

УДК 621.391

УСТОЙЧИВЫЕ К РАСПОЗНАВАНИЮ РАДИОСИГНАЛЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ СВЯЗЬЮ МЕЖДУ СИНФАЗНОЙ И КВАДРАТУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИМИ

Покровский П.С., к.т.н., доцент кафедры радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: paulps@list.ru.

RESISTANT TO RECOGNITION RADIO SIGNALS WITH CONTROLLED COUPLING BETWEEN IN-PHASE AND QUADRATURE COMPONENTS

Pokrovskij P.S.

For radio signals with controlled coupling between in-phase and quadrature components (RSCCQC) synthesized using the combined quality index «occupied bandwidth – level of envelope fluctuation», the decision ambiguity of two different radio signal classification algorithms is analyzed. The selection of classification algorithms is executed by subject to requirements of reliable recognition under conditions a priori unknown Doppler frequency and symbol rate. To evaluate the ambiguity of algorithm decisions (i.e. the resistance to recognition) the entropy is used. It was shown that on the considering signal set there is a maximum of the decision ambiguity of the first radio signal classification algorithm. This point corresponds to a local minimum of the decision ambiguity of the second radio algorithm. And so, to determine the resistant to recognition RSCCQC the combined quality index is chosen as a weighted sum of decision entropies of these two classification algorithms. The optimal by the criterion of maximum of this sum RSCCQC provides approximately equal entropy values of both algorithms which are 0,9 bits. It was shown that these RSCCQC are comparable by basic spectral and energy characteristics with known bandwidth-efficient signals.

Key words: signal recognition, classification algorithm, all-purpose radio signal former, radio signals with controlled coupling between in-phase and quadrature components, bandwidth-efficient digital modulation

Ключевые слова: распознавание сигналов, алгоритм классификации, универсальный формирователь радиосигналов, радиосигналы с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими, спектрально-эффективные виды модуляции.

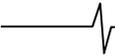
Введение

В интересах защиты современных и перспективных систем передачи информации в настоящее время развиваются методы, основанные на повышении структурной скрытности полезного радиосигнала [1]. Данный подход подразумевает, что в случае перехвата радиосигнала злоумышленник не сможет в реальном масштабе времени определить вид и параметры модуляции, и таким образом подобрать требуемый алгоритм восстановления передаваемого информационного сообщения.

Одним из способов реализации этого метода является построение систем передачи информации с применением радиосигналов с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими (РУСКС). Данный класс сигналов охватывает множество сигналов с частотными видами модуляции, в частности, сигналы с гауссовской манипуляцией с минимальным сдвигом (GMSK), а также семейство фазоманипулированных сигналов, которое, например, включает сигналы с такими известными модификациями квадратурной фазовой манипуляции со смещением (OQPSK), как OQPSK с решетчатым кодированием (T-OQPSK) и запатентованная К. Феером квадратурная манипуляция (FQPSK). При

Для радиосигналов с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими (РУСКС), синтезированных по комбинированному показателю качества «занимаемая полоса частот – уровень флуктуаций огибающей», проведен анализ однозначности решений, генерируемых двумя алгоритмами классификации вида модуляции. Выбор алгоритмов классификации производился с учетом требования надежного распознавания сигналов в условиях априорной неопределенности величин доплеровского частотного сдвига и частоты следования символов. При этом в качестве количественной меры неопределенности формируемых решений, т.е. устойчивости к распознаванию, использовано значение энтропии. Показано, что на рассматриваемом множестве сигналов имеется максимум неопределенности решений одного алгоритма классификации, который соответствует локальному минимуму другого, поэтому для определения устойчивых к распознаванию сигналов выбран комбинированный показатель в виде взвешенной суммы значений энтропий решений двух алгоритмов классификации. Оптимальные по критерию максимума этого показателя РУСКС обеспечивают примерно равные значения энтропий обоих рассмотренных алгоритмов, которые составляют 0,9 бита. Показано, что данные РУСКС по своим основным спектральным и энергетическим характеристикам сопоставимы с известными спектрально-эффективными сигналами.

этом перестройка между этими семействами сигналов в рамках РУСКС обеспечивается за счет изменения всего двух управляющих коэффициентов с возможностью формирования большого числа промежуточных, лежащих между классами известных видов частотной и фазовой манипуляции типов сигналов [2]. Так в результате синтеза РУСКС по комбинированному критерию каче-



ства, учитывающему требования на минимизацию занимаемой полосы частот и уровня флуктуации огибающей, получено множество сигналов, обеспечивающих заданное соотношение спектральной и энергетической эффективности и при этом относящихся к различным видам модуляции (фазовой и частотной) [3].

Таким образом, с учетом изложенных выше особенностей синтезированных РУСКС целью данной работы является отыскание сигнала из указанного множества, обеспечивающего наибольшую неоднозначность решений средств радиомониторинга относительно вида модуляции анализируемого сигнала.

Постановка задачи

Как известно [2], составляющие комплексной огибающей РУСКС можно представить в виде:

$$I(t) = I_1(t) - 0,5(1 - A_1)I_2(t) - 0,5(1 - A_2)I_3(t), \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_1(t) - 0,5(1 - A_1)Q_2(t) - 0,5(1 - A_2)Q_3(t). \quad (2)$$

Здесь A_1 и A_2 – коэффициенты, задающие соответственно величину межсимвольной и межкомпонентной связи, которые определяют спектральные и энергетические характеристики формируемых сигналов; $I_1(t)$, $Q_1(t)$ и $I_2(t)$, $Q_2(t)$ – синфазные и квадратурные составляющие OQPSK-сигналов, соответственно сформированные на основе элементарных импульсов $p_1(t)$ и $p_2(t)$:

$$p_1(t) = \begin{cases} \sin^2(\pi t / (2T)) & \text{при } t \in [0; 2T], \\ 0 & \text{при } t \notin [0; 2T]; \end{cases}$$

$$p_2(t) = \begin{cases} \sin^2(\pi t / T) & \text{при } t \in [0; 2T], \\ 0 & \text{при } t \notin [0; 2T]; \end{cases}$$

где T – период следования информационных символов (дифитов).

Составляющие $I_3(t)$ и $Q_3(t)$ отвечают за взаимодействие компонентов синфазного и квадратурного каналов формирования и в простейшем случае определяются в виде [2]:

$$I_3(t) = \text{sgn}[I_1(t) - 0,5(1 - A_1)I_2(t)] \cdot |Q_2(t)|,$$

$$Q_3(t) = \text{sgn}[Q_1(t) - 0,5(1 - A_1)Q_2(t)] \cdot |I_2(t)|.$$

Из анализа формул (1) и (2) следует, что РУСКС однозначно определяются значениями коэффициентов A_1 и A_2 , поэтому рассматриваемое далее множество радиосигналов будем задавать множеством пар чисел A_1 и A_2 .

Для получения радиосигналов с заданным соотношением «занимаемая полоса частот – уровень флуктуаций огибающей» в работе [3] синтезированы РУСКС с использованием следующего комбинированного показателя качества:

$$F(A_1, A_2) = (1 - \lambda)\beta(A_1, A_2) + \lambda J(A_1, A_2),$$

где $\lambda \in [0; 1]$ – весовой коэффициент, β – эффективная полоса частот радиосигнала, нормированная к частоте следования информационных символов, J – дисперсия мгновенной мощности комплексной огибающей радиосигнала:

$$J = T_0^{-1} \int_0^{T_0} (I_3^2(t) + Q_3^2(t)) dt - \left(T_0^{-1} \int_0^{T_0} (I_3^2(t) + Q_3^2(t)) dt \right)^2.$$

В результате этого двухкритериального синтеза получены функциональные зависимости $A_1(\lambda)$ и $A_2(\lambda)$. Анализ данных зависимостей показывает, что РУСКС, получаемые при $\lambda = 0$, относятся к семейству OQPSK-сигналов, а при $\lambda = 1$ – к семейству GMSK-сигналов. То есть множество синтезированных сигналов включает сигналы с фазовой и частотной манипуляцией, что позволяет определить такое значение весового коэффициента λ , которому соответствуют РУСКС, обеспечивающие наибольшую неоднозначность решения задачи распознавания вида модуляции. В связи с этим, рассматриваемое далее множество РУСКС ограничено подмножеством сигналов, определяемых зависимостями $A_1(\lambda)$ и $A_2(\lambda)$.

Таким образом, дополнительный выбор РУСКС, обеспечивающих наибольшую неоднозначность распознавания вида модуляции, можно представить, как задачу максимизации посредством выбора весового коэффициента λ меры H неоднозначности принимаемого решения соответствующей подсистемы средств радиомониторинга:

$$\max_{\lambda \in [0; 1]} H(A_1(\lambda), A_2(\lambda)).$$

Как известно [4], количественную оценку меры неопределенности решения принято проводить с использованием энтропии. В данном случае соответствующая величина определяется выражением:

$$H(A_1, A_2) = - \sum_{k=1}^N p(\Omega_k | A_1, A_2) \log_2 p(\Omega_k | A_1, A_2),$$

где $p(\Omega_k | A_1, A_2)$ – вероятность того, что алгоритм классификации отнесет РУСКС, определяемый значениями коэффициентов A_1 и A_2 , к классу Ω_k видов модуляций из N возможных.

Алгоритм классификации

В настоящее время разработаны различные алгоритмы классификации видов модуляции радиосигналов [5]. Однако большинство этих алгоритмов рассчитаны на функционирование при наличии априорных сведений о параметрах анализируемого сигнала, в том числе, о значениях частоты и фазы несущего колебания, занимаемой полосы частот, скорости передачи информации и т.п. Данное условие при реализации систем радиомониторинга, работающих в реальном масштабе времени, трудно реализуемо. Поэтому в подобных системах анализа радиообстановки применяются алгоритмы, способные обеспечить надежную классификацию вида модуляции в условиях априорной неопределенности параметров сигнала. Данное требование можно обеспечить за счет применения признаков, построенных на основе оценок функций плотности вероятности мгновенной амплитуды, частоты и фазы анализируемого радиосигнала [6, 7]. Для описания вероятностных моделей указанных случайных величин используются гистограммы и характеристические функции. В частности, в работе [8] представлен алгоритм классификации вида модуляции радиосигнала, словарь признаков которого содержит данные характеристики. Это позволяет алгоритму из работы [8] производить надежную оценку вида модуляции в

условиях априорной неопределенности перечисленных выше параметров радиосигналов в режиме реального масштаба времени. С учетом вышеперечисленного, данный алгоритм используется далее для оценки устойчивости к распознаванию РУСКС.

Обучающая выборка алгоритма классификации построена с учетом сведений об использовании различных видов цифровой модуляции в существующих системах передачи информации. Так в качестве тестовых выбраны сигналы с двух, четырех и восемью позиционной фазовой манипуляцией (соответственно, BPSK, QPSK и PSK-8), OQPSK-сигналы, сигналы с шестнадцати позиционной квадратурной амплитудной модуляцией (QAM-16), а также сигналы с двоичной частотной манипуляцией (FSK-2), манипуляцией с минимальным сдвигом (MSK) и GMSK. При этом для повышения устойчивости алгоритма классификации к вариациям характеристики предмодуляционного фильтра сигналы с BPSK, QPSK, PSK-8, OQPSK и QAM-16 для обучающей выборки формировались на основе четырех типов элементарного импульса: прямоугольного импульса, импульса $p_i(t)$, а также импульсов с характеристиками типа «корень квадратный из приподнятого косинуса» при коэффициенте ската $\alpha = 0,35$ и $\alpha = 0,70$. С аналогичной целью для формирования GMSK-сигналов использовались гауссовские фильтры с относительной полосой пропускания $BT = 0,25; 0,3; 0,4; 0,5$. Для каждой модификации перечисленных типов сигналов сформировано 1000 реализаций, соответствующих передаче 1000 случайных информационных символов. Для сигналов с FSK-2 и MSK обучающие выборки составляли 4000 реализаций, несущих также 1000 случайных информационных символов.

Кроме того, все сигналы обучающей выборки подвергались воздействию аддитивного «белого» гауссовского шума, при этом отношение средней энергии E_b одного бита к спектральной плотности N_0 мощности шума составляло $E_b / N_0 = 25$ дБ. Данный уровень шумов позволяет уверенно детектировать рассматриваемые типы радиосигналов, т.е. имеется возможность в реальном масштабе времени производить полный структурный анализ радиосигналов. При этом наличие шума обеспечивает реализацию свойства робастности алгоритма классификации вида модуляции. Кроме того, в сигналы обучающей выборки внесена случайная частотная расстройка, величина которой равномерно распределена в интервале от -5% до 5% относительно скорости передачи информационных символов.

Для оценки адекватности функционирования алгоритма классификации вида модуляции сформирована тестовая выборка. При этом количество и условия получения сигналов этой выборки аналогичны используемым для обучающей выборки. Проведенные исследования показали, что средняя вероятность правильной классификации на тестовой выборке составила более 95% .

Дополнительно для анализа устойчивости РУСКС к распознаванию вида модуляции использовался алгоритм классификации, предложенный в работе [9]. Данный алгоритм также отвечает поставленному требованию устойчивости получаемых решений к априорной неопределенности параметров радиосигналов. Используемый состав алфавита классов и условия обучения

данного алгоритма классификации аналогичны описанным в работе [9], что при отношении $E_b / N_0 = 25$ дБ обеспечивает вероятность правильной классификации на уровне 97% для 11 типов анализируемых радиосигналов. Данный алгоритм классификации помимо перечисленных выше 8 видов модуляции, способен распознавать такие виды модуляции, как относительная двух и четырех позиционная фазовая манипуляция (соответственно, DBPSK и DQPSK), а также четырех позиционную частотную манипуляцию (FSK-4).

Компьютерное моделирование

Определение наиболее устойчивого к распознаванию РУСКС осуществлялось посредством компьютерного моделирования, в рамках которого реализации радиосигнала, соответствующего значениям $A_1(\lambda)$ и $A_2(\lambda)$, поступали на вход перечисленным выше двум алгоритмам классификации вида модуляции. При этом значение весового коэффициента λ изменялось в интервале $[0; 1]$ с дискретом $0,02$, а статистика набиралась на основе 1000 реализаций, длительность которых составляла 1000 информационных символов. Уровень шума соответствовал значению отношения $E_b / N_0 = 25$ дБ, расстройка по частоте не вносилась.

На основе полученных решений приведенных выше алгоритмов классификации производились оценки энтропии H принятия решения по отношению рассматриваемого РУСКС к сигналам с фазовой или частотной манипуляцией. При этом к фазовой манипуляции отнесены такие виды модуляции, как BPSK, QPSK, OQPSK, PSK-8, DBPSK, DQPSK, QAM-16, а к частотной – FSK-2, MSK, GMSK, FSK-4. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 1 в виде зависимостей энтропии H от весового коэффициента λ , кривые 1 и 2 построены соответственно для алгоритмов классификации видов модуляции, описанных в работах [8] и [9].

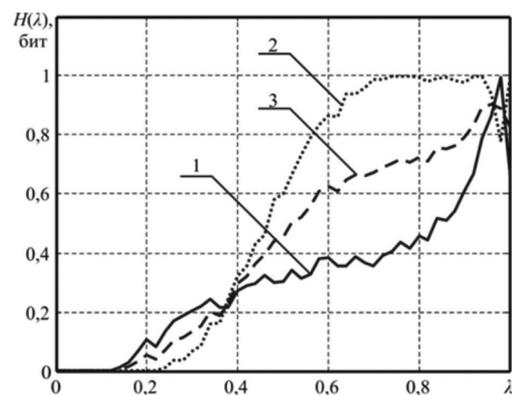


Рис. 1. Зависимости энтропии H при классификации РУСКС от параметра синтеза λ

Анализ рис. 1 показывает, что максимум ($\lambda = 0,98$) неопределенности алгоритма, описанного в работе [8], приходится на локальный минимум энтропии принятия решения алгоритмом, представленным в [9]. В этой связи для определения РУСКС, обладающих высокой устойчивостью к определению вида модуляции сразу двумя рассматриваемыми алгоритмами классификации, рассмотрен показатель качества, представляющий собой взвешенную сумму энтропий принятия решения этих двух алгоритмов, т.е. следующая величина:

$$H_{\Sigma} = 0,5 \cdot H_1 + 0,5 \cdot H_2. \quad (3)$$

Здесь H_1 и H_2 – энтропии принятия решений алгоритмами классификации, приведенными в работах [8] и [9], соответственно.

Зависимость комбинированного показателя качества H_{Σ} от весового коэффициента λ также представлена на рис. 1 в виде кривой 3. Анализ данной зависимости показывает, что оптимальными по введённому критерию являются РУСКС, синтезированные при $\lambda = 0,96$. Данный радиосигнал получается при следующих значениях управляющих коэффициентов – $A_1 = 0,76$ и $A_2 = 0,65$. Соответствующий РУСКС характеризуется примерно одинаковыми величинами энтропии решений обоих рассматриваемых алгоритмов классификации, т.е. $H_1 = H_2 \approx 0,9$ бит. При этом вероятность того, что оба этих алгоритма отнесут данный РУСКС к классу фазовой или частотной манипуляции, близка к уровню 50 % (68/32).

Для подобных устойчивых к распознаванию РУСКС с использованием результатов работы [2] рассчитаны основные спектральные и энергетические характеристики. Полученные числовые значения вместе с соответствующими параметрами радиосигналов с известными спектрально-эффективными видами модуляции [10] сведены в табл. 1. Здесь под полосой частот понимается нормированная к скорости передачи информационных символов полоса частот, в которой сосредоточено 99 % мощности сигнала, а под помехоустойчивостью – значение отношения E_b / N_0 , которому соответствует частота битовых ошибок, равная 10^{-3} .

Таблица 1. Характеристики радиосигналов

Вид сигнала	Помехоустойчивость, дБ	Полоса частот	Пик-фактор
Устойчивый к распознаванию РУСКС	7,3	1,6	1,02
T-OQPSK	6,8	1,4	1,15
GMSK $BT = 0,5$	6,8	2,0	1,00
FQPSK	7,2	1,6	1,02

Анализ данных табл. 1, показывает, что РУСКС, синтезированный по критерию минимума показателя качества (3) при $\lambda = 0,96$, сопоставим по основным характеристикам с известными спектрально-эффективными сигналами. В частности, этот РУСКС при прочих равных параметрах проигрывает по помехоустойчивости порядка 0,1 дБ FQPSK-сигналам. В сравнении с рассмотренным GMSK-сигналом при примерно одинаковом уровне пик-фактора (разница менее 0,02) выбранный РУСКС позволяет на 20 % сократить занимаемую полосу частот при потерях на уровне 0,5 дБ в устойчивости к действию шумов. T-OQPSK-сигналы по величине пик-фактора проигрывают данному РУСКС порядка 11 % при выигрыше на 0,5 дБ по помехоустойчивости (в линейном режиме работы оконечных каскадов передатчика) и на 15 % по полосе частот. При этом РУСКС, синтезированный при $\lambda = 0,96$, обеспечивает достаточно высокую (0,9 бита) неопределенность решения рассмотренных алгоритмов относительно вида модуляции (фазовая или частотная).

Заключение

Для выбора устойчивых к распознаванию радиосиг-

налов рассмотрено семейство РУСКС, синтезированных по комбинированному показателю качества «занимаемая полоса частот – уровень флуктуаций огибающей». Для количественной оценки меры устойчивости сигналов к распознаванию использовалась энтропия принятия решения алгоритмом классификации. При этом рассмотрено два алгоритма классификации, обеспечивающих среднюю вероятность правильного распознавания не менее 95 % в условиях априорной неопределенности параметров обрабатываемого сигнала. Анализ полученных зависимостей энтропии от параметра синтеза РУСКС не позволил однозначно определить наиболее устойчивый радиосигнал, так как максимум неопределенности решений одного алгоритма классификации соответствовал локальному минимуму другого. В этой связи для выбора устойчивого к распознаванию радиосигнала предложено использовать комбинированный показатель качества в виде взвешенной суммы энтропий, соответствующих двум алгоритмам классификации. Проведенные исследования показали, что максимум данного показателя обеспечивается при $\lambda = 0,96$, т.е. при значениях коэффициентов $A_1 = 0,76$ и $A_2 = 0,65$. При этом энтропии решений, генерируемых рассмотренными алгоритмами классификации, примерно равны величине 0,9 бита. Дополнительный анализ показал, что определенные таким образом РУСКС сопоставимы по основным спектральным и энергетическим параметрам с радиосигналами с современными спектрально-эффективными видами модуляции, такими как T-OQPSK, GMSK и FQPSK.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-36538.2018.9 (соглашение № 075-02-2018-681 от 16.11.2018 г.).

Литература

1. Жук А.П., Иванов А.С. Повышение структурной скрытности системы передачи информации с кодовым разделением каналов // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли, № 1, 2011. С. 26-28.
2. Кириллов С.Н., Покровский П.С. Программно-управляемый формирователь радиосигналов с нелинейными видами модуляции // Нелинейный мир, № 3, 2013. С. 150-157.
3. Покровский П.С. Процедура синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими по двум показателям качества // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 2 (выпуск 52). 2015. С.49-55.
4. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ./ Под ред. Кловского Д.Д. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
5. Макаров К.С. Методы распознавания модуляции // Цифровая обработка сигналов, 2014, №1. С. 29-35.
6. O.A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, W. Su, «Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends», Com. IET, vol. 1, No. 2, 2007, pp. 137–156.
7. Bhawna, M. Kaur, G.C. Lall, «Automatic Modulation Recognition for Digital Communication Signals», IJSCCE, vol. 2, 2012, pp. 110-114.
8. Liedtke F., «Adaptive procedure for automatic modulation recognition», Journal of Telecommunications and Information Technology, No. 4, 2004, pp. 91-97.
9. Кириллов С.Н., Покровский П.С. Алгоритм классификации вида модуляции неизвестного радиосигнала космических систем передачи информации // Вестник РГПУ, №2, 2013. С. 3-11.
10. Simon M.K. Bandwidth-Efficient Digital Modulation with Application to Deep-Space Communications. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. URL: <https://descanso.jpl.nasa.gov/monograph/series3/complete1.pdf>.