

УДК 621.396.62 EDN SCWXFU

Оценка влияния значения несущей частоты и начальной фазы радиосигналов при определении квадратурной амплитудной модуляции

В. К. Курбаналиев, аспирант, post@cnirti.ru

АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Постановка проблемы. Экспоненциальный рост объемов передаваемых данных требует разработки эффективных методов обработки и анализа сигналов, особенно в условиях априорной неопределенности. В данной статье предложен алгоритм оценки смещения несущей частоты и начальной фазы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM) на основе кумулянтов четвертого порядка. 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 алгоритма в задачах радиомониторинга и анализа радиочастотного спектра.

Цель. Разработка и анализ алгоритма обработки сигналов в системах связи в условиях структурной и параметрической неопределенностей.

Результаты. Разработана общая методика синтеза алгоритма определения значения несущей частоты и начальной фазы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией.

Практическая значимость. Применение разработанного алгоритма при проектировании радиоэлектронных систем позволяет учесть влияние значения несущей частоты и начальной фазы сигналов на качество радиомониторинга радиосигналов с QAM.

Ключевые слова: радиосигнал, квадратурная амплитудная модуляция, фазовое созвездие, кумулянт, момент

Для цитирования: Курбаналиев В. К. Оценка влияния значения несущей частоты и начальной фазы радиосигналов при определении квадратурной амплитудной модуляции. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 1. С. 79–86.

Assessing the Influence of the Carrier Frequency Value and Initial Phase of Radio Signals when Determining Quadrature Amplitude Modulation

V. K. Kurbanaliev, postgraduate student, post@cnirti.ru

JSC "CNIRTI named after academician A. I. Berg", Moscow, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The exponential growth in the volume of transmitted data requires the development of effective methods for processing and analyzing signals especially under conditions of a priori uncertainty. This paper proposes an algorithm for estimating the carrier frequency offset and initial phase of quadrature amplitude modulation (QAM) signals based on fourth-order cumulants. The method is based on the use of the properties of fourth-order cumulants, which are invariant to phase shifts. An algorithm has been developed that makes it possible to accurately determine the values of the carrier frequency and initial phase of QAM signals in the absence of a priori information about the signal parameters. Experimental results demonstrate the high accuracy and efficiency of the proposed algorithm in problems of radio monitoring and radio frequency spectrum analysis.

Goal. Development and analysis of a signal processing algorithm in communication systems under conditions of structural and parametric uncertainty.

Results. A general methodology has been developed for the synthesis of an algorithm for determining the value of the carrier frequency and the initial phase of signals with quadrature amplitude modulation.

Practical significance. The use of the developed algorithm in the design of radio-electronic systems makes it possible to take into account the influence of the carrier frequency and the initial phase of the signals on the quality of radio monitoring of radio signals with QAM.

Keywords: radio signal, quadrature amplitude modulation, phase constellation, cumulant, moment

For citation: Kurbanaliev V.K. Assessing the Influence of the Carrier Frequency Value and Initial Phase of Radio Signals when Determining Quadrature Amplitude Modulation. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 79–86. (in Russian)

Введение

Распознавание видов цифровой модуляции радиосигналов представляет собой сложную задачу. Она возникает как в военных, и так и в гражданских сферах. Применительно к системам радиоконтроля решение данной задачи представляет ряд дополнительных сложностей, связанных с наличием значительного числа неизвестных параметров сигнала, которые требуется оценить, таких как несущая частота, начальная фаза, тактовая частота и фаза тактовой синхронизации, отношение сигнал/шум (ОСШ) и т. д.

Целью работы является разработка и анализ алгоритма обработки сигналов в системах связи в условиях структурной и параметрической неопределенностей. Рассматривается подход слепой идентификации сигналов, основанный на статистиках высокого порядка.

Широкое распространение в системах цифровой связи получил класс сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM). В работах [1–17] предложены различные методы определения видов модуляции при условии, что все параметры сигнала (несущая частота, начальная фаза, тактовая частота и фаза тактовой синхронизации, импульсная характеристика канала, ОСШ и средняя мощность) известны или почти известны.

В реальных условиях большинство параметров, в частности несущая частота, начальная фаза, неизвестны и должны быть оценены. Оценку несущей частоты и начальной фазы можно выполнить совместно с определением вида модуляции, воспользовавшись методом максимального правдоподобия, однако такое решение требует значительно вычислительного ресурса.

В данной работе предложен алгоритм оценки значения несущей частоты и начальной фазы на основе возможностей использования кумулянтов четвертого порядка. Для измерения частоты может быть использован метод дискретного преобразования Фурье (ДПФ), однако он предполагает использование параметрической статистики, зависящей от ОСШ.

Будем полагать, что принят сигнал

$$r_{\text{RF}}(t) = s_{\text{RF}}(t) + n_{\text{RF}}(t),$$

где $s_{\text{RF}}(t)$ — сигнал, излученный передатчиком; $n_{\text{RF}}(t)$ — аддитивный белый гауссовский шум.

Сигнал $s_{\text{RF}}(t)$ может быть представлен в виде:

$$s_{\text{RF}}(t) = \text{Re} \left\{ \tilde{s}(t) e^{j(f_0 t + \theta_0)} \right\},$$

где f_0 — несущая частота; θ_0 — начальная фаза; $\tilde{s}(t)$ — комплексная огибающая, которая для сигналов с QAM-модуляции имеет вид:

$$\tilde{s}(t) = \sqrt{2E_s} \sum_n a_n p(t - nT_s - t_d),$$

где E_s — энергия сигнала, переносимая за символ; T_s — символичный период; t_d — неизвестное смещение тактовой синхронизации; $p(t)$ — символичный отклик. Будем считать, что

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_s}, & 0 \leq t < T_s \\ 0, & t < 0 \text{ или } t \geq T_s \end{cases}$$

a_n — последовательность комплексных чисел, выбранных из множества $a_n \in \mu$ в соответствии с передаваемыми символами сообщения. Вид QAM определяется множеством $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M\}$, его называют созвездием модуляции. Здесь M — разрядность (позиционность) модуляции.

Принятый сигнал, искаженный шумами, в приемнике подвергается определенной обработке.

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

$$\begin{aligned} \text{Re}[r_k] &= \sqrt{\frac{E_s}{2}} \cos(2\pi \Delta f t + \varphi(t) + \Delta\theta) + n_i(t), \\ \text{Im}[r_k] &= \sqrt{\frac{E_s}{2}} \sin(2\pi \Delta f t + \varphi(t) + \Delta\theta) + n_q(t), \end{aligned}$$

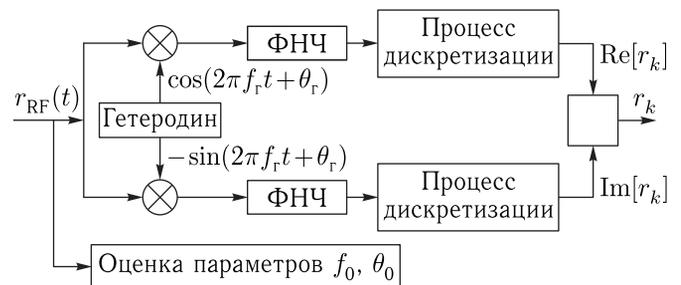


Рис. 1. Схема предварительной обработки сигнала
Fig. 1. Signal pre-processing circuit

где $\Delta f = f_0 - f_r$ — отстройка несущей частоты (смещение несущей частоты из-за несоответствия между частотой гетеродина и несущей сигнала) и $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_r$ — отстройка начальной фазы, f_r и θ_r — частота и начальная фаза сигнала гетеродина (смещение фазы из-за несоответствия между начальной фазой сигнала и фазой гетеродина). Наличие смещений фазы и несущей частоты 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.

Коррекция фазовых ошибок и ошибок смещения частоты

Передача сигнала из передатчика в приемник вызывает фазовый сдвиг сигнала, который сказывается на сигнальном созвездии.

На рис. 2 представлены сигнальные созвездия сигнала с 64-QAM-модуляцией: а) идеальное сигнальное созвездие; б) сигнальное созвездие, повернутое на 45 град.; в) сигнальное созвездие со смещением частоты на 100 кГц. Количество обрабатываемых отсчетов $N = 4096$ бит, ОСШ = 30 дБ.

Наиболее широко применяемая техника коррекции называется фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). ФАПЧ использует фильтр обратной связи, через который сигнал подается на генератор,

управляемый напряжением (ГУН). ФАПЧ работает по принципу, описываемому уравнением:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sin[\theta(t)] \cos[\theta(t)] dt = 0. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что если фазовая ошибка имеет некоторую величину, не ортогональную исходному сигналу, то мы можем оценить эту фазовую ошибку. Пример фазового сдвига показан на рисунке 2, б, где фазовый сдвиг равен 45 град.

Если выборка сигнала делается с частотой, не соответствующей частоте несущей, мы называем это смещением частоты. Величина погрешности и уход частоты дискретизации вверх или вниз от частоты несущей обычно определяют скорость перемещения точек и направление, в котором они движутся. Смещение частоты может возникнуть и из-за движения объекта (приемника или передатчика), что приводит в общем случае к появлению эффекта Доплера и решения в системе задачи селекции движущихся целей (СДЦ). Учет режима СДЦ рассмотрен в [18]. Пример смещения частоты показан на рис. 2, в, где частота несущей смещена на 100 кГц.

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

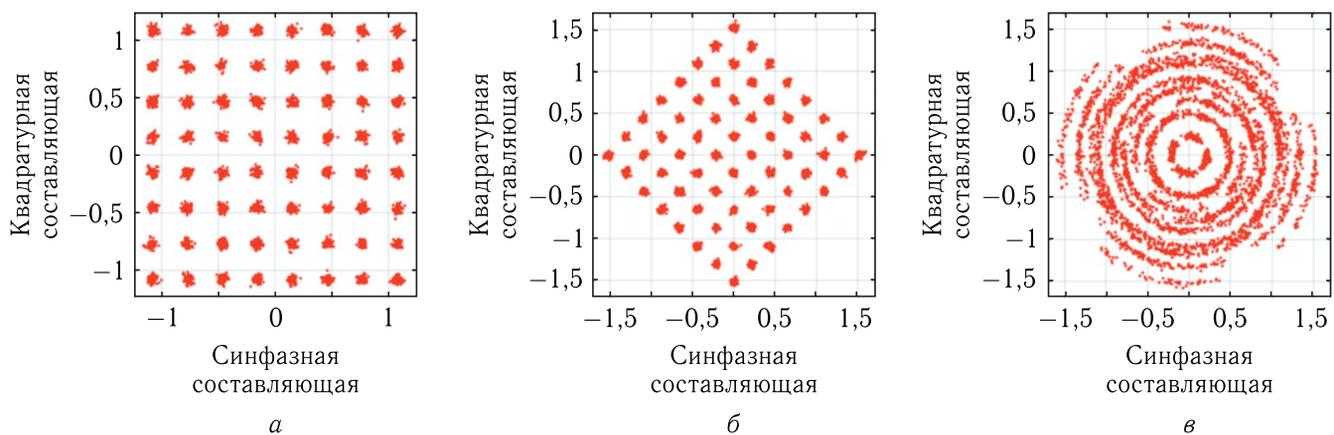


Рис. 2. Сигнальное созвездие: 64-QAM

Fig. 2. Phase constellation: 64-QAM

Оценка значений несущей частоты и начальной фазы проводится в два этапа.

Первым этапом, эвристическим, является устранение расстройки несущей частоты. В статье принят способ оценки несущей частоты с помощью модуля кумулянта $C_{4,0}$.

Оценка значения частоты несущего сигнала заключается в том, что 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 $C_{4,0}$. Необходимо найти минимальную расстройку, предположительно это максимальное значение модуля кумулянта.

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

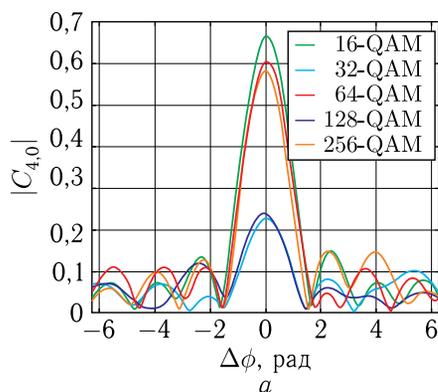
$$\Delta_f = \frac{\Delta_\varphi}{2\pi T_s},$$

где Δ_φ — абсолютное изменение фазы сигнала за время T_s , выбираемое в интервале (0,1,0,2) рад [19].

Расстройка по частоте осуществляется поэлементным умножением массива отсчетов входного сигнала на функцию s_Δ :

$$s_0 = s_{\text{RF}}(t) \cdot s_\Delta,$$

где $s_\Delta = e^{-j \cdot 2\pi f_0 t}$, $f_0 = F_{\min}, F_{\min} + \Delta_f, F_{\min} + 2\Delta_f, \dots, F_{\max}$.



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

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

где

$$m_{n,r} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i^{n-r} \cdot \hat{s}_i^r$$

— совместный момент порядка n ; s — исходный сигнал, \hat{s} — сопряженный ему; N — количество отсчетов сигнала.

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

На втором этапе может производиться оценка значения начальной фазы с помощью значения действительной части кумулянта $C_{4,0}$ и реализации в системе алгоритма «обеспечения» СДЦ.

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

На рис. 3 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.

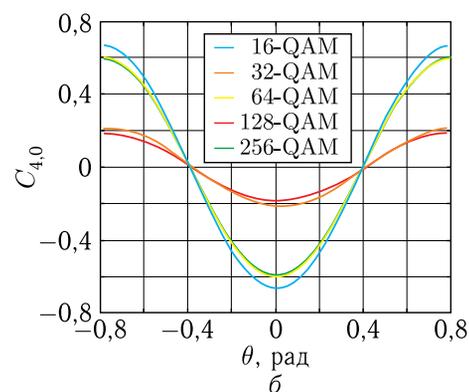


Рис. 3. Графическое представление зависимости модуля кумулянта $C_{4,0}$ от изменения абсолютного значения фазы сигнала (а), графическое представление зависимости действительной части кумулянта $C_{4,0}$ от изменения начальной фазы сигнала (б)

Fig. 3. Graphs of the dependence of the modulus of cumulant $C_{4,0}$ on changes in the absolute value of the signal phase (а), graphs of the dependence of the real part of cumulant $C_{4,0}$ on changes in the initial phase of the signal (б)

Как показано на рис. 3, а, максимальное значение модуля кумулянта $C_{4,0}$ достигается при нулевой расстройке несущей частоты для M-QAM- ($M = 16, 32, 64, 128$ и 256) модуляции и минимальное значение действительной части куму-

лянта $C_{4,0}$ достигается при нулевой расстройке начальной фазы.

На рис. 4–5 показана зависимость кумулянтов от величины расстройки частоты и начальной фазы сигнала.

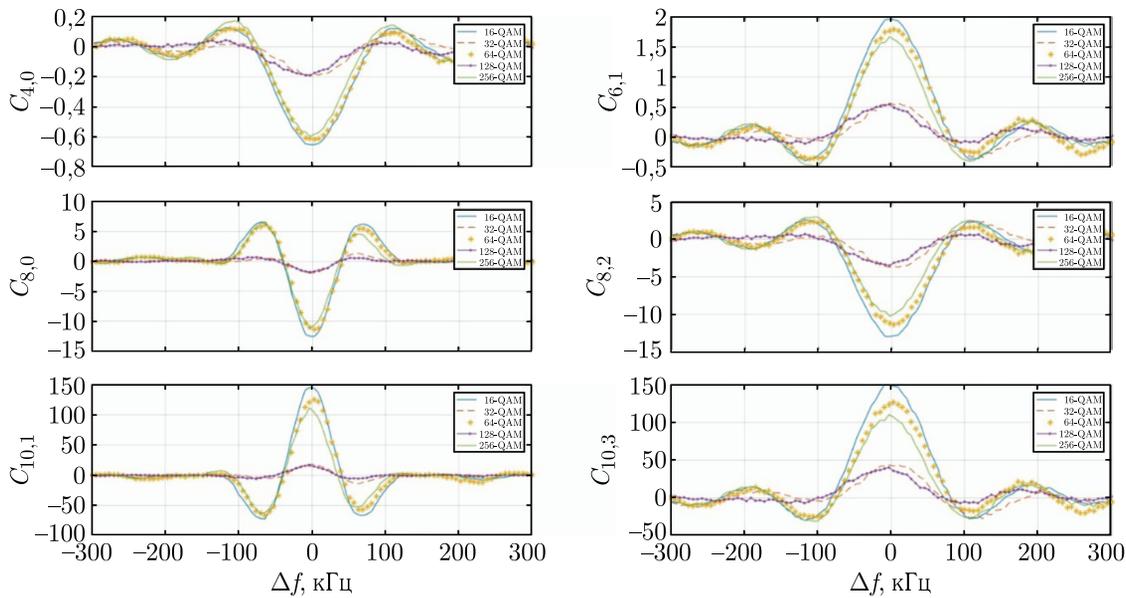


Рис. 4. Графическое представление распределения кумулянтов $C_{4,0}$, $C_{6,1}$, $C_{8,0}$, $C_{8,2}$, $C_{10,1}$ и $C_{10,3}$ от расстройки несущей частоты

Fig. 4. Graphs of the dependence of the cumulants $C_{4,0}$, $C_{6,1}$, $C_{8,0}$, $C_{8,2}$, $C_{10,1}$ and $C_{10,3}$ from carrier frequency detuning

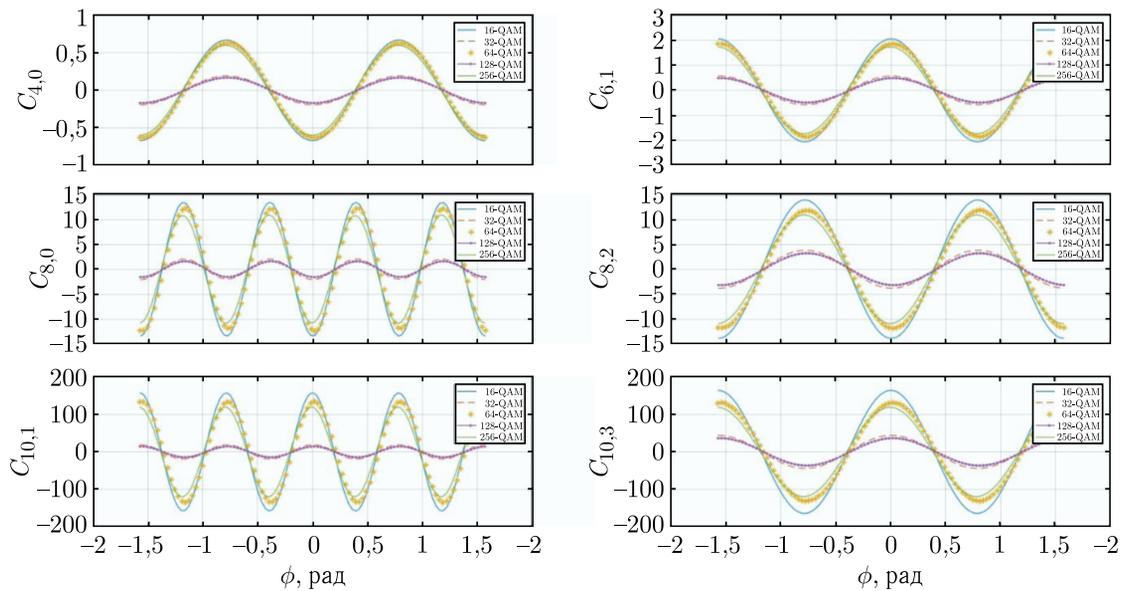


Рис. 5. Графическое представление распределения кумулянтов $C_{4,0}$, $C_{6,1}$, $C_{8,0}$, $C_{8,2}$, $C_{10,1}$ и $C_{10,3}$ от расстройки начальной фазы

Fig. 5. Graphs of the dependence of the cumulants $C_{4,0}$, $C_{6,1}$, $C_{8,0}$, $C_{8,2}$, $C_{10,1}$ and $C_{10,3}$ from the initial phase detuning

Анализ графиков показывает, что информативность каждого кумулянта о характере модуляции сигнала имеет значительную зависимость от отстроек Δf и $\Delta\theta$.

Для сигнала с устраненной расстройкой по несущей частоте и начальной фазой рассчитывают кумулянтные признаки для принятия решения о виде цифровой модуляции, сравнивая с эталонными значениями.

Формулы вычисления кумулянтов высокого порядка подробно описаны в работах [20–23].

Суть методов, основанных на кумулянтном анализе сигналов для распознавания видов цифровой

модуляции, заключается в следующем: сначала вычисляются смешанные кумулянты сигнала, затем полученные значения сравниваются с эталонными теоретическими значениями для различных видов цифровой модуляции. Вид модуляции определяется на основе максимального соответствия рассчитанных и теоретических значений кумулянтов.

На рис. 6 [13] представлена блок-схема алгоритма распознавания видов модуляции при неизвестном значении несущей частоты и начальной фазы.

Обработка входного сигнала осуществляется системой, состоящей из m параллельно работающих блоков, структурные схемы которых приведены на рис. 1. Каждая i -я система ($i = 1, \dots, m$) характеризуется тем, что принятый высокочастотный сигнал переносится на нулевую частоту путем умножения на колебания $\cos(2\pi\Delta ft + \Delta\theta \cdot (i - 1))$ и $-\sin(2\pi\Delta ft + \Delta\theta \cdot (i - 1))$ (квадратурные и синфазные сигналы гетеродина), сформированные гетеродином, пропускается через ФНЧ и подвергается дискретизации для дальнейшей цифровой обработки, необходимой для получения наборов $\text{Re}[r_k]$, $\text{Im}[r_k]$ данных каждой i -й системы. Максимальная точность распознавания достигается в той системе, у которой фаза $\Delta\theta \cdot (i - 1)$ максимально близка к начальной фазе принимаемого несущего сигнала $s_{\text{RF}}(t)$.

Обобщенная структурная схема определения видов модуляции при неизвестных значениях несущей частоты и начальной фазы представлена на рис. 7.

Заключение

В данной работе продемонстрирована эффективность применения кумулянтного анализа для распознавания М-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 пред-



Рис. 6. Блок-схема алгоритма распознавания видов цифровой модуляции в условиях априорной неопределенности

Fig. 6. Block diagram of an algorithm for recognizing types of digital modulation under conditions of a priori uncertainty

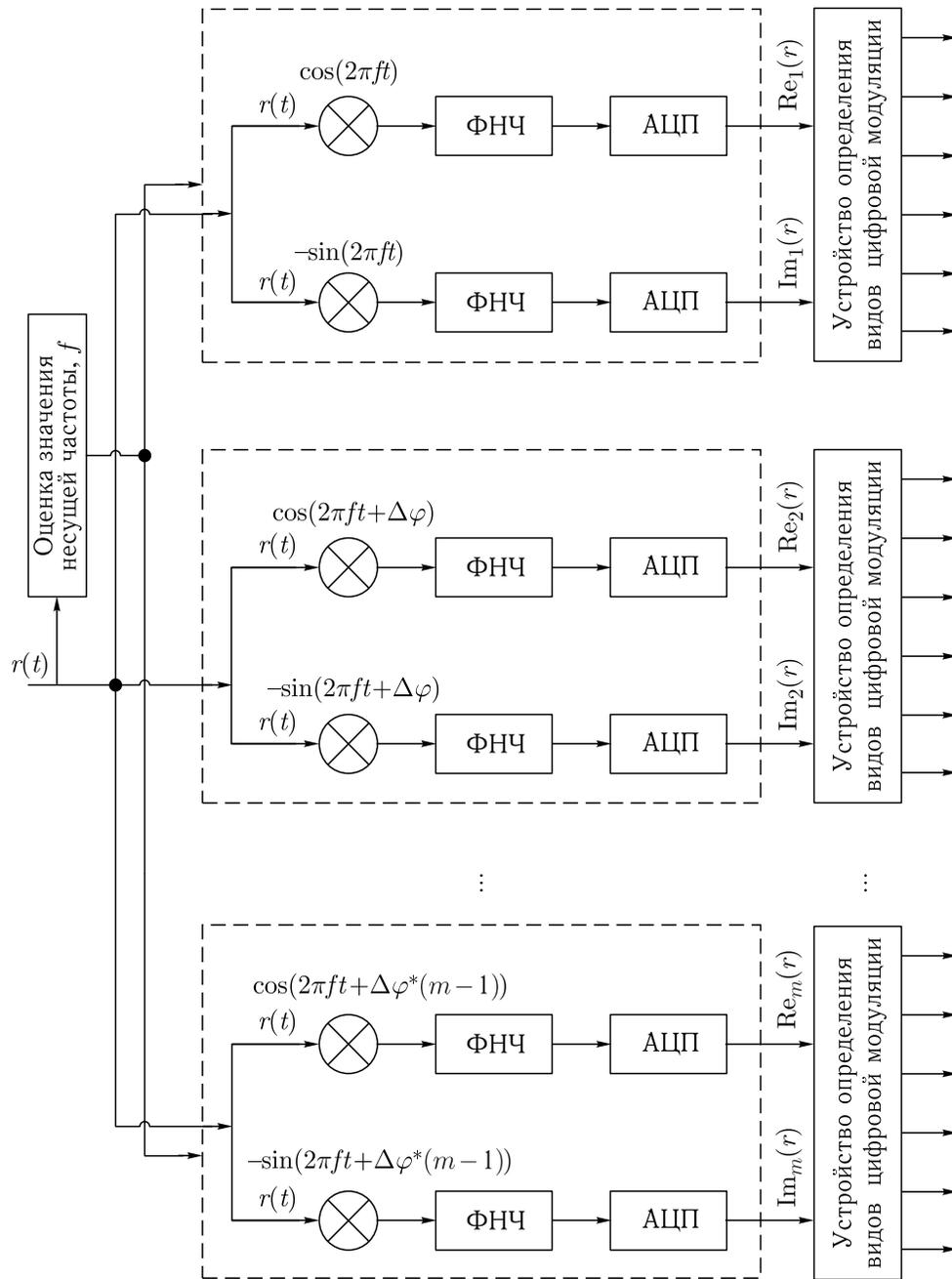


Рис. 7. Обобщенная структурная схема определения видов модуляции
 Fig. 7. Generalized block diagram for determining types of modulation

ложенный 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, пред-

ставляется 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.

Список литературы

1. *Azzouz E.E., Nandi A.K.* Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic Publishers, 1996.
2. *Zhu Z. and Nandi K.* Automatic modulation classification principles, algorithms and applications, John Wiley & Son, London, 194 p.
3. *Курбаналиев В.К., Горбунов Ю.Н.* Автоматическое распознавание видов модуляции: кумулянтный подход // Вестник РАН, 2023, вып. № 1.
4. *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.
5. *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.
6. *Dobre O., Abdi A., Bar-Ness Y. and Su W.* A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends // IEEE Proceedings on Communications, 2006.
7. *Zhang L.* Research on modulation recognition algorithm based on high-order cumulant // Journal of Information Engineering University, 2017, vol. 18, № 4. P. 403–408. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0673.2017.04.005.
8. *Velampalli C.* Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset / Master's Thesis. Communications Research Center, 2010. P. 1–39.
9. *Thakur P., Madan S. and Madan M.* Trends in automatic modulation classification for advanced data-communication networks // International journal of advanced research in computer engineering & technology, vol. 4. 12 p.
10. *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, № 9. P. 454.
11. *Курбаналиев В.К.* Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов // РЭНСИТ, 2020. № 12(3). С. 331–340. DOI: 10.17725/gen-sit.2020.12.331.
12. *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.
13. *Дам Ван Ныть.* Нейросетевые технологии в задаче автоматического распознавания видов цифровой модуляции. Дисс.... канд. техн. наук. М.: МФТИ, 2018. 159 с.
14. *Smith A., Evans M. and Downey J.* Modulation classification of satellite communication signals using cumulants and neural networks, Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop, 8 p.
15. *Young A.F.* Classification of digital modulation types in multipath environments / Master's Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California. June 2008. P. 1–65.
16. *Дам В.Н.* OFDM-модуляция в задаче автоматического распознавания вида цифровой модуляции // Информационные технологии. 2018, т. 24, № 5. С. 345–350.
17. *Парамонов А.А., Нгуен В.М., Нгуен М.Т.* Многозадачная нейронная сеть в задаче распознавания вида QAM- и PSK-модуляции в условиях параметрической априорной неопределенности // Russian Technological Journal, 2023, т. 11, № 4. С. 49–58.
18. *Горбунов Ю.Н., Тимошенко П.И.* Стохастическая радиолокация. Основы теории и расчетов / Под ред. проф. Ю.Н. Горбунова. М.: Горячая линия–Телеком, 2023. 464 с.
19. Пат. RU 2682304, МПК G06N 3/02, 18.03.2019 Бюлл. № 8. Способ распознавания типов манипуляции радиосигналов / И.В. Колбаско, А.В. Квасов, И.А. Юрьев, М.В. Фесенко.
20. *Леонов В.П., Ширяев А.Н.* К технике вычисления семинвариантов // Теория вероятности и ее применение, 1959, т. 4, вып. 3. С. 342–355.
21. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское радио, 1978. 376 с.
22. *Кендалл М.Дж., Стьюарт А.* Теория распределений. М.: Наука, 1966.
23. *Курбаналиев В.К., Фесенко М.В., Горбунов Ю.Н.* Использование кумулянтного анализа для распознавания цифровых видов модуляции радиосигналов // Радиотехника, 2024, т. 88, № 5. С. 38–48.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.08.2024
Дата принятия рукописи
в печать 29.11.2024