WLAN, DVB-C, DVB-T и MMDS, привели к значительному уплотнению радиочастотного спектра. Эта тенденция создает серьезные трудности для задач радиомониторинга и анализа радиочастотного спектра, особенно в условиях априорной неопределенности. В таких условиях точность обнаружения сигналов, оценки параметров и вида модуляции становится сложной задачей.

Несмотря на высокий интерес к проблеме определения вида модуляции и большое количество работ по данной тематике, опубликованных за последние 30 лет, основная их масса посвящена либо отдельным аспектам данной задачи, либо узкоспециализированным решениям, ориентированным на применение в цифровых приемниках. При этом нередко задача распознавания вида модуляции рассматривается в отрыве от оценки параметров сигнала (как правило, предполагается, что они известны), и предлагаемые алгоритмы не могут напрямую применяться в рамках рассматриваемых приложений. На основании этого можно заключить, что задача распознавания вида модуляции при неизвестных пара-

метрах сигнала на сегодняшний день в полной мере не решена.

Традиционные методы анализа сигналов, основанные на анализе спектральных характеристик, часто оказываются неэффективными в условиях наличия шума, многолучевого распространения и применения сложных видов модуляции, таких как M-QAM и OFDM. Возникает необходимость разработки новых методов и алгоритмов, способных эффективно идентифицировать структуру и параметры сигналов в сложной радиоэлектронной обстановке.

Кумулянтный анализ высокого порядка предлагает альтернативный подход, обладающий рядом преимуществ перед традиционными методами:

- робастность к шумам – кумулянты высокого порядка менее чувствительны к аддитивному гауссовскому шуму, что позволяет повысить точность оценки параметров сигналов в зашумленных условиях;
- чувствительность к нелинейным характеристикам – кумулянты способны извлекать информацию о нелинейной структуре сигналов, недоступную при анализе спектральных характеристик;
- эффективность для сложных видов модуляции – кумулянты позволяют идентифицировать сложные виды модуляции, такие как M-QAM, OFDM и др., что особенно актуально для современных радиосистем [1–3, 5, 6, 9–11, 13].

Целью данной работы является разработка алгоритма распознавания вида M-QAM-модуляции на основе кумулянтов высокого порядка, который способен эффективно работать в условиях априорной неопределенности относительно параметров сигнала.

Квадратурная амплитудная модуляция представляет собой один из классов полосовой цифровой модуляции, широко применяемых в настоящее время. QAM-сигнал общего вида на несущей частоте f_0 с начальной фазой θ_0 описывается следующим выражением:

$$S_{RF}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \left[\sum_{k=1}^N b_k \rho(\tau - (k-1)T_s - t_0) \right] e^{j(\theta_0 + \theta_0 t)} \right\}$$

где, $t \in [0:NT_s]$, E_s – величина, пропорциональная мощности сигнала, T_s – символьный период, t_0 – задержка распространения, $\rho(\tau)$ – сигнальный импульс, b_k – последовательность N комплексных чисел, выбранных из M-позиционного созвездия в соответствии с передаваемыми символами сообщения.

Принятый сигнал, искаженный шумами, в приемнике подвергается определенной обработке. Эти искажения носят случайный характер, поэтому задача определения параметров сигнала, как правило, должна решаться статистическими методами посредством синтеза выборочных оценок.

С учетом сказанного модель принятого сигнала выражается следующим образом:

$$r_{RF}(t) = S_{RF}(t) + n_{RF}(t),$$

где $n_{RF}(t)$ – аддитивный шум, t – непрерывное время.

Полученные в синфазном и квадратурном каналах отсчеты группируются в комплексные отсчеты r_k , (как показано на рис. 1) и описываются следующими выражениями:

$$\operatorname{Re}[r_k] = \sqrt{\frac{P}{2}} \cos(2\pi\Delta f t + \phi(t) + \Delta\theta) + n_r(t)$$

$$\operatorname{Im}[r_k] = \sqrt{\frac{P}{2}} \sin(2\pi\Delta f t + \phi(t) + \Delta\theta) + n_q(t),$$

где $\Delta f = f_0 - f_i$ отстройка несущей частоты (смещение несущей частоты из-за несоответствия между частотой гетеродина и несущей сигнала) и $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_i$ отстройка начальной фазы, f_i и θ_i частота и начальная фаза сигнала гетеродина. Наличие смещений фазы и частоты несущей приводит к отклонению сигналов от оптимального сочетания и, таким образом, к возникновению битовых ошибок из-за меняющегося во времени вращения, вызванного сдвигами фазы и частоты.

Для выполнения предварительной обработки необходимо получить оценку значения несущей частоты f_0 и оценку значения начальной фазы θ_0 .

Полученный комплексный сигнал $r_k = \operatorname{Re}[r_k] - j\operatorname{Im}[r_k]$ и комплексно-сопряженный с ним $\hat{r}_k = \operatorname{Re}[r_k] + j\operatorname{Im}[r_k]$ являются исходными данными для вычисления моментов и кумулянтов. Формулы вычисления кумулянтов высокого порядка подробно описаны в работах [4, 7, 8].

На рисунках 2–3 показаны зависимость кумулянтов от величины расстройки частоты и начальной фазы сигнала.

Анализ полученных значений кумулянтов позволяет утверждать, что информативность того или иного кумулянта о виде модуляции сигнала существенно зависит от отстроек Δf и $\Delta\theta$.

СМЕЩЕНИЕ ЧАСТОТЫ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ НЕСУЩЕГО СИГНАЛА

Смещение частоты несущего сигнала вызывает поворот каждой последующей точки сигнала относительно предыдущей на некоторый угол, пропорциональный смещению частоты.

Влияние смещения частоты можно интерпретировать с точки зрения фазы. Для данного смещения частоты Δf ошибка в градусах, которую это смещение частоты вызывает у символов, определяется выражением:

$$\theta_{\Delta f} = \Delta f T \times 360^\circ,$$

где T – длительность символа. Исходя из этого, можно рассчитать ошибку на выборку N как

$$\theta_{\Delta f} = \frac{\Delta f}{f_s} \times 360^\circ \times N.$$

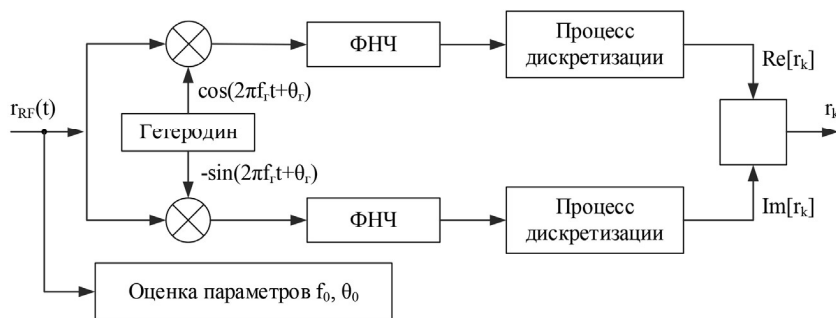


РИС. 1.

Схема предварительной обработки сигнала

Например, если сдвиг частоты гетеродина приемника и несущей частоты сигнала равен $\Delta f = 34$ кГц, то вращение фазы, выбранное из-за этого смещения частоты, будет равно $\theta_{\Delta f} = \frac{34 \times 10^3}{2,5 \times 10^3} \cdot 360^\circ = 0,004896^\circ$, частота дискретизации $f_s = 2,5$ ГГц.

Для информационного сигнала с длительностью $N = 4096$ отсчетов общая ошибка поворота фазы составит порядка 20° .

В результате смещения начальной фазы несущего сигнала все созвездие сигнала поворачивается по часовой стрелке в случае положительного смещения фазы и против часовой стрелки в случае отрицательного смещения фазы.

На рис. 4 представлены фазовые созвездия сигнала 16-QAM: А – без смещения частоты и начальной фазы, Б – смещение частоты равно 34 кГц, но без смещения начальной фазы, В – смещение начальной фазы равно 20° , но без смещения частоты, Г – смещение частоты равно 34 кГц и смещение начальной фазы равно 20° , количество анализируемых отсчетов $N = 4096$, ОСШ = 30 дБ.

Оценка значения несущей частоты и начальной фазы играет важную роль в задаче распознавания видов цифровой модуляции. Основной принцип распознавания видов модуляции с помощью кумулянтов высокого порядка – сравнение найденных значений кумулянтов для полученного сигнала с эталонными значениями при минимальных расстройках.

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма распознавания видов модуляции при неизвестном значении несущей частоты и начальной фазы.

Оценка значений несущей частоты и начальной фазы производится в два этапа. Первым этапом является устранение расстройки несущей частоты с помощью модуля кумулянта $C_{4,0}$.

На рис. 6 представлена зависимость модуля кумулянта $C_{4,0}$ от абсолютного изменения фазы сигнала и зависимость действительной части кумулянта $C_{4,0}$ от изменения начальной фазы для сигналов с M-QAM модуляциями.

Как показано на рис. 6А максимальное значение модуля кумулянта $C_{4,0}$ достигается при нулевой расстройке несущей частоты для выбранных видов цифровой модуляции, и минимальное значение действительной части кумулянта $C_{4,0}$ достигается при нулевой расстройке начальной фазы выбранных видов цифровой модуляции.

Процесс распознавания при неизвестных значениях частоты и начальной фазы несущего сигнала проводится следующим образом. Сначала оценивается значение несущей частоты получаемого сигнала $S_{RF}(t)$.

Оценка значения частоты несущего сигнала заключается в том, по значениям оцифрованных отсчетов устраняют расстройку по несущей частоте входного сигнала, для чего производится принудительная расстройка его частоты с фиксированным шагом, задаваемым в диапазоне ожидаемых значений частоты, с расчетом значения модуля кумулянта $C_{4,0}$. Критерием минимальной расстройки является максимальное значение модуля кумулянта.

Диапазон ожидаемой расстройки имеет нижнюю F_{\min} и верхнюю F_{\max} границы. Шаг расстройки Δ_f выбирается равным:

$$\Delta_f = \frac{\Delta \varphi}{2\pi T}$$

где $\Delta \varphi$ – абсолютное изменение фазы сигнала за время T_s , выбираемое в интервале (0,1, 0,2) рад.

Расстройка по частоте осуществляется поэлементным умножением массива отсчетов входного сигнала на функцию s_{Δ} .

$$s_0 = S_{RF}(t) \times s_{\Delta}$$

$$\text{где } s_{\Delta} = e^{j \times 2\pi f_{\Delta} t}, f_{\Delta} = F_{\min}, F_{\min} + \Delta_f, F_{\min} + 2\Delta_f, \dots, F_{\max}.$$

Для каждого сигнала s_0 производится расчет кумулянта $C_{4,0}$ по формуле:

$$C_{4,0} = m_{4,0} - 3m_{2,0}^2,$$

где $m_{n,r} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i^{n-r} \times \hat{s}_i^r$ совместный момент порядка

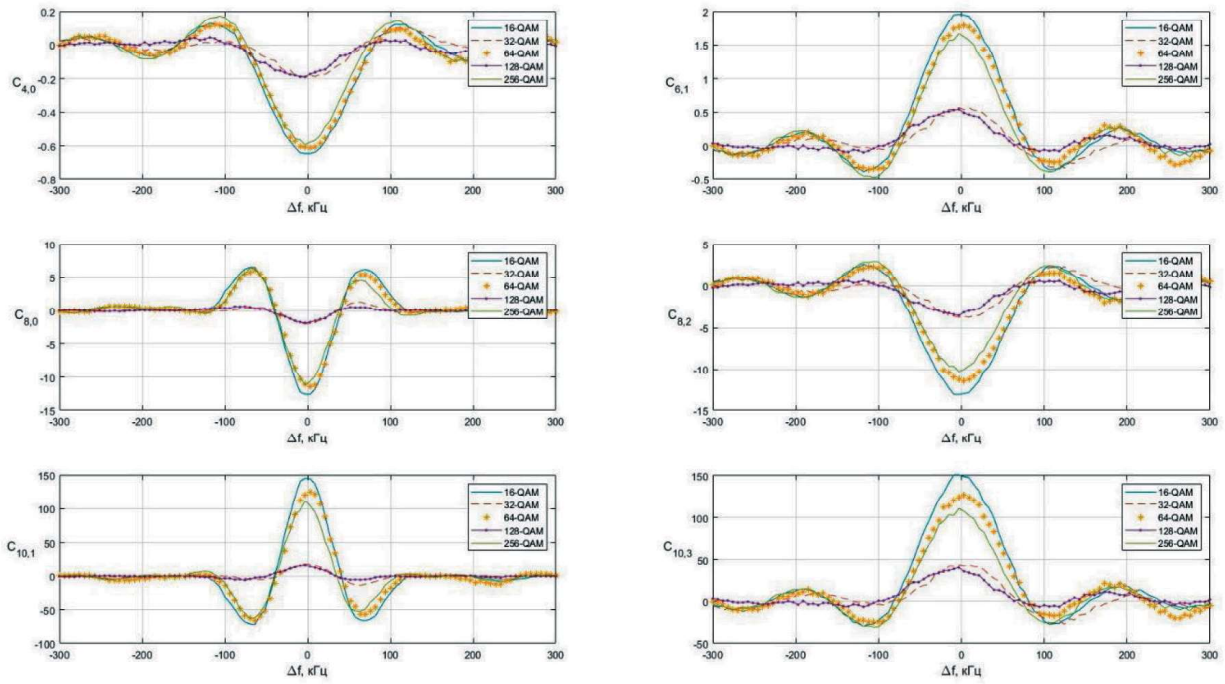


РИС. 2.
Зависимость значений кумулянтов от расстройки по частоте

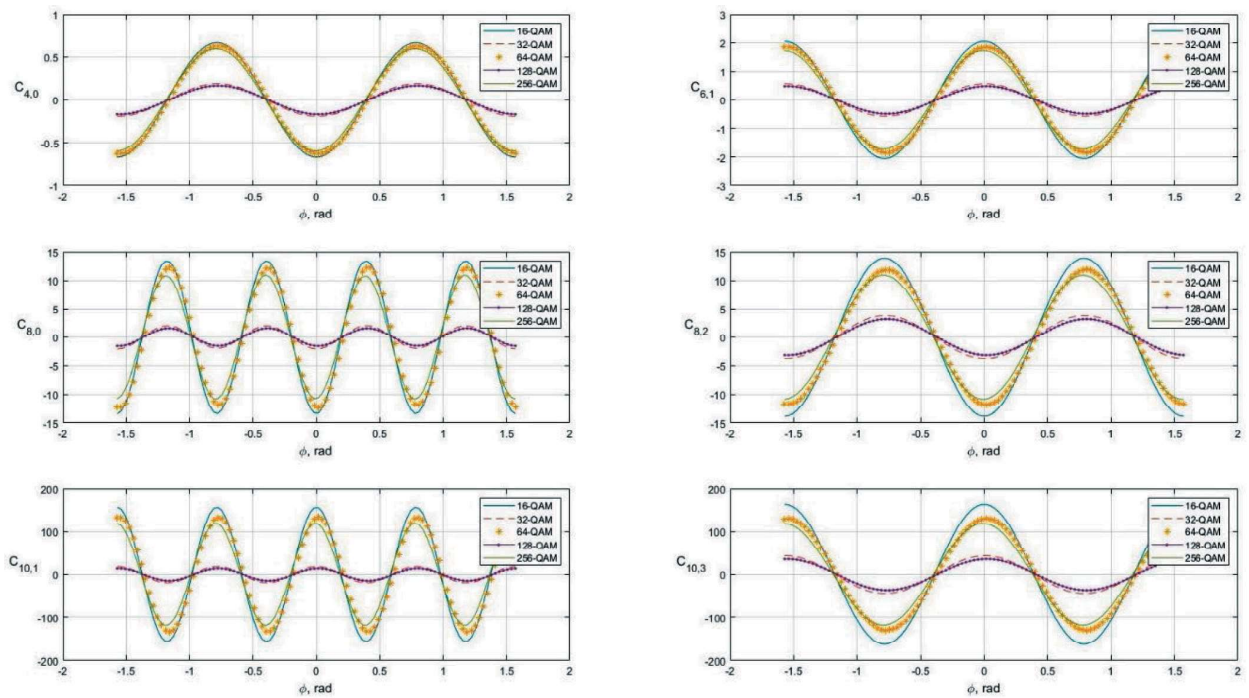


РИС. 3.
Зависимость значений кумулянтов от расстройки значения начальной фазы

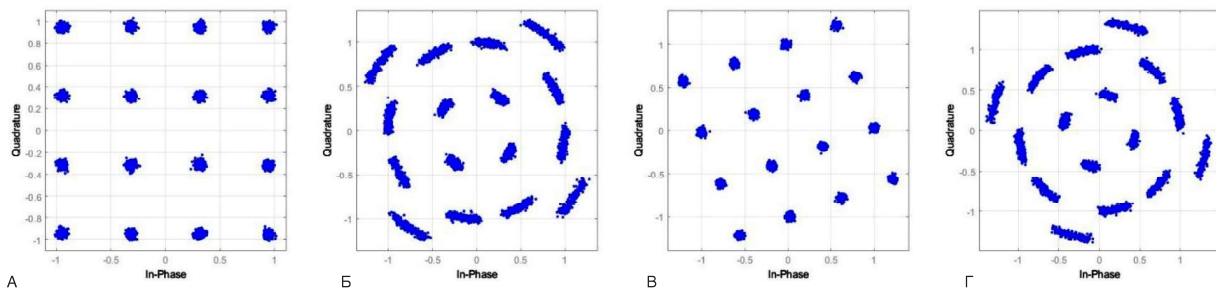


РИС. 4.

Фазовое созвездие сигнала 16-QAM: А) $\Delta f=0, \Delta\theta=0$, Б) $\Delta f= 34$ кГц, $\Delta\theta = 0$, В) $\Delta f=0, \Delta\theta=20^\circ$, Г) $\Delta f= 34$ кГц, $\Delta\theta = 20^\circ$



РИС. 5.

Блок-схема алгоритма определения видов цифровой модуляции при неизвестном значении несущей частоты

n ; s – исходный сигнал, \hat{s} – сопряженный ему; N – количество отсчетов сигнала.

Методом полного перебора значений расстройки из заданного диапазона значений определяется расстройка, которой соответствует значение модуля кумулянта $C_{4,0}$. Сигнал, соответствующей данной расстройке, обозначается $s_{\text{вых}}$ и используется на последующем этапе.

На втором этапе производится оценка значения начальной фазы с помощью значения действительной части кумулянта $C_{4,0}$.

Процедура определения начальной фазы сигнала идентична с предыдущим шагом, только критерием минимальной расстройки по фазе является минимальное значение действительной части кумулянта $C_{4,0}$.

Каждая i -я система, $i=1, M$, отличается тем, что в ней высокочастотный сигнал умножается на $\sin(2\pi\Delta f t + \Delta\theta \times (i-1))$ и $\cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta \times (i-1))$, необходимых для получения наборов $Re[r_k]$, $Im[r_k]$ данных каждой i -й системы. Наиболее точное распознавание выпол-

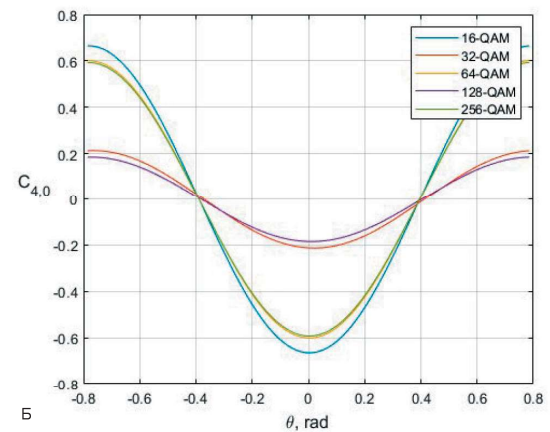
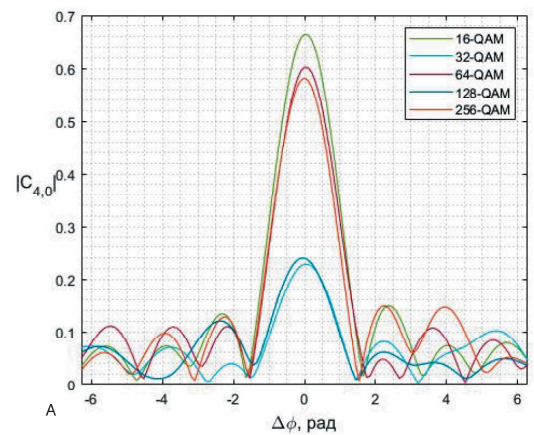


РИС. 6.

А – зависимость модуля кумулянта $C_{4,0}$ от изменения абсолютного значения фазы сигнала, Б – зависимость действительной части кумулянта $C_{4,0}$ от изменения начальной фазы сигнала

нит та система, у которой фаза $\Delta\theta \times (i-1)$ будет наиболее близка к начальной фазе принимаемого несущего сигнала $S_{RF}(t)$.

Для сигнала с устраненной расстройкой по несущей частоте и начальной фазой рассчитывают ку-

мулянтные признаки для принятия решения о виде цифровой модуляции сравнивая с эталонными значениями. Для этого наибольшее распространение получили методы, основанные на машинном обучении, в частности, метод опорных векторов, метод дерева решений и нейронные сети.

Следовательно, общая методика синтеза алгоритмов распознавания модуляции сигналов в условиях априорной неопределенности должна включать следующие этапы:

- оценка и устранение расстройки несущей частоты;
- оценка и устранение смещения начальной фазы;
- выбор метода принятия решения о виде модуляции с учетом начальных данных проектирования;
- синтез алгоритма распознавания в соответствии с требованиями выбранного метода принятия решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована эффективность применения кумулянтного анализа для распознавания M-QAM-модуляции в условиях априорной неопределенности. Разработан алгоритм, позволяющий оценить значения несущей частоты и начальной фазы сигнала на фоне аддитивного гауссовского шума. С помощью специализированного программного обеспечения были построены зависимости значений кумулянтов от расстройки как по частоте, так и по начальной фазе. Экспериментальные результаты подтверждают, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую вероятность правильного распознавания вида модуляции при сравнительно небольшой вычислительной сложности.

Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области кумулянтного анализа сигналов. В частности, представляется целесообразным исследовать возможности кумулянтного анализа для распознавания других видов цифровой модуляции, таких как OFDM, PSK и FSK. Важным направлением дальнейших исследований является разработка методов автоматического выбора значимых кумулянтов в условиях априорной неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **АВЕДЬЯН Э.Д., ДАМ В.Н.** К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов // Информатизация и связь. 2015. №4. С. 11–15.
2. **АДЖЕМОВ С.С., КЛЕНОВ Н.В., ТЕРЕШОНОК М.В., ЧИРОВ Д.С.** Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 19–27.
3. **ДАМ В.Н.** Нейросетевые технологии в задаче автоматического распознавания видов цифровой моду-

- ляции / Диссертация. М.: МФТИ. 2018. 159 с.
4. **КЕДАЛЛ М. ДЖ., СТЬЮАРТ А.** Теория распределений. М.: Наука. 1966. 587 с.
 5. **КУРБАНАЛИЕВ В.К.** Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов // РЭНСИТ. 2020. №12(3). С. 331–340.
 6. **КУРБАНАЛИЕВ В.К., ГОРБУНОВ Ю.Н.** Автоматическое распознавание видов модуляции: кумулянтный подход // Вестник РАЕН. 2023. № 1. С. 24–32.
 7. **ЛЕОНОВ В.П., ШИРЯЕВ А.Н.** К технике вычисления семинвариантов // Теория вероятности и ее применение. 1959. Т. 4. №3. С. 342–355.
 8. **МАЛАХОВ А.Н.** Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское Радио. 1978. 376 с.
 9. **AZZOUZ E.E., NANDI A.K.** Automatic Modulation Recognition of Communication Signals // Springer New York, NY. 1996. 218 p.
 10. **DOBRE O., ABDI A., BAR-NESS Y., SU W.** A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends // IEEE Proceedings on Communications. 2007. Vol. 1. Issue. 2. P. 137–156.
 11. **LEE, J.H., KIM, J., KIM, B., YOON, D., CHOI, J.W.** Robust automatic modulation classification technique for fading channels via deep neural network // Entropy. 2017. Vol. 19. Issue. 9. 454 p.
 12. **STEINER M.P.** Spectrum Sensing and Blind Automatic Modulation Classification in Real Time // Virginia Tech, Virginia. 2011. 75 p.
 13. **ZHU Z., NANDI K.** Automatic modulation classification principles, algorithms and applications // JohnWiley & Son, London. 2014. 194 p.

REFERENCES

1. **AVEDYAN E.D., DAM V.N.** On the selection of cumulant features in the problem of recognizing types of digital modulation of radio signals. *Informatizatsiya i svyaz*. 2015;4:11–15. (In Russian).
2. **ADZHEMOV S.S., KLENOV N.V., TERESHONOK M.V., CHIROV D.S.** Methods for recognizing types of digital modulation of signals in cognitive radio systems. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2015;6:19–27. (In Russian).
3. **DAM V.N.** Neural network technologies in the problem of automatic recognition of types of digital modulation. Dissertation. Moscow: MIPT. 2018:159. (In Russian).
4. **KEDALL M.J., STEWART A.** Theory of distributions. Moscow: Science. 1966:587. (In Russian).
5. **KURBANALIEV V.K.** Cumulant features for determining the type of signal manipulation. *RENSIT*. 2020;12;(3):331–340. (In Russian).
6. **KURBANALIEV V.K., GORBUNOV YU.N.** Automatic recognition of modulation types: a cumulative approach. *Vestnik RAYEN*. 2023;1:24–32. (In Russian).
7. **LEONOV V.P., SHIRYAEV A.N.** On the technique

- of calculating semivariants. *Teoriya veroyatnosti i yeye primeneniye*. 1959;4;(3):342–355. (In Russian).
8. MALAKHOV A.N. Cumulant analysis of random non-Gaussian processes and their transformations. Moscow: Sovetskoye Radio. 1978:376. (In Russian).
 9. AZZOUZ E.E., NANDI A.K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. *Springer New York*, New York. 1996:218.
 10. DOBRE O., ABDI A., BAR-NESS Y., SU W. A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends. *IEEE Proceedings on Communications*. 2007;1;(2):137–156.
 11. LEE J.H., KIM J., KIM B., YOON D., CHOI J.W. Robust automatic modulation classification technique for fading channels via deep neural network // *Entropy*. 2017;19;(9):454.
 12. STEINER M.P. Spectrum Sensing and Blind Automatic Modulation Classification in Real Time. *Virginia Tech, Virginia*. 2011:75.
 13. ZHU Z., NANDI K. Automatic modulation classification principles, algorithms and applications. *JohnWiley & Son*, London. 2014:194.

Курбаналиев Вагид Кадирбегович,
заместитель начальника отдела АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ e-mail: тел.: +7 (926)-889-80-91, vagdag05@mail.ru

Латышев Александр Евгеньевич,
инженер 1 категории АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ тел.: +7 (915) 001-04-97, e-mail: a.e.latishev@yandex.ru

Якушев Алексей Сергеевич,
техник 1 категории АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ 107078, г. Москва, Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
107078, Moscow, st. New Basmannaya, d. 20, p. 9,
тел.: +7 (919) 779-81-96, e-mail: yakushev2015@mail.ru