

УДК 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.78.86 EDN BRUMDG

Распознавание видов модуляции сигналов и сигнально-кодовых конструкций

И. В. Косткин, к. т. н., rgrtu@rsreu.ru

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина»,
г. Рязань, Российская Федерация

В. М. Ватутин, д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Ежов, д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р. К. Григорьев, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены основные методы распознавания видов модуляции сигналов и сигнально-кодовых конструкций, используемых в существующих бортовых РЭС космических аппаратов спутниковых систем связи (ССС). Произведена оценка параметров сигналов, благодаря которой получены характеристики правильного распознавания вида модуляции (задача классификации). Выявлено, что на вероятность правильного распознавания вида модуляции оказывает существенное влияние смещение несущей сигнала относительно несущей приемника.

Авторами показано, что вероятность правильного обнаружения сигналов и сигнально-кодовых конструкций составляет более 90% при ОСШ не менее -30 дБ в полосе приемника от 1 МГц до 5,5 МГц при частоте дискретизации $f_s = 200$ МГц. Предложенные для распознавания видов модуляции словарь признаков и структура искусственной нейронной сети обеспечивают вероятность правильного распознавания не менее 70% для 22 видов модуляции.

Ключевые слова: параметры сигналов, сигнально-кодовые конструкции, спутниковая связь, модуляция сигнала, системы спутниковой связи, космические аппараты (КА)

Recognition of Signal Modulation Types and Signal-Code Structures

I. V. Kostkin, Cand. Sci. (Engineering), rgrtu@rsreu.ru

Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, Ryazan, Russian Federation

V. M. Vatutin, Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Ezhov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

R. K. Grigorjev, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. This article considers the main methods for recognizing the types of signal modulation and signal-code structures used in the existing on-board radio electronic devices of the satellite communication systems. The parameters of the signals were estimated, which made it possible to obtain the characteristics of the correct recognition of the modulation type (classification task). It was found that the probability of correct recognition of the modulation type is significantly affected by the offset of the signal carrier relative to the receiver carrier.

The authors have shown that the probability of correct detection of signals and signal-code structures is more than 90% with an SNR of at least -30 dB in the receiver band from 1 MHz to 5.5 MHz at a sampling frequency of $f_s = 200$ MHz. The dictionary of features and the structure of the artificial neural network proposed for recognizing the types of modulation provide the probability of correct recognition of at least 70% for 22 types of modulation.

Keywords: signal parameters, signal-code structures, satellite communication, signal modulation, satellite communication systems, spacecraft (SC)

Селекция сигналов

В рамках распознавания вида модуляции и оценки параметров сигнала необходима предварительная селекция сигналов выявленных обнаружителем радиосигналов.

После обнаружения сигналов в полосе пропускания приемника производится операция селекции. Перенос в основную полосу частоту осуществляется по формуле:

$$\underline{S}_m(t) = \underline{S}_{\text{вх}}(t) \cdot \exp(-j2\pi\hat{f}_{cm} \cdot t), \quad (1)$$

где m — номер обнаруженного сигнала в полосе приемника, $\underline{S}_m(t)$ — сигнал в основной полосе частот, $\underline{S}_{\text{вх}}(t)$ — входной процесс, \hat{f}_{cm} — несущая частота m -го сигнала.

В случае если обнаруженных сигналов несколько, данная процедура производится для каждого из них. Для увеличения быстродействия на этом этапе возможна параллельная обработка. Далее, в целях подавления гармоник, возникающих вследствие переноса сигнала смесителем, и соседних сигналов в полосе приемника производится цифровая фильтрация [1]:

$$y[k] = \sum_{\Xi_1=0}^{m_1} a_{\Xi_1} x[k - \Xi_1] + \sum_{\Xi_2=1}^{m_2} b_{\Xi_2} y[k - \Xi_2], \quad (2)$$

где a_{Ξ_1} и b_{Ξ_2} — коэффициенты используемого фильтра; m_1 и m_2 — количество коэффициентов фильтра; $x[k]$ — отсчеты, поступающие на вход фильтра; $y[k]$ — отсчеты, получаемые с выхода фильтра; Ξ_1 и Ξ_2 — задержка сигнала.

Обоснование классов рассматриваемых видов модуляции

В настоящее время большое значение имеет оценка вида и параметров модуляции радиосигналов, используемых в различных каналах передачи информации и телеметрии с борта космического аппарата (КА). Большинство работ на тему распознавания вида модуляции рассматривают поставленную задачу в условиях априорно заданных основных параметрах. Данное условие при анализе неизвестных радиосигналов КА зачастую невыполнимо [2].

Каждый класс модуляции представляет собой множество модификаций конкретного вида модуляции. Кроме того, надежность распознавания связана с количеством определенных классов и мерой близости между отдельными элементами заданного класса в пространстве признаков. Тем самым целесообразно сокращение алфавита классов путем их объединения: PSK-2, PSK-4, PSK-8, QAM-4, QAM-16, OQAM-4, OQAM-16, GFSK-2, GFSK-4, FSK-2, FSK-4, CPFSK-2, CPFSK-4, TOQPSK-4, FPSK-2, FPSK-4, DPSK-2, DPSK-4, QAM-32, QAM-64, APSK-16, APSK-32.

Определение словаря признаков

Существуют два основных подхода к распознаванию видов модуляции радиосигналов [3, 4]. Методы, относящиеся к первому подходу, основаны на вычислении отношения правдоподобия для каждого возможного вида модуляции. Решение о применении того или иного вида модуляции осуществляется по максимуму отношения правдоподобия. Эти методы по сравнению с остальными дают наилучший результат при известных априори параметрах сигнала, но неприменимы при неизвестной несущей частоте, а также фазе, уровнях сигнала, шума и требуют значительных вычислительных затрат. Методы, относящиеся ко второму подходу, основаны на разработке словаря признаков (СП) и последующем сравнении измеренных значений параметров сигнала с выбранными порогами. Большинство из этих методов также неприменимы при высоком уровне априорной неопределенности параметров сигнала, однако существуют и такие методы, которые робастны к указанным факторам. К ним относятся методы, основанные на спектральных признаках, на вейвлет-преобразовании, на моментах и кумулянтах высоких порядков [2, 4].

Для описания большинства сигналов достаточным является определение его математического ожидания μ_1 , коэффициентов вариации μ_2 , асимметрии μ_3 и эксцесса μ_4 [2]. В связи с этим целесообразно включить в СП характеристики амплитуды анализируемого сигнала, нормированного по мощности $A(t)$, а также коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесса закона распределения случайного

процесса $A'(t) = dA(t)/dt$ инвариантные к скорости следования информационных символов:

$$p_{01} = \mu_1(A(t)), \quad (3)$$

$$p_{02} = \mu_2(A(t)), \quad (4)$$

$$p_{03} = \mu_3(A(t)), \quad (5)$$

$$p_{04} = \mu_4(A(t)), \quad (6)$$

$$p_{05} = \mu_2(A'(t)), \quad (7)$$

$$p_{06} = \mu_3(A'(t)), \quad (8)$$

$$p_{07} = \mu_4(A'(t)). \quad (9)$$

Из-за наличия частотной расстройки $\Delta\omega$ при решении задачи классификации вида модуляции оценка фазы $\phi(t)$ затруднительна, поэтому целесообразнее использовать значение функции $\phi'(t)$. При этом коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесса функции $\phi'(t)$ инвариантны к частотной расстройке $\Delta\omega$ и тактовой частоте следования информационных символов R_s [2], таким образом, в СП целесообразно внести данные параметры:

$$p_{08} = \mu_2(\phi'(t)), \quad (10)$$

$$p_{09} = \mu_3(\phi'(t)), \quad (11)$$

$$p_{10} = \mu_4(\phi'(t)). \quad (12)$$

Для описания других статистических свойств анализируемого сигнала целесообразно рассмотреть СПМ комплексной огибающей $z(t)$, а также функции $\phi'(t)$. Из-за особенностей спектрального представления сигнала масштаб по оси частот указанных функций СПМ прямо пропорционален скорости передачи информационных символов R_s . За счет этого, в целях решения задачи распознавания вида модуляции необходимо использовать функционалы инвариантные к «растяжению» и «сжатию» вдоль оси частот [2]. Таким свойством обладает коэффициент прямоугольности спектра:

$$p_{11} = \frac{F_{90}(S_{mz}(f))}{F_{95}(S_{mz}(f))}, \quad (13)$$

$$p_{12} = \frac{\Upsilon(S_{mz}(f))}{F_{95}(S_{mz}(f))}, \quad (14)$$

$$p_{13} = \frac{F_{90}(S_{m\phi'}(f))}{F_{95}(S_{m\phi'}(f))}, \quad (15)$$

$$p_{14} = \frac{\Upsilon(S_{m\phi'}(f))}{F_{95}(S_{m\phi'}(f))}, \quad (16)$$

где F_x — полоса частот, в которой сосредоточено $x\%$ энергии сигнала, Υ — эффективная полоса

частот. Параметры p_{11} , p_{12} , p_{13} и p_{14} также целесообразно включить в СП, S_m — СПМ m -го сигнала.

В работе [5] обосновано применение характеристик изменения длины и угла поворота вектора комплексной огибающей анализируемого сигнала, которые описываются выражениями: $A_2(t) = z'(t)$ и $\phi_2(t) = \arg\{z'(t)\}$ соответственно. Данные функции определяют переходы между элементами канального алфавита, тем самым характеризуя динамическую структуру радиосигнала. Коэффициенты асимметрии и эксцесса данных функций инвариантны к значениям R_s и $\Delta\omega$ [2], поэтому СП целесообразно дополнить данными параметрами:

$$p_{15} = \mu_3(A_2(t)), \quad (17)$$

$$p_{16} = \mu_4(A_2(t)), \quad (18)$$

$$p_{17} = \mu_3(\phi_2(t)), \quad (19)$$

$$p_{18} = \mu_4(\phi_2(t)). \quad (20)$$

Рассмотрим подробнее представленные ранее методы в целях распознавания вида модуляции.

Метод, основанный на спектральных признаках

Функциональная схема алгоритма данного метода представлена на рис. 1, который позволяет распознать такие виды модуляции как [6]:

АМ (Amplitude modulation — амплитудная модуляция);

АШК (Amplitude-shift keying — амплитудная манипуляция);

ДСБ (Double-sideband modulation — амплитудная модуляция с подавленной несущей);

ФМ (Frequency modulation — частотная модуляция);

ФСК (Frequency Shift Keying — частотная манипуляция);

ФШК (Phase-shift keying modulation — фазовая манипуляция);

КВАМ (Quadrature Amplitude Modulation — квадратурная амплитудная модуляция);

ОСБ (Single-sideband modulation — амплитудная модуляция с одной боковой полосой), который имеет две разновидности: ОСБ (lower sideband modulation) и УСБ (upper sideband modulation);

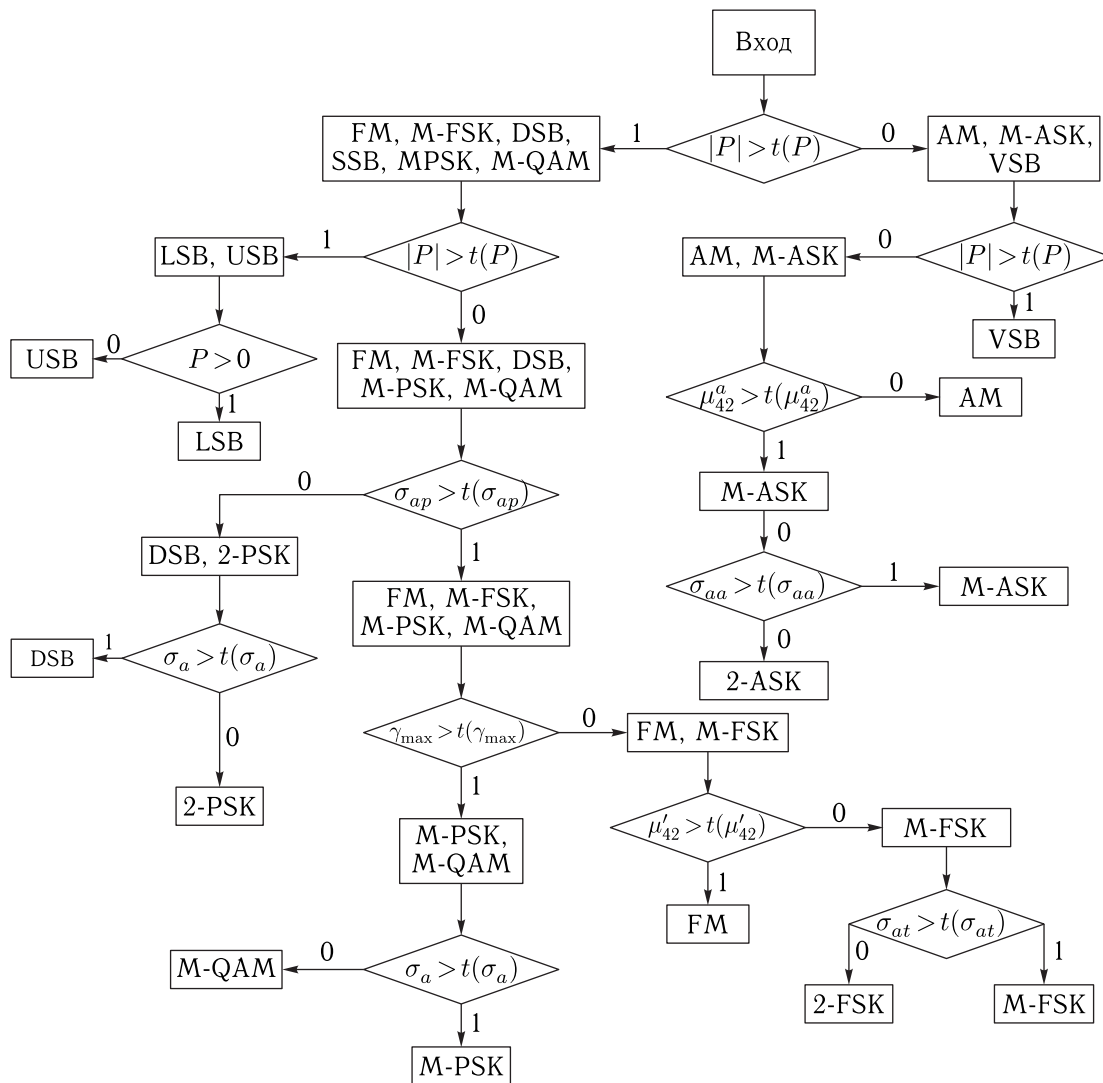


Рис. 1. Функциональная схема блока распознавания видов модуляции

VSB (Vestigial sideband modulation — амплитудная модуляция с подавленной боковой полосой).

Согласно функциональной схеме, для входного сигнала последовательно считаются значения соответствующего признака F , которые сравниваются с порогом $t(F)$. В зависимости от результата сравнения (результат показан на рис. 1 логическими нулем или единицей), сигнал относится либо к группе сигналов A , либо к группе сигналов B .

Для расчета порога $t(F)$ каждый блок сравнения должен быть предварительно обучен пилотными сигналами F_A и F_B , т.е. такими сигналами, для которых априорно известно, относятся они к группе A или B .

Формула для расчета порога с использованием пилотных сигналов имеет вид:

$$t(F) = \frac{\sigma(F_A)\mu(F_B) + \sigma(F_B)\mu(F_A)}{\sigma(F_A) + \sigma(F_B)}, \quad (21)$$

Здесь $\sigma(F_A)$, $\sigma(F_B)$ — СКО значений параметра F для групп A и B .

$$\sigma(F_A) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (F_A(l) - \mu(F_A))^2}, \quad (22)$$

$$\sigma(F_B) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (F_B(l) - \mu(F_B))^2}, \quad (23)$$

где L — количество реализаций сигнала соответствующей группы, $\mu(F_A)$ и $\mu(F_B)$ — математические ожидания значений параметра F для групп A и B :

$$\mu(F_A) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L F_A(l), \quad \mu(F_B) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L F_B(l), \quad (24)$$

Данный алгоритм позволяет распознать виды модуляции FM, FSK, DSB, SSB, PSK, QAM, AM, ASK, VSB, а также различить двухпозиционные PSK, FSK, ASK от соответствующих видов модуляции высших порядков.

Метод, основанный на вейвлет-преобразовании

В работе [7] рассматривается применение вейвлет-преобразования (ВП) для различения сигналов, которые используют QAM, PSK и FSK виды модуляции. Подход заключается в использовании ВП для извлечения переходных характеристик в цифровом модулированном сигнале.

Различные сигналы цифровой модуляции содержат различные переходные процессы амплитуды, частоты или фазы. Метод, представленный в работе [7], извлекает временную информацию и тем самым позволяет произвести идентификацию вида модуляции.

При использовании ВП Хаара возможно различение PSK и FSK видов модуляции. В идеальном случае для PSK модуляции ВП Хаара является постоянной величиной, в то время как для FSK будет иметь ступенчатый характер. Алгоритм демонстрирует высокие результаты при низком отношении сигнал-шум, по ряду параметров опережает другие классификаторы, основанные на анализе особенностей. Большим достоинством метода является отсутствие необходимой предварительной обработки сигнала [9].

В работе [7, 8] также показана возможность применения данного преобразования для классификации QAM видов модуляции путем нормирования сигнала по амплитуде. В данном случае применяют амплитудную нормализацию к входному сигналу. Ее применение к QAM сигналам позволяет устранить изменения амплитуды и использовать общий алгоритм для PSK и FSK сигналов критерий раз-

личия. Далее, в блоке принятия решения дисперсии вейвлет-преобразований сигнала с амплитудной нормализацией и без нее сравниваются с некоторым порогом. Основная идея принятия решения состоит в различии дисперсий модуля вейвлет-преобразования Хаара.

Метод, основанный на моментах и кумулянтах высоких порядков

В работах [5, 9, 10] рассматривается вопрос применения статистических параметров сигнала (моменты, кумулянты), которые используют для извлечения уникальных характеристик сигнала.

Также в [11] приведен сравнительный анализ различных методов, рис. 2.

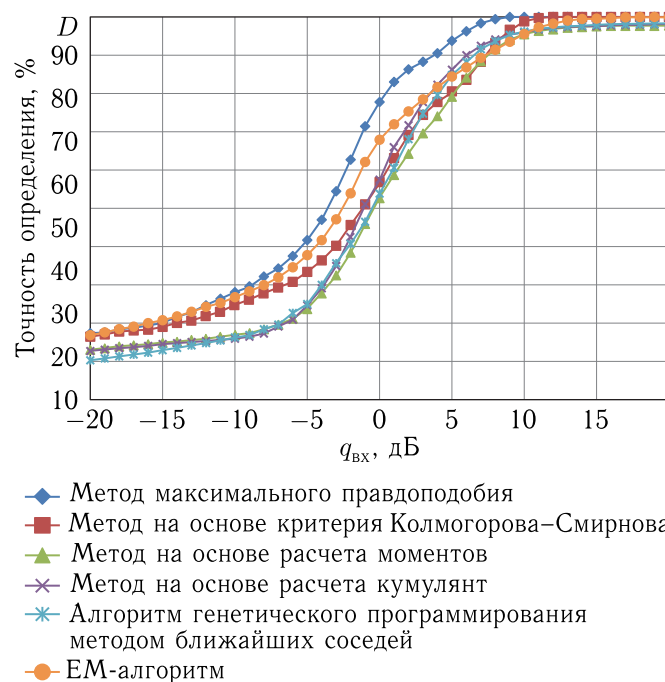


Рис. 2. Средняя точность классификации в канале аддитивного белого гауссовского шума

Анализ и моделирование алгоритмов распознавания видов модуляции

На основании полученного СП произведена оценка параметров сигналов, благодаря которой в ходе сравнительного анализа методов классифика-

ции (на основе дерева решений, последовательной минимальной оптимизации (SMO), являющейся разновидностью метода опорных векторов, искусственной нейронной сети (ИНС)) получены характеристики правильного распознавания вида модуляции B (рис. 3).

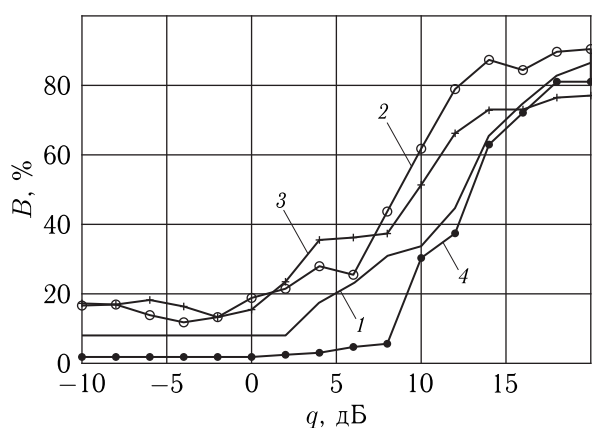


Рис. 3. Характеристики распознавания видов модуляции для различных методов классификации

Количество сигналов, на которых производилось обучение алгоритма классификации: число отсчетов на сигнал: не менее $3 \cdot 10^4$; частота дискретизации: от 12 до 20 МГц; частота следования символов 1 Мбод/с; число видов модуляции: 22 (PSK-2, PSK-4, PSK-8, QAM-4, QAM-16, OQAM-4, OQAM-16, GFSK-2, GFSK-4, FSK-2, FSK-4, CPFSK-2, CPFSK-4, TOQPSK-4, FPSK-2, FPSK-4, DPSK-2, DPSK-4, QAM-32, QAM-64, APSK-16, APSK-32).

На данном рисунке обозначены характеристики правильного распознавания видов модуляции: линией 1 — алгоритм классификации J48 [12], линией 2 — ИНС (персептрон), линией 3 — SMO, линией 4 — дерево решений, полученное в программной среде MATLAB.

Исходя из того, что задача распознавания вида модуляции (задача классификации) является плохо формализованной, а также на основании полученных зависимостей решено использовать ИНС, обеспечивающей $B \approx 80$ дБ, при ОСШ $q \approx 15$ дБ.

Также на этапе оценки параметров сигналов выявлено, что на вероятность правильного распознавания вида модуляции оказывает существенное

влияние смещение несущей сигнала относительно несущей приемника.

Для улучшения характеристики распознавания вида модуляции предложено произвести повторное обучение ИНС: при ОСШ от -10 дБ до $+40$ дБ; смещении несущей сигнала относительно несущей приемника от $1 \cdot 10^{-6}$ до $0,5$; числе сигналов: 231×10^3 ; количестве отсчетов на сигнал: не менее 3×10^4 ; частоте дискретизации: от 12 до 20 МГц; частоте следования символов 1 Мбод/с.

Качественная оценка результатов обнаружения и оценки параметров сигналов и сигнально-кодовых конструкций, используемых в существующих бортовых РЭС КА ССС

После повторного обучения ИНС для «новой выборки сигналов» получена характеристика правильного распознавания вида модуляции, представленная на рис. 4.

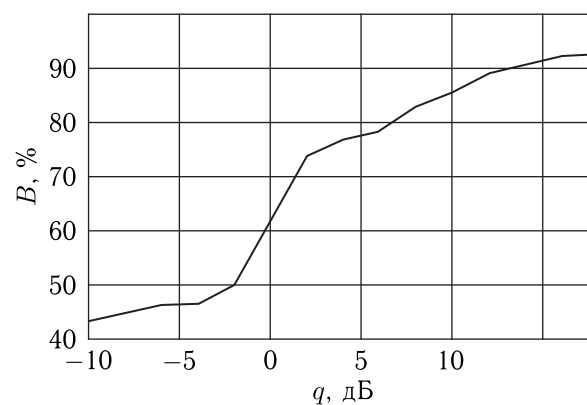


Рис. 4. Характеристика правильного распознавания видов модуляции при классификации методом ИНС-персептрон

Из анализа видно, что зависимость, изображенная на рис. 4, при ОСШ $+18$ дБ обеспечивает вероятность правильного распознавания $92,5\%$, а при ОСШ $+2$ дБ вероятность правильного распознавания равна $73,9\%$. Результаты распознавания вида модуляции, полученные при ОСШ равном -10 дБ, 0 дБ, 10 дБ, 20 дБ, представлены на рис. 5–8 соответственно.

	PSK-2	PSK-4	PSK-8	QAM-4	QAM-16	OQAM-4	OQAM-16	GFSK-2	GFSK-4	FSK-2	FSK-4	CPFSK-2	CPFSK-4	TOQPSK-4	FPSK-2	FPSK-4	DPSK-2	DPSK-4	QAM-32	QAM-64	APSK-16	APSK-32
PSK-2	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
PSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PSK-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0
QAM-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	36	0	36
OQAM-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
OQAM-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	25	0	69
GFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	20	0	47	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
CPFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	17	0	17	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOQPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	57	36	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	17	0	0	17	0	0	0	0	0
DPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	21	0	14
QAM-64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
APSK-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
APSK-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	35	0	47

Рис. 5. Результаты распознавания при ОСШ, равном –10 дБ

	PSK-2	PSK-4	PSK-8	QAM-4	QAM-16	OQAM-4	OQAM-16	GFSK-2	GFSK-4	FSK-2	FSK-4	CPFSK-2	CPFSK-4	TOQPSK-4	FPSK-2	FPSK-4	DPSK-2	DPSK-4	QAM-32	QAM-64	APSK-16	APSK-32
PSK-2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PSK-4	0	67	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0
PSK-8	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	6	0	25	0	0	0	0
QAM-4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM-16	0	0	0	0	95	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OQAM-4	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OQAM-16	0	0	0	0	10	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	18	0	0	6	0	0	0	0	0	0
FSK-2	35	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOQPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-2	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
DPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0
DPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	11	0	0	0	79	0	0	0	0
QAM-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
QAM-64	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0
APSK-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
OAPSK-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	80

Рис. 6. Результаты распознавания при ОСШ, равном 10 дБ

	PSK-2	PSK-4	PSK-8	QAM-4	QAM-16	OQAM-4	OQAM-16	GFSK-2	GFSK-4	FSK-2	FSK-4	CPFSK-2	CPFSK-4	TOQPSK-4	FPSK-2	FPSK-4	DPSK-2	DPSK-4	QAM-32	QAM-64	APSK-16	APSK-32
PSK-2	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	18	0	0	0	0
PSK-4	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	33	0	0	0	0
PSK-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	50	33	0	0	0	0
QAM-4	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0
QAM-16	0	0	0	0	27	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	13
OQAM-4	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0
OQAM-16	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	18
GFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	29	0	0	29	7	0	0	0	0	0
FSK-2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	89	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	53	0	0	20	20	0	0	0	0	0
TOQPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	11	0
FPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	75	0	6	0	0	0	0
DPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	67	11	0	0	0	0
DPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	67	0	0	0	0
QAM-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	13	0	0
QAM-64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	13
APSK-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
APSK-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	6	71

Рис. 7. Результаты распознавания при ОСШ, равном 0 дБ

	PSK-2	PSK-4	PSK-8	QAM-4	QAM-16	OQAM-4	OQAM-16	GFSK-2	GFSK-4	FSK-2	FSK-4	CPFSK-2	CPFSK-4	TOQPSK-4	FPSK-2	FPSK-4	DPSK-2	DPSK-4	QAM-32	QAM-64	APSK-16	APSK-32
PSK-2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PSK-4	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PSK-8	0	40	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM-4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM-16	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OQAM-4	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OQAM-16	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-2	40	0	0	0	0	0	0	0	0	55	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-2	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPFSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOQPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
FPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	90	0	0	0	0	0	0
DPSK-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
DPSK-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
QAM-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
QAM-64	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0
APSK-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
APSK-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	85

Рис. 8. Результаты распознавания при ОСШ, равном 20 дБ

Из анализа результатов распознавания вида модуляции сигнала следует, что при уверенном приеме (ОСШ много больше нуля) классификатор вида модуляции ошибается в сигналах, имеющих схожую структуру. При ОСШ $q = -10$; 0 дБ возможен дополнительный анализ параметров, позволяющий в ряде случаев значительно повысить вероятность правильного распознавания вида модуляции B .

Выводы

Анализ результатов обнаружения и оценки параметров сигналов и сигнально-кодовых конструкций показал следующие числовые результаты обнаружения и оценки параметров сигналов и сигнально-кодовых конструкций, аналогичных используемым в существующих бортовых РЭС КА ССС.

– Проведено моделирование различных алгоритмов классификации видов модуляции в среде MATLAB. Показано что алгоритм на основе использования ИНС, обеспечивает $B \approx 80\%$, при ОСШ $q \approx 15$ дБ.

– Проведено дополнительное моделирование алгоритмов классификации видов модуляции на основе использования ИНС.

– Разработан уникальный словарь признаков, а также оптимизирована структура ИНС. В результате показано, что разработанный алгоритм классификации видов модуляции обеспечивает вероятность правильного распознавания не менее 70% для 22 видов модуляции, соответствующих сигналам и сигнально-кодовым конструкциям, используемым в существующих и перспективных бортовых РЭС КА ССС при ОСШ не менее 2 дБ.

Список литературы

1. *Оппенгейм А., Шафер Р.* Цифровая обработка сигналов М.: Техносфера, 2006. 856 с.
2. *Кириллов С.Н., Покровский П.,С.* Алгоритм классификации вида модуляции неизвестного радиосигнала космических систем передачи информации // Вестник РГРТУ, 2013, № 2. С. 3–11.
3. *Макаров К. С.* Методы распознавания модуляции // Цифровая обработка сигналов, 2004, № 1. С. 29–35.
4. *Zhechen Zhu, Asoke K. Nandi.* Automatic Modulation Classification. Principles, Algorithms and Applications. Brunel University London, 2005. 194 p.
5. *Dobre O. A., Abdi A., Bar-Ness Y. and Su W.* Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends // IET Communications, May 2007.
6. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. 5-е изд. М.: Высшая школа, 2005. 462 с.
7. *Liang Hong, Ho K.C.* Identification of Digital Modulation Types Using the Wavelet Transform // Department of Electrical Engineering, University of Missouri-Columbia, Columbia MO 65211, USA.
8. *Hong L., Ho K.C.* Identification of digital modulation types using wavelet transform // IEEE MILCOM, 1999.
9. *Hatzichristos George.* Classification of Digital Modulation Types in Multipath Environments. Electrical Engineer thesis, Naval Postgraduate School, March 2001.
10. *Ananthram Swami, Brian M. Sadler.* Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants // IEEE Transactions on Communications, March 2000, vol. 48, № 3.
11. Automatic modulation classification: principles, algorithms, and applications / Zhechen Zhu and Asoke K. Nandi // Brunel University London, UK, 2015 John Wiley & Sons, Ltd., 194 p.
12. *Xindong Wu, Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu, Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg.* Top 10 algorithms in data mining // Knowledge and Information Systems, January 2008, vol. 14, Iss. 1. P. 1–3.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.09.2022
Дата принятия рукописи
в печать 20.02.2023