

Библиографические ссылки

1. Першин А. С., Сошенко Ю. И. Многолучевые антенны с кластерной схемой // Решетневские чтения : материалы конф. 2011. Ч. 1. С. 34.
2. 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions, 2008. 586 с.
3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 1. М. : Связь, 1977. 380с.
4. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 2. М. : Связь, 1977. 288с.

References

1. Pershin A. S., Soshenko Yu. I. Multibeam antenna with cluster scheme. Conference Proceedings "Reshetnev read", 2011, ch. 1. p. 34.
2. 30th ESA Antenna Workshop on Antennas for Earth Observation, Science, Telecommunication and Navigation Space Missions, 2008. 586 p.
3. Eisenberg G. Z., Yampolsky V. G., Tereshin O. N. Antennas UHF. P. 1. Publisher "Communication", Moscow, 1977. 380 p.
4. Eisenberg G. Z., Yampolsky V. G., Tereshin O. N. Antennas UHF. P. 2. Publisher "Communication" Moscow, 1977. 288 p.

© Першин А. С., 2013

УДК 621.396.67

**МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ
В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА**П. В. Семкин¹, А. В. Кузовников², В. Г. Сомов², Н. А. Тестоедов¹¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, г. Железнодорожный Красноярского края, ул. Ленина 52. E-mail: psemkin@yandex.ru²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: ujub@list.ru

Рассмотрены методы определения модуляции радиосигналов, применяемые в современных системах контроля радиочастотного спектра. Проведен сравнительный анализ различных методов, представлены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: обработка сигналов, вид модуляции, системы радиоконтроля, имитационное моделирование.

**RANDOM SIGNALS CLASSIFICATION METHODS IN SYSTEM
OF RADIOFREQUENCY SPECTRUM CONTROL**P. V. Semkin¹, A. V. Kuzovnikov², V. G. Somov², N. A. Testoedov¹¹JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: psemkin@yandex.ru²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "KrasnoyarskiyRabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ujub@list.ru

Methods of radiosignal modulation determination using in modern systems of radiofrequency spectrum control is described. Comparative analysis of different methods is carried out, results of imitation modeling is present.

Keywords: signal processing, modulation type, radiocontrol systems, imitation modeling.

В современных условиях развития систем радиосвязи значительную роль играет возможность контролировать загрузку радиочастотного спектра. На сегодняшний день ограниченный радиочастотный ресурс используется одновременно множеством наземных и космических средств связи. В связи с этим актуальной становится задача технического анализа радиосигналов. Одним из аспектов технического анализа является оценка вида модуляции контролируемого сигнала – решение данной задачи позволяет проводить дальнейшее вскрытие сигнально-кодовой конструкции.

На данный момент существует несколько перспективных направлений в исследованиях по определению вида модуляции. Анализ тенденций развития в данной области позволяет выявить основное направление развития – повышение степени априорной неопределенности о наличии и виде сигнала. Эта тенденция имеет фундаментальное значение и показывает неэффективность классических методов статистической обработки сигналов в современных условиях. При этом разработка подобных методов все-таки опирается на некоторое описание сигнала – в частности

на статистическое описание сигнала. Кроме этого, стоит отметить, что в современных условиях наиболее распространенными являются цифровые виды модуляции, следовательно, на них должно быть сосредоточено наибольшее внимание разработчиков.

Среди перспективных методов отдельного рассмотрения заслуживают методы слепой обработки сигналов (blindsignalprocessing). Основные теоремы и приложения теории слепой обработки сигналов описаны в [1].

Для методов слепой обработки сигналов задача определения вида модуляции может быть сформулирована следующим образом. В случае неизвестной информационной последовательности передаваемых бит возникает задача слепой идентификации нелинейной системы [1]. В данном случае определить веса ветвей на решетке модулятора (определить вероятности применения для каждого возможного типа модуляции). Вместе с тем, если известно статистическое описание передаваемой последовательности или существуют некоторые ограничения на класс модуляции (амплитудная, фазовая, частотная, относительная и т.д.), то задача идентификации может быть корректна.

Известно несколько подходов к решению данной задачи, однако, наиболее привлекательным для определения вида цифровой модуляции без памяти (неотносительной) является алгоритм классификации вида модуляции по сигнальным созвездиям, основанный на минимизации расстояния Кульбака-Лейблера [1; 2].

Пусть квадратурный приемник обеспечивает прием последовательности комплексных отсчетов сигнала $\{z_i\}$, причем каждый такой отсчет представляет собой сумму отсчетов передаваемого сигнала $\{s_i\}$, и отсчетов белого гауссовского шума $\{n_i\}$ с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением σ^2 :

$$z_i = s_i + n_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

При этом s_i равновероятно принимает значения из множества $S_j = \{s_1, s_2, \dots, s_m^j\}$, которое называется сигнальным созвездием.

Применение байесовской стратегии классификации приводит к двум основным алгоритмам: максимума апостериорной вероятности и максимума максимального правдоподобия, которые идентичны в случае априорной неопределенности относительно типа модуляции.

Метод максимального правдоподобия дает следующую оценку:

$$\hat{S} = \arg \left(\max_j \left(p(z_1, z_2, \dots, z_N | S_j) \right) \right). \quad (2)$$

В данном случае алгоритм классификации сводится к поиску распределения $p(z|S_j)$ наиболее близкого к распределению $p(z|S_j)$ с точки зрения расстояния Кульбака-Лейблера:

$$\hat{S} = \arg \left(\min_j \left(\int \hat{p}(z|S_i) \cdot \log \left(\frac{\hat{p}(z|S_i)}{p(z|S_j)} \right) dz \right) \right). \quad (3)$$

Пространство признаков классификации проводимой в соответствии с (3) определяется матрицей расстояний Кульбака-Лейблера, которая зависит от параметров распределения:

$$\rho_{ij} = \int \hat{p}(z|S_i) \cdot \log \left(\frac{\hat{p}(z|S_i)}{p(z|S_j)} \right) dz. \quad (4)$$

Практически, для решения задачи классификации потребуется сравнение принятой реализации с наперед известным набором стандартных типов модуляции.

В таблице показаны значения расстояний Кульбака-Лейблера полученные с использованием математического моделирования в программе Matlab.

При проверке двух альтернатив качественно можно оценить число отсчетов сигнала при заданной вероятности ошибки классификации p_{ou} :

$$N \approx \frac{1}{\rho_{ij}} \log \left(\frac{1}{p_{ou}} \right), \quad (5)$$

где ρ_{ij} – расстояние Кульбака-Лейблера между принятой реализацией сигнала (1) и стандартным сигнальным созвездием, вычисленное по формуле (4).

Метод минимизации расстояния Кульбака-Лейблера позволяет с достаточно высокой точностью классифицировать метод модуляции. Однако, данный метод имеет и существенные недостатки: невозможность обработки в реальном масштабе времени, необходимость перебора методов модуляции, что создает вероятность ошибочного выбора.

Подобным вышеописанному методу являются методы основанные на теории кумулянтов [3; 4].

Классификация по кумулянтам имеет две формы. В первой реализован метод расстояний, и рассчитанные кумулянты сравниваются с идеальным значением, а во втором используется иерархическая структура сравнения для сведения предполагаемых модуляций к одному типу. Метод расстояний очень прост и легко расширяется при добавлении новых типов модуляции в классификатор. Иерархический метод позволяет идентифицировать семейство модуляции (QAM, PSK, ASK и др.) более точно, чем выделять конкретные созвездия. Семейство данных классификаторов может использоваться во многих случаях, особенно на начальном этапе идентификации радиосигналов.

В классификации модуляции кумулянты используются благодаря их фундаментальным статистическим характеристикам. К ним относятся устойчивость к гауссовским и фазовым шумам, а также простота вычислений [3; 4].

Кумулянты напрямую связаны с моментами через характеристическую функцию:

$$F_x(\omega) = \ln \left(\sum_{n=0}^{\infty} m_k \frac{(i\omega)^n}{n} \right) \quad (6)$$

На практике это позволяет проводить первичные вычисления кумулянт, обычно этот процесс достаточно прост.

Расстояния Кульбака-Лейблера для отношения сигнал/шум 5 дБ

	BPSK	QPSK	8PSK	16APSK	16QAM	64QAM
BPSK	0	0,544	0,567	0,415	0,771	0,714
QPSK	0,945	0	0,021	0,770	0,175	0,118
8PSK	0,882	0,545	0	0,698	0,063	0,065
16APSK	0,439	0,490	0,483	0	0,670	0,411
16QAM	1,113	0,311	0,085	1,021	0	0,046
64QAM	0,988	0,128	0,032	0,302	0,023	0

Затем они объединяются и формируются кумулянтные значения. В случае четвертого порядка с нулевым средним кумулянты могут быть вычислены как

$$C(w, y, x, z) = E[wxyz] - E[w]E[yz] - E[wy]E[xz] - E[wz]E[yx] \quad (7)$$

где w, x, y и z – входные отсчеты. Далее будем обозначать кумулянты как $C_{p(p-q)}$, где p равно порядку кумулянт; q – количеству некогерентных входов кумулянтной функции.

Перед сравнением с идеальным значением необходимо привести вычисленные кумулянты к единице измерения мощности. При наличии гауссовского шума должна быть учтена мощность шума:

$$\tilde{C}_{4(4-q)} = \frac{\hat{C}_{4(4-q)}}{(\hat{C}_{21} - \hat{C}_{21g})^2} \quad (8)$$

где \hat{C}_{21} – полная мощности; \hat{C}_{21g} – мощность шума.

На практике мощность шума измеряется при отсутствии сигнала в этой же полосе либо в соседней полосе, свободной от сигнала.

Метод расстояний заключается в нахождении линейного расстояния между вычисленной функцией и ее идеальным значением для каждого типа модуляции:

$$\bar{D}_{nk} = \sqrt{(\tilde{C}_{nk} - \hat{C}_{nk})^2} \quad (9)$$

Далее находится общее расстояние для каждой идеальной модуляции:

$$\bar{D}_T = \sum_N \sum_K \bar{D}_{nk} \quad (10)$$

Чем меньше значение индекса D_T , тем больше соответствие модуляции.

В данном классификаторе предполагается, что дисперсия \hat{C}_{nk} является одинаковой для всех модуляций. Предполагается считать дисперсию идеальной, так как реальное значение сильно усложняет расчеты.

Преимуществом метода расстояний является простота добавления новых типов модуляции в классификатор. Для этого необходимо добавить идеальный кумулянт с новым созвездием. Таким образом, с помощью усреднения классификатор может обучаться и выявлять новые модуляции (для получения хороших оценок моментов) при высоком ОСШ.

Возможно также представление классификатора на основе циклических кумулянтов с четвертого порядка по восьмой. В отличие от предыдущих методов в этом алгоритме формируется вектор расстояния ме-

жду идеальным и расчетным значениями кумулянта. Тип модуляции определяется минимальной длиной вектора. Данный алгоритм требует десятки тысяч отсчетов для поддержания высокой точности. Также следует отметить, что с увеличением порядка модуляции требуется больше отсчетов, так как необходимо обрабатывать больше символов.

В этом методе также вычисляется расстояние между идеальными и расчетными циклическими кумулянтами. Для ускорения вычислений расстояние берется в квадрате. В моделировании использовалось четыре сигнала (BPSK, QPSK, 8-PSK и манипуляция с минимальным сдвигом (MSK)) на близких частотах. Отношение сигнал/шум варьировалось от 7 до 10 дБ. Количество отсчетов равнялось 16 384, и все четыре модуляции были правильно определены в более чем 60 % испытаний. При исключении сигнала 8-PSK точность определения возрастала до 90 %.

Помимо метода расстояний используется другой метод, основанный на теорикумулянтов – иерархический метод.

Иерархическая структура зависит от типа классифицируемых модуляций и извлекаемой информации.

Метод основан на разделении созвездий на группы по кумулянтам. На рис. 1 показано, как модуляции группируются по кумулянтам четвертого порядка $|\hat{C}_4|$. Кумулянт $|\hat{C}_{40}|$ может быть использован для идентификации любой модуляции, однако на начальном этапе для отличия QPSK и QAM от ASK при низком ОСШ используется $|\hat{C}_{41}|$. Значение $|\hat{C}_{40}|$ может быть использовано для отделения QAM и QPSK от 8-PSK с меньшей вероятностью ошибки классификации. Дерево этой иерархической структуры показано на рис. 2.

Структура строится на пороговом значении дисперсии, которое должно быть выбрано оптимальным образом. В отличие от одношаговых методов классификации дисперсия не создает дополнительные сложности.

Данный метод имеет определенный недостаток – поскольку структура потока односторонняя, ошибка в одной ветви распространяется на все последующие. Этот недостаток отсутствует у метода расстояний, поскольку в нем ведутся параллельные вычисления.

Для оценки применимости данного метода было проведено моделирование на примере различных видов модуляции, наиболее часто используемых в современных системах радиосвязи. На рис. 3 приведена зависимость вероятности правильной классификации от отношения сигнал/шум для разных типов модуляции.

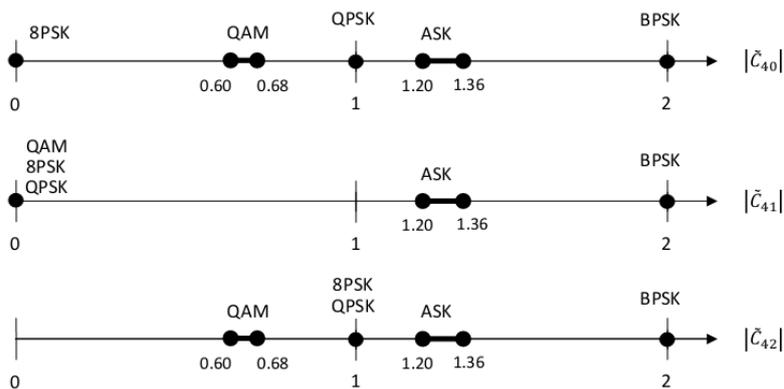


Рис. 1. Группировка созвездий на основе кумулянта четвертого порядка

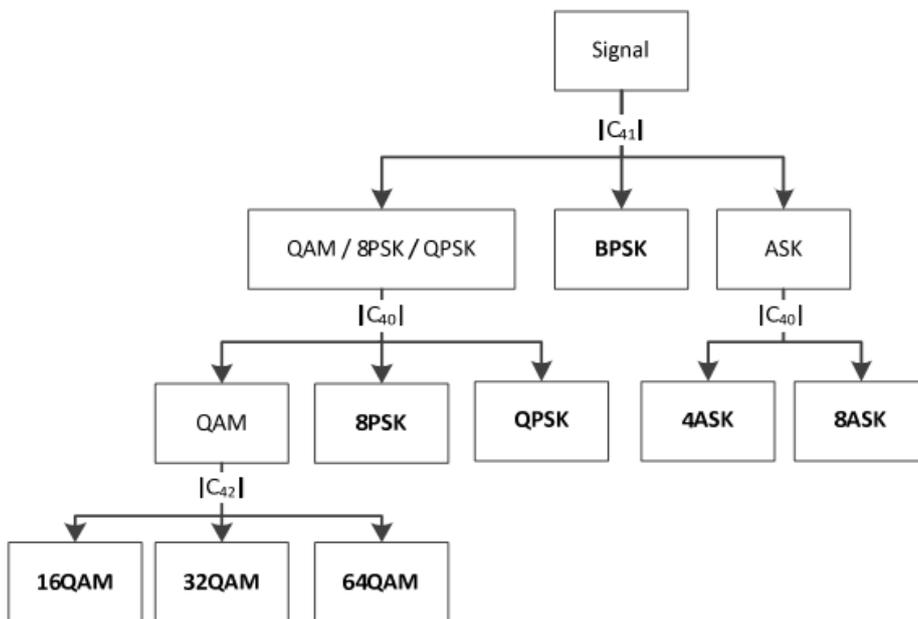


Рис. 2. Иерархическая классификация QAM, PSK и ASK сигналов. Выходы классификатора выделены жирным шрифтом

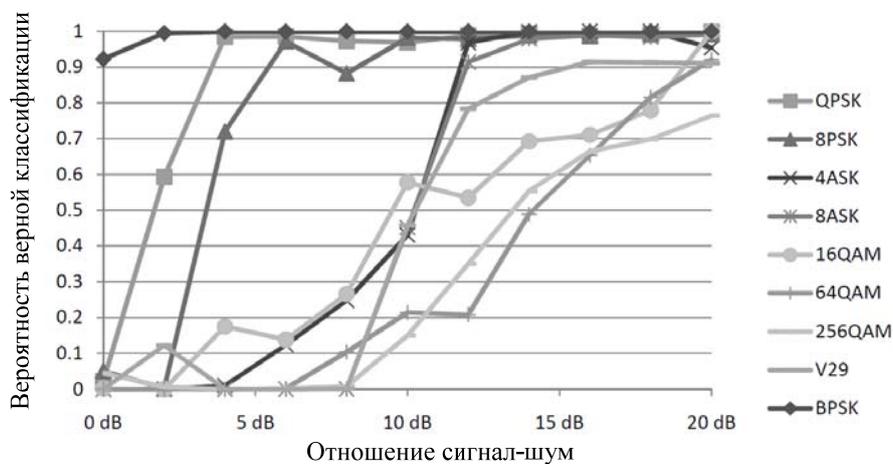


Рис. 3. Зависимость вероятности верной классификации от отношения сигнал/шум

Кроме представленных выше способов для определения вида модуляции используется комбинация вейвлет-преобразования и оценки параметров сигнала по методу максимального правдоподобия [5; 6]. Как показано в [5], данный метод позволяет классифицировать модуляцию контролируемого радиосигнала при отношении сигнал/шум выше 5 дБ. В случае применения данного метода, обработку сигналов с цифровой модуляцией проводят в два этапа:

1) определение технической скорости передачи и моментов перехода параметров сигнала;

2) оценка параметров сигнала по методу максимального правдоподобия внутри интервалов с постоянными параметрами.

Подобный подход позволяет обеспечить устойчивость к шумам и кратковременным помехам, а также позволяет проводить обработку в режиме, близком к реальному времени.

В статье рассмотрены перспективные методы определения вида модуляции в современных системах радиоконтроля: метод, основанный на минимизации расстояния Кульбака-Лейблера, метод основанный на применении теории кумулянтов, метод, основанный на совмещении вейвлет-преобразования сигналов и оценок максимального правдоподобия. Проведено имитационное моделирование классификация модуляций по данным методам. На основе анализа результатов моделирования данных методов можно сказать, что для устранения недостатков должны использоваться комплексные методы, дающие преимущества совмещаемых методов и нивелирующие их недостатки.

Библиографические ссылки

1. Горячкин О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи // Радио и связь, 2003. 230 с.

2. Кузовников А. В., Семкин П. В. Применение методов слепой обработки сигналов к задачам радио-

мониторинга // Материалы всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. Ч. 2. НГТУ (Новосибирск, 29 ноября – 2 декабря 2012). С. 225–226.

3. Sadler B., Swami A. “Hierarchal Digital Modulation Classification Using Cumulants”, IEEE Transactions on Communications. March 2000. Vol. 48, no. 3. P. 416–42.

4. Li S., Song C., F. Chen Lei Shen. “Automatic Modulation Classification of MPSK signals Using High Order Cumulants” in ICSP, 2006. P. 1–4.

5. Патент RU 2485526 C2. Способ оценки параметров и демодуляции случайных сигналов. Опубл. 20.06.2013.

6. Оценка параметров и демодуляция радиосигналов в условиях априорной неопределенности / Н. А. Тестоедов, П. В. Семкин, А. В. Кузовников, В. Г. Сомов // Радиотехника, 2013. № 6. С. 96–100.

References

1. Goraychkin O. V. *Radio i svyaz'* (Radio and communications), 2003. 230 p.

2. Kuzovnikov A. V., Semkin P. V. *Materialy vseros. nauch. konf. molodykh uchenykh : v 7 ch. Ch. 2.* (Materials of scientific conference of young scientists in seven part. Part 2), NSTU, Novosibirsk 29th November – 2th December 2012, p. 225–226.

3. Sadler B., Swami A. Hierarchal Digital Modulation Classification Using Cumulants, IEEE Transactions on Communications, March 2000, vol. 48, no. 3, p. 416–429.

4. Li S., Song C., F. Chen Lei Shen. Automatic Modulation Classification of MPSK signals Using High Order Cumulants, in ICSP, 2006, p. 1–4.

5. Patent RU 2485526 C2. *Cposob otsenki parametrov i demodulyatsii sluchaynykh signalov* (Method of parameter estimation and demodulation of random signals), published 20.06.2013.

6. Testoedov N. A., Semkin P. V., Kuzovnikov A. V., Somov V. G. *Radioengineering*, 2013, № 6, p. 96–100.

© Семкин П. В., Кузовников А. В., Сомов В. Г., Тестоедов Н. А., 2013

УДК 548: 537.611.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ С РАСКРЫВАЕМЫМИ ХОЛОДИЛЬНИКАМИ-ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ СПУТНИКОВ СВЯЗИ С ПОВЫШЕННЫМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЕМ

Е. В. Кривов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662971, г. Железногорск, ул. Ленина, 52. E-mail: krivov@iss-reshetnev.ru

Рассматриваются экспериментальные исследования двухфазной СТР с конденсаторами в раскрываемом холодильнике излучателе (РХИ) для создания новых высокоэффективных и надёжных СТР с жидкостным контуром и двухфазной подсистемой с РХИ для перспективных спутников связи с повышенной энергоэффективностью разработки ОАО «ИСС».

Ключевые слова: двухфазные системы терморегулирования, контурные тепловые трубы, раскрываемый холодильник-излучатель.