

УДК 621.396

АЛГОРИТМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ВИДА МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ АДАПТАЦИИ РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ К ДЕЙСТВИЮ СТРУКТУРНОЙ ПОМЕХИ

А. А. Лисничук, д.т.н., профессор кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com

П. С. Мещанинов, магистрант кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0005-1295-7904, e-mail: kuznezocovp931@gmail.com

*Вследствие интенсивного использования радиосистемами передачи информации (РСПИ) частотного ресурса, структурные помехи становятся всё более распространёнными. Кроме того, необходимо передавать больше данных и увеличивать скорость в радиоканале без потери качества. Адаптивная вариация вида модуляции позволяет изменять радиосигнал в зависимости от условий передачи, обеспечивая баланс между устойчивостью к помехам и спектральной эффективностью. Однако, как правило, этот метод использует только один критерий, не учитывая другие важные характеристики РСПИ, такие как пик-фактор сигнала. **Целью работы** является разработка алгоритма многокритериального выбора вида модуляции для адаптации РСПИ к действию структурной помехи. Многокритериальный подход позволяет учитывать несколько критериев качества: устойчивость к аддитивному белому гауссовскому шуму (АБГШ) и структурной помехе, энергоэффективность формируемого сигнала, а также спектральную эффективность. Использование разработанного алгоритма реализует выигрыш в спектральной эффективности в 1,5 – 2 раза по сравнению с РСПИ со статической модуляцией, а – по пик-фактору в 1,2 – 1,6 раза по сравнению с адаптивной системой на основе вариации вида модуляции только в классе QAM-сигналов.*

Ключевые слова: адаптивная модуляция, помехоустойчивость, структурная помеха, пик-фактор, многокритериальный подход.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-13-23

Введение

Из-за постоянного увеличения количества приёмопередающих устройств и интенсивного использования радиочастотного ресурса структурные (сигналоподобные) помехи получают всё большее распространение, включая в себя как непреднамеренное излучение мощных передатчиков, так и организованную постановку помех [1]. Данный класс помех отличает негативное влияние на радиосистемы передачи информации (РСПИ) за счет совпадающих частотно-временных характеристик. Кроме того, присутствует тенденция к требованию передачи всё большего объёма данных и увеличению скорости в радиоканале без ухудшения качественных характеристик.

Известен способ уменьшения влияния помех, в том числе и структурных, при помощи адаптивной вариации вида модуляции [2]. Принцип действия заключается в том, что модуляция радиосигнала изменяется в зависимости от условий радиоканала. Данный подход позволяет достичь компромисса в выборе между помехоустойчивостью и спектральной эффективностью в текущий момент времени. Недостатком такого способа является переключение на основе одного критерия, не учитывающего другие важные характеристики РСПИ, например пик-фактор сигнала. Избежать этого можно при помощи многокритериального подхода, позволяющего оценить эффективность переключения вида модуляции на основании целевой функции, при вычислении которой учитываются несколько критериев качества.

Целью работы является разработка алгоритма многокритериального выбора вида модуляции для адаптации РСПИ к действию структурной помехи.

В [3] описана модель воздействия структурных помех на РСПИ с цифровой модуляцией QAM, а в [4] на адаптивные системы передачи. В данных работах показано, что рассмотрение одновременного воздействия большого числа структурных помех нецелесообразно из-за сложности их анализа. Усовершенствование адаптивных алгоритмов является важным этапом развития РСПИ, т.к. необходимо в постоянной полосе передавать больше информации без ухудшения качества. В [5-7] рассматриваются различные применения таких систем, в том числе там, где стандартные методы не используются из-за особенностей условий работы, например, при сильных помехах и замираниях. Применение многокритериального подхода [8, 9] в условиях увеличивающегося разнообразия структурных помех является одним из вариантов улучшения систем адаптации, расширяющим их область применения.

Многокритериальный подход

Анализ эффективности переключения целесообразно провести на основе многокритериального подхода [10-13], учитывающего конечное множество показателей качества $W = \{w_i\}, i = 1, \dots, c$, где w_i – i -й частный показатель, c – количество показателей.

Обозначим через $w_{i,j}$ значение i -го показателя для j -го вида модуляции $j = 1, \dots, s$, где s – количество анализируемых видов модуляции.

Первым этапом многокритериального подхода является нормировка значений показателей $w_{i,j}$ при использовании выражения:

$$w_{i,j}^* = \frac{w_{i,j}}{w_{i,j\max}}, \quad (1)$$

где $w_{i,j\max} = \max_j(w_{i,j})$ – максимальное значение i -го показателя $w_{i,j}$ для s анализируемых видов модуляции.

Далее осуществляется сведение векторного показателя качества к скалярному для чего значения $w_{i,j}^*, i = 1, \dots, c, j = 1, \dots, s$ для каждого анализируемого вида модуляции необходимо привести к виду, пригодному для минимизации с использованием множества весовых коэффициентов $\{\alpha_i\}, i = 1, \dots, c$, где α_i – i -й весовой коэффициент для i -го показателя качества. Выбор значений весовых коэффициентов $\alpha_i, i = 1, \dots, c$ должен осуществляться исходя из текущих помеховой обстановки и требований к РСПИ.

На заключительном этапе рассчитывается значение целевой функции β_j для j -го вида модуляции в соответствии с выражением:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^c \alpha_i w_{i,j}^*, \quad j = 1, \dots, s, \quad \sum_{i=1}^c \alpha_i = 1. \quad (2)$$

На основании выражения (2) можно сделать вывод о целесообразности использования j -го вида модуляции при достижении минимального значения $\beta_j, j = 1, \dots, s$ для выбранного множества показателей качества W и множества весовых коэффициентов $\alpha_i, i = 1, \dots, c$.

Показатели качества для алгоритма выбора вида модуляции

Анализ функционирования РСПИ зачастую выполняется при учете действия только аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), но в действительности передача происходит при действии совокупности АБГШ и различных помех. Влияние последних имеет свои особенности. Как отмечалось, структурные помехи оказывают негативное действие на функционирование РСПИ, поскольку у таких мешающих сигналов параметры, например, частота несущей, модуляция, занимаемая полоса и пр., частично или полностью совпадают с характеристиками полезного сигнала. Это приводит к снижению качества детектирования данных или полностью нарушает его процесс. В данной работе рассматриваются помехи, отличающиеся от сигнала типом модуляции и информационной последовательностью.

Целесообразно рассмотреть следующие показатели качества РСПИ при действии структурных помех:

1) w_1 – PAPR (peak-to-average power ratio), отношение пиковой мощности сигнала к её среднеквадратичному значению. Для повышения КПД усилители мощности работают в нелинейном режиме, а, следовательно, для снижения искажений и повышении энергоэффективности на передающей стороне РСПИ требуется минимизация такого показателя.

2) w_2 – минимальное значение E_b / N_0 (отношение энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности АБГШ), при котором вероятность битовой ошибки составляет менее 10^{-3} . Чем ниже это значение, тем меньшая мощность должна быть у сигнала для обеспечения требуемого качества.

3) w_3 – минимальное значение отношения сигнал/помеха (ОСП), при котором вероятность битовой ошибки менее 10^{-3} . Значение w_3 является постоянным параметром для каждого сочетания модуляций сигнала и помехи.

4) w_4 – спектральная эффективность – количество данных, которое можно передать в заданной полосе частот в единицу времени. В работе происходит передача при постоянной полосе канала, потому данный критерий зависит только от позиционности модуляции.

Необходимо отметить, что критерии w_3 и w_4 можно учитывать косвенно для упрощения итоговой целевой функции:

– Показатель качества w_3 . При значении ОСП ниже некоторого порога заданная вероятность ошибки недостижима. Если качество канала не позволяет использовать какой-то тип модуляции, то его целесообразно сразу исключить из списка рассматриваемых.

– Показатель качества w_4 . Для максимизации данного параметра целесообразно разбить модуляции на группы по позиционности (в порядке уменьшения). Тогда выбор модуляции будет начинаться с радиосигнала с наибольшей позиционностью. Т.к. в (2) показатели необходимо минимизировать, то в целевой функции данный показатель будет рассчитывать как обратная зависимость, т.е. $1/w_4$.

Показатели качества w_3 и w_4 являются постоянными для каждого типа модуляции, следовательно, итоговая целевая функция будет зависеть только от показателей w_1 и w_2 .

Весовые коэффициенты выбираются в зависимости от текущих требований к РСПИ. При увеличении α_1 будет акцент на снижение энергопотребления линии связи. При увеличении $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ большую значимость имеет помехоустойчивость к АБГШ. Вариация значения веса α_1 позволяет задать компромисс между рассмотренными показателями качества.

Тогда множество показателей $W = \{w_1, w_2\}$ целесообразно применять для двухкритериального выбора вида модуляции. Виды цифровых модуляций (PSK, APSK, QAM) распространены в современных телекоммуникационных системах, потому актуально их рассмотрение. С помощью компьютерного моделирования были рассмотрены $s = 10$ видов модуляций, исходные значения соответствующих показателей качества и результат нормировки с использованием выражения (1) представлены в таблице 1.

Исходя из анализа таблицы 1, радиосигналы с QAM обладают большей помехоустойчивостью внутри одной позиционности (среди рассмотренных), а PSK-сигналы характеризуются минимальным значением PAPR. Класс сигналов с APSK целесообразно рассмотреть как компромисс между выше обозначенными.

Как было указано ранее, при некотором значении ОСП вероятность битовой ошибки не способна достичь требуемого значения 10^{-3} , что показывает применимость конкретной модуляции сигнала для текущих условий радиоканала. Для определения таких пороговых значений ОСП в среде MATLAB разработана имитационная модель РСПИ, состоящая из пере-

датчика, канала связи и приёмника. В канале связи происходит добавление АБГШ и структурной помехи с заданными параметрами. Таким образом, вероятность ошибки зависит от значения E_b / N_0 и значения ОСП. Для определения зависимости вероятности ошибки от ОСП для каждой модуляции было установлено постоянное значение E_b / N_0 , при котором осуществлялось моделирование, равное $1,5 \cdot w_2$. Данное значение должно быть достаточным, чтобы влияние АБГШ было менее заметно по сравнению с влиянием структурной помехи. В процессе моделирования выполнялось увеличение отношения сигнал/помеха от 0 до 40 дБ с шагом 0,5 дБ, и определялось минимальное значение ОСП, при котором частота битовых ошибок на приёмнике удовлетворяет требованию качества передачи (см. таблицу 2).

Таблица 1 – Показатели качества видов модуляции

Table 1 – Quality indicators of modulation types

№ п/п	Модуляция	Исходные значения		Нормированные значения	
		w_1	w_2 , дБ	w_1^*	w_2^*
1	PSK-4	1,0	6,6	0,22	0,28
2	PSK-16	1,0	13,2	0,22	0,56
3	APSK-16	1,9	12,4	0,43	0,53
4	QAM-16	2,5	10,1	0,55	0,43
5	PSK-64	1,0	22,1	0,22	0,94
6	APSK-64	3,1	16,4	0,68	0,70
7	QAM-64	4,0	14,0	0,90	0,60
8	PSK-128	1,0	23,5	0,22	1,00
9	APSK-128	3,4	18,2	0,75	0,78
10	QAM-128	4,5	17,5	1,00	0,75

Таблица 2 – Пороговое значение отношения сигнал/помеха

Table 2 – Threshold value of the signal-to-interference ratio

Сигнал Помеха	PSK-4	Позиционность 16			Позиционность 64			Позиционность 128		
		QAM	APSK	PSK	QAM	APSK	PSK	QAM	APSK	PSK
PSK-4	9,5	13,0	15,0	17,0	17,5	19,0	27,0	22,0	21,5	25,0
QAM-16	9,5	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5	28,0	23,0	23,0	27,0
APSK-16	10,0	14,5	15,0	17,5	19,0	19,5	27,5	22,5	22,0	26,0
PSK-16	9,5	14,0	14,5	17,0	18,5	19,0	27,0	22,0	21,0	25,0
QAM-64	10,0	14,5	16,5	17,5	19,5	21,0	27,5	22,5	23,5	27,5
APSK-64	10,0	14,5	15,5	17,5	19,5	20,0	27,5	22,5	22,5	26,5
PSK-64	9,5	14,0	14,5	17,0	18,5	19,0	27,0	22,0	21,0	25,0
QAM-128	10,0	14,5	16,0	17,5	19,5	20,5	28,0	23,0	23,0	27,0
APSK-128	10,0	14,5	15,5	17,5	19,0	20,0	27,5	22,5	22,0	26,0
PSK-128	9,5	14,0	14,5	17,0	18,5	19,0	27,0	22,0	21,0	25,0
QAM-256	10,0	14,5	16,5	17,5	19,5	21,0	28,0	23,0	23,5	28,0
QAM-512	10,0	14,5	16,0	17,5	19,5	20,5	28,0	23,0	23,0	27,5

Как видно из таблицы 2, в каждой группе позиционности сигнала, в среднем наибольшее ухудшение вносит структурная помеха с модуляцией QAM, что можно связать с большей вариацией значений помехи (при фиксированной средней мощности). Влияние QAM разной позиционности практически одинаково, пороговое значение ОСП отличаются незначительно. Для проверки было дополнительно рассмотрено влияние помех с модуляцией QAM-256 и QAM-512. С увеличением позиционности модуляции влияние осталось на том же уровне. Далее в работе без потери общности используются пороговые значения ОСП при действии помехи QAM-128.

Алгоритм адаптации выполняет переключение видов модуляции при значении ОСП от 10 до 28 дБ. При значениях ниже этого диапазона функционирование РСПИ можно обеспе-

читать только при использовании сигналов с PSK-4, при большем же значении – структурная помеха не вносит сильного влияния. Также при отношении сигнал/помеха менее 23 дБ невозможно использовать модуляции с позиционностью 128, а при ОСП менее 19,5 дБ невозможно использовать группу с позиционностью 64.

Для реализации максимизации критерия спектральной эффективности модуляции разбиваются по позиционности на 4 группы, внутри которых они расположены по возрастанию помехоустойчивости к действию АБГШ: PSK-128, APSK-128, QAM-128; PSK-64, APSK-64, QAM-64; PSK-16, APSK-16, QAM-16; PSK-4. Без использования данного подхода минимум целевой функции $\beta_j(\alpha_1, \alpha_2)$ всегда у модуляции PSK-4, имеющей лучший PAPR и помехоустойчивость, но обладающей наименьшей спектральной эффективностью.

Разработка многокритериального алгоритма выбора вида модуляции

На рисунке 1 представлена структурная схема адаптивной РСПИ. Схема включает в себя передатчик, канал связи и приёмник. В передатчик входят модулятор, помехоустойчивый кодер, устройство управления 1, необходимое для переключения типа передаваемой информации (информационное сообщение или пилот-сигнал). В приёмник входят демодулятор, декодер, устройство управления 2, оценивающее частоту ошибочных бит, после чего система адаптации принимает решение о продолжении передачи или переключении на следующую модуляцию в списке. Канал связи характеризуется мощностью АБГШ и структурной помехой.

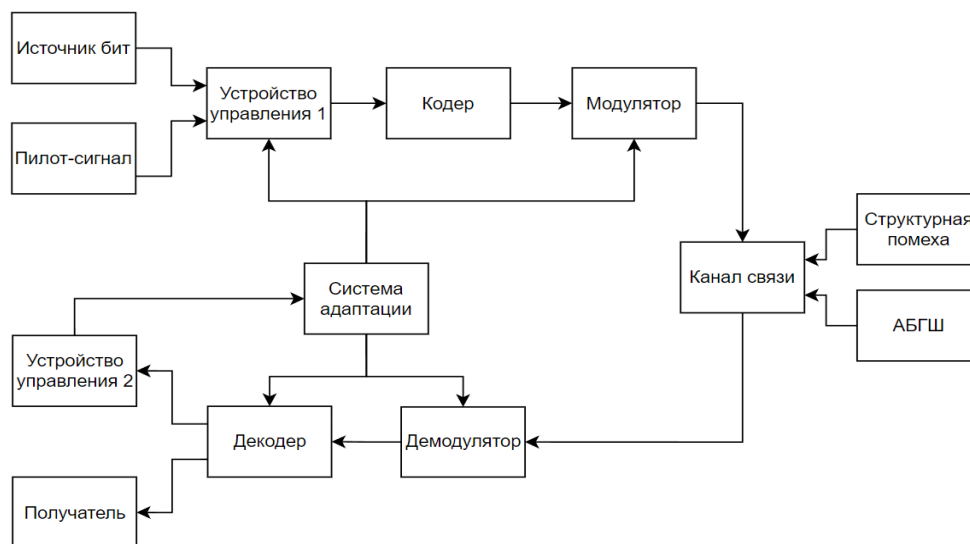


Рисунок 1 – Структурная схема адаптивной системы
Figure 1 – Adaptive system structural diagram

Система адаптации, находится на приёмнике и в начале передачи определяет начальную модуляцию для передачи. Устройство управления 1 отправляет пилот-сигнал с модуляцией максимальной позиционности, допустимой в данных условиях, длиной 10^5 бит для определения качества в канале. Данного количества бит достаточно [14], чтобы по нему адекватно оценить качество канала и принять решение о необходимости переключения модуляции. На приёмной стороне оценивается частота появления ошибочных бит и по обратному каналу посылается сигнал. Если вероятность больше 10^{-3} , то сигнал на смену модуляции, в противном случае сигнал на передачу полезного сигнала.

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма выбора модуляции. Алгоритм выполняется при изменении характеристик канала или при задании новых весовых коэффициентов. Сначала вводится отношения сигнал/помеха в канале (может определяться на основе одного из известных подходов). В цикле 2 происходит сравнение измеренного значения с пороговым для всех модуляций и определение разрешённых типов модуляции. Для разрешённых типов в блоке 4 происходит вычисление целевой функции $\beta_j(\alpha_1, \alpha_2)$.

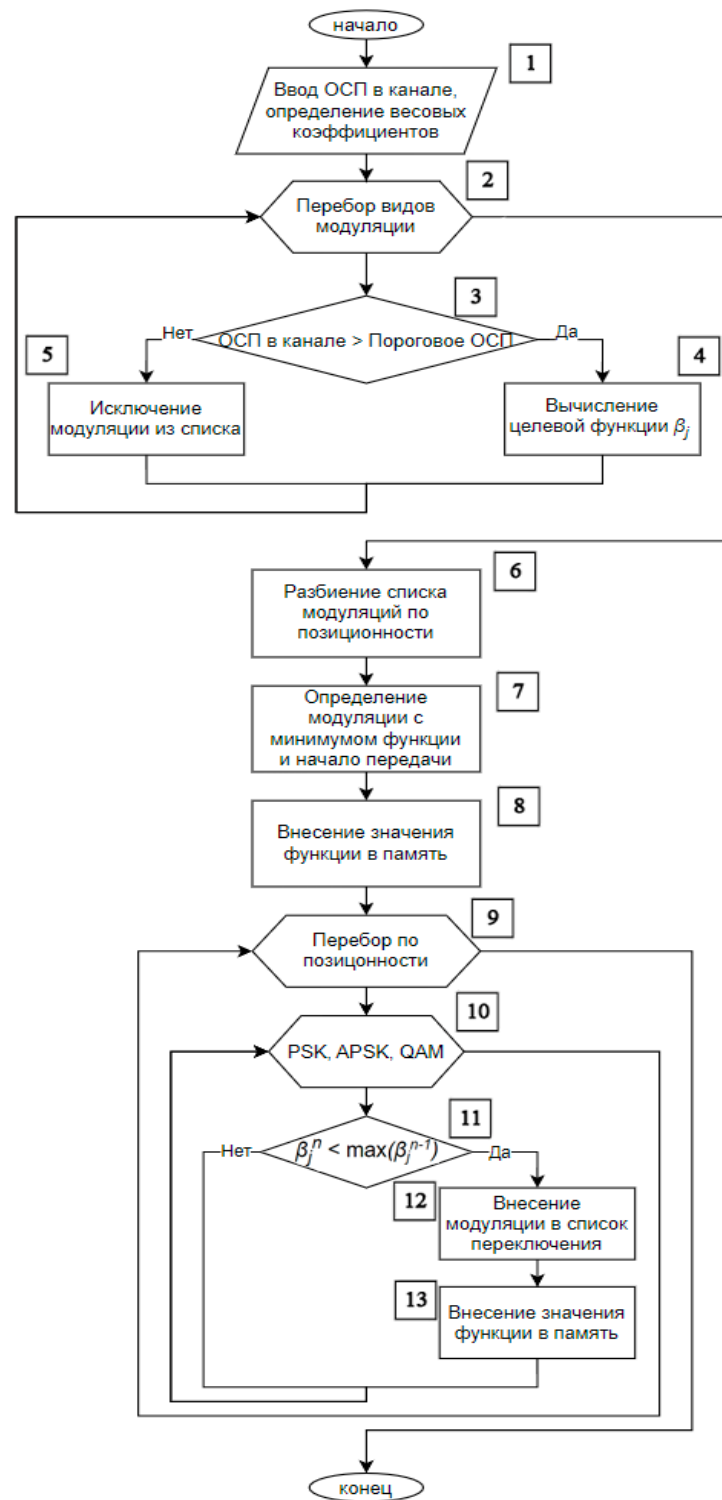


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма выбора вида модуляции
 Figure 2 – Flow diagram of modulation type selection algorithm

После разбиения модуляций по позиционности в блоке 6, в блоках 7-8 в первой итерации в группе с максимальной позиционностью по минимуму целевой функции определяется модуляция, которая используется для передачи сигнала в текущий момент, а само значение заносится в память. В цикле 9 происходит перебор остальных групп; цикл 10 рассматривает модуляции внутри каждой группы по мере увеличения PAPR, т.е. PSK, APSK, QAM. Такой порядок обусловлен тем, что если первой будет рассматриваться QAM, то оставшиеся два типа не смогут использоваться при переключении, т.к. не обеспечат необходимую помехоустойчивость.

Для определения дальнейших используемых модуляций происходит сравнение значения целевой функции, полученной на текущей итерации n , с максимумом среди значений функции из памяти, полученных на предыдущих итерациях $n-1$ (блок 11). Индекс $n-1$ указывает на то, что сравнение происходит с максимумом из предыдущих итераций. Таким образом, в данном блоке будут исключаться модуляции, значение целевой функции которых больше, чем у ранее используемых модуляций.

Рассмотрим работу алгоритма на примере. Пусть в канале действует структурная помеха с модуляцией QAM-64 и отношением сигнал/помеха 25 дБ. Весовые коэффициенты $\alpha_1 = 0,6$ и $\alpha_2 = 0,4$. Сначала исключаются модуляции, для которых ОСП 25 дБ является меньше порогового. Список разрешённых модуляций со значениями целевых функций представлен в таблице 3. В группе с максимальной позиционностью выбирается APSK-128, запоминается значение функции 0,762 и начинается передача с данной модуляцией. В позиционности 64 значение функции APSK меньше, чем максимум. У QAM-64 значение функции больше, поэтому модуляция исключается. Аналогичные действия происходят в следующих группах. В итоге получаем последовательность смены видов модуляции при линейном уменьшении значения E_b / N_0 : APSK-128, APSK-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4.

Таблица 3 – Список разрешённых типов модуляции

Table 3 – List of allowed modulation types

Модуляция	Позиционность 128		Позиционность 64		Позиционность 16			PSK-4
	APSK	QAM	APSK	QAM	PSK	APSK	QAM	
Значение функции	0,762	0,897	0,689	0,777	0,359	0,469	0,500	0,247

Данный алгоритм применяет многокритериальный подход для выбора модуляций и составления списка переключений в случае ухудшения канала. Непосредственно переключение осуществляется при условии, что частота битовых ошибок в канале превысила пороговое значение 10^{-3} (без учета помехоустойчивого кодирования).

Как было сказано ранее, итоговая целевая включает в себя показатели качества w_1 и w_2 . Соответственно, учитываются весовые коэффициенты α_1 и α_2 . Из условия (2) следует, что $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$. В интересах учёта особенностей эксплуатации при различных условиях целесообразно рассмотреть множества $\{\alpha_i\}$, состоящие из значений весовых коэффициентов $\alpha_i, i = 1, \dots, c, \alpha_i = [0; 1]$ с шагом 0,1. Последовательность переключения при работе алгоритма для рассматриваемых множеств $\{\alpha_i\}$ при значении отношения сигнал/помеха 28 дБ, при котором возможно использование всего перечня типов модуляций, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Последовательности многокритериального выбора видов модуляции

Table 4 – Modulation type sequences using multi-criteria approach

α_1	Последовательность переключения модуляций
0	QAM-128, APSK-64, QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4
0,1	
0,2	APSK-128, APSK-64, QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4
0,3	PSK-128, PSK-64, APSK-64, QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4
0,4	PSK-128, PSK-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4
0,5	
0,6	
0,7	PSK-128, PSK-64, PSK-16, PSK-4
0,8	
0,9	
1	

Как видно в таблице 4, при увеличении α_1 приоритет смещается в сторону критерия PAPR и алгоритм стремится к использованию только модуляций PSK. На результаты расчёта целевой функции также влияет текущее значение отношения сигнал/помеха, т.к. при значении ОСП меньше порогового нецелесообразно использовать тип модуляции, который не способен обеспечить требуемое качество.

Результаты имитационного моделирования

Рассмотрим работу алгоритма в условиях действия структурных помех при различных весовых коэффициентах (см. рисунок 3).

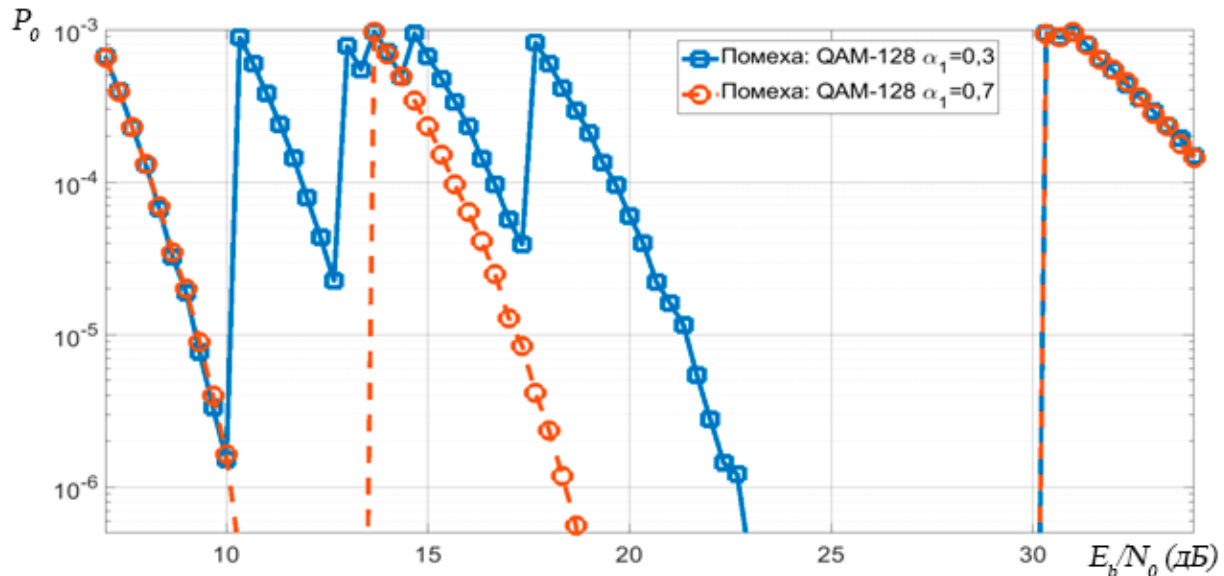


Рисунок 3 – Зависимость битовой ошибки от E_b / N_0 в случае адаптивной РСПИ при действии структурной помехи QAM-128 с ОСП 28 дБ при $\alpha_1 = 0,3$ и $\alpha_1 = 0,7$

Figure 3 – Dependence of bit error E_b / N_0 in case of adaptive RCS in the presence of structural interference QAM-128 with OSB 28 dB when $\alpha_1 = 0,3$ and $\alpha_1 = 0,7$

На рисунке 3 на промежутке от 18 до 30 дБ наблюдается провал. Это связано с тем, что вероятность ошибки меньше, чем рассматриваемый диапазон.

При действии помехи с модуляцией QAM-128 (аналогично для PSK-128, APSK-128) при ОСП 28 дБ и $\alpha_1 = 0,3$ схема переключения включает: PSK-128 (от 31 до 35 дБ), PSK-64 (от 30 до 31 дБ), APSK-64 (от 17,5 до 30 дБ), QAM-64 (от 14,5 до 17,5 дБ), PSK-16 (от 13,5 до 14,5 дБ), APSK-16 (от 13 до 13,5 дБ), QAM-16 (от 10 до 13 дБ), PSK-4 (от 7 до 10 дБ). В данных условиях использование разработанного алгоритма адаптации по сравнению с системой передачи на основе PSK-4 в тех же условиях даёт выигрыш в спектральной эффективности в 2 раза. По сравнению с адаптивной системой, использующей семейство модуляций QAM, данный алгоритм проигрывает по спектральной эффективности на 15 %, но даёт выигрыш в PAPR на 30 %. Для определения числовых характеристик РСПИ количество бит на символ для каждой используемой модуляции умножается на промежуток E_b / N_0 , в котором она используется, и делится на общий рассматриваемый диапазон E_b / N_0 , после чего все значения суммируются. Вычисления для PAPR аналогичны.

При действии помехи с модуляцией QAM-128 (аналогично для PSK-128, APSK-128) при ОСП 28 дБ и $\alpha_1 = 0,7$ схема переключения включает: PSK-128 (от 31 до 35 дБ), PSK-64 (от 30 до 31 дБ), PSK-16 (от 13,5 до 30 дБ), PSK-4 (от 7 до 13,5 дБ). В данных условиях использование разработанного алгоритма адаптации по сравнению с системой передачи на основе PSK-4 в тех же условиях даёт выигрыш в спектральной эффективности в 1,6 раз. По сравне-

нию с адаптивной системой, использующей семейство модуляций QAM, данный алгоритм проигрывает по спектральной эффективности на 30 %, но даёт выигрыш в PAPR в 3,5 раза.

В таблицу 5 сведены характеристики РСПИ с разработанным и известными алгоритмами смены видов модуляции при действии разных помех и весовых коэффициентов.

Таблица 5 – Характеристики РСПИ с разработанным и известными алгоритмами смены видов модуляции

Table 5 – RCS characteristics developed and known algorithms for changing types of modulation

Вид модуляции структурной помехи, ОСП, весовые коэф.	Схема переключения	Выигрыш в спектральной эффективности (по сравнению с PSK-4)	Проигрыш/выигрыш по сравнению с адаптивной РСПИ QAM	
			по спектральной эффективности	по PAPR
QAM-128 (PSK-128, APSK-128); ОСП 28 дБ $\alpha_1 = 0,3$	PSK-128, PSK-64, APSK-64, QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4	2 раза	Проигрыш 15 %	Выигрыш 30 %
QAM-128, (PSK-128, APSK-128); ОСП 28 дБ $\alpha_1 = 0,7$	PSK-128, PSK-64, PSK-16, PSK-4	1,6 раза	Проигрыш 30 %	Выигрыш 3,5 раза
QAM-128, (PSK-128, APSK-128); ОСП 22 дБ $\alpha_1 = 0,3$	QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4	2,2 раза	Нет выигрыша	Выигрыш 5 %
QAM-128, (PSK-128, APSK-128); ОСП 22 дБ $\alpha_1 = 0,7$	APSK-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4	2 раза	Проигрыш до 12 %	Выигрыш 40 %
QAM-16, (PSK-16, APSK-16); ОСП 22 дБ $\alpha_1 = 0,3$	QAM-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4	2,2 раза	Нет выигрыша	Выигрыш 8 %
QAM-16, (PSK-16, APSK-16); ОСП 22 дБ $\alpha_1 = 0,7$	APSK-64, PSK-16, APSK-16, QAM-16, PSK-4	1,9 раза	Проигрыш до 13%	Выигрыш 40 %

Заключение

Разработан алгоритм многокритериального выбора вида модуляции для адаптации РСПИ к действию структурной помехи. Проведено сравнение эффективности применения алгоритма адаптации при различных структурных помехах (с PSK, APSK, QAM) и весовых коэффициентах частных критериев качества.

Результаты функционирования разработанного алгоритма по выбору вида модуляции учитывают одновременно устойчивость к АБГШ и структурной помехе, энергоэффективность формируемого сигнала, а также спектральную эффективность.

Использование разработанного алгоритма многокритериального выбора вида модуляции для адаптации РСПИ к действию структурной помехи позволяет получить выигрыш в спектральной эффективности в 1,5 – 2 раза по сравнению с системой передачи со статической модуляцией, а выигрыш в PAPR в среднем в 1,2 – 1,6 раза по сравнению с адаптивной системой на основе вариации вида модуляции в классе QAM-сигналов.

Библиографический список

1. **Галев А.В., Косолапов А.С.** Исследование влияния структурных помех на помехоустойчивость систем с широкополосными шумоподобными сигналами при когерентном приёме // Наука и образование. 2012. № 4. С. 1-2.
2. **Falahati S. et al.** Adaptive modulation systems for predicted wireless channels // IEEE Transactions on Communications. 2004. Vol. 52. No. 2. С. 307-316.
3. **Петров А.В., Михалёв В.В., Решах Я.** Способ помехоустойчивого приёма сигнала с квадратурной фазовой манипуляцией на фоне сигналоподобной помехи // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2023. № 26. С. 61-76.
4. **Бабинчев В.В., Любимов А.Л., Репкин Д.А., Частиков А.В.** Анализ влияния структурных помех на адаптивное устройство быстрого поиска ШПС // Технические науки. 2017. № 4. С. 1.
5. **Keysight Technologies.** Использование адаптивной цифровой модуляции при тестировании регенеративных транспондеров. Keysight Technologies. 2014. 11 p.
6. **Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.** Адаптивные методы передачи информации модуляцией генераторов хаотических сигналов // Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург. Управление большими системами. 2018. № 23. С. 56-80.
7. **Болинт Э., Керн Р.** Адаптивная модуляция и другие расширения физического уровня в системах с множественным доступом. Патент РФ 2313196. 2007. Заявл. 14.03.2003. Оpubл. 20.12.2007.
8. **Воронцов Г.В.** Многокритериальная оптимизация уравнений и настройки параметров адаптации систем // Технические науки. 2004. № 2. С. 42-45.
9. **Лисничук А.А.** Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-1. С. 9-15. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-9-15.
10. **Гуткин Л.С.** Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Сов. Радио, 1975. 368 с.
11. **Лисничук А.А.** Процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 17-28. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-77-17-28.
12. **Лисничук А.А., Батищев А.В.** Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 3-14. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-3-16.
13. **Кириллов С.Н., Лисничук А.А., Писака П.С., Грибко К. В.** Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. №75. С. 3-14.
14. **Мещанинов П.С.** Разработка программно-определяемой системы передачи информации при действии структурной помехи // ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2024)»: Тез. докл. – Рязань, 2024. С. 147-149.

UDC 621.396

**ALGORITHM FOR MULTI-CRITERIA SELECTION
OF MODULATION TYPE FOR ADAPTING RADIO COMMUNICATION
SYSTEMS TO STRUCTURAL INTERFERENCE**

A. A. Lisnichuk, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Radio Control and Communication Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com

P. S. Meshchaninov, Master's Student, Radio Control and Communication Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0005-1295-7904, e-mail: kuznezocovp931@gmail.com

Due to the intensive use of time resources by radio communication systems (RCS), structural interference is becoming more common. In addition, it is necessary to transmit more data and increase the speed in

radio channel without loss of quality. Adaptive variation of modulation type allows you to change the radio signal depending on transmission conditions, providing the balance between interference resistance and spectral efficiency. However, as a rule, this method uses only one criterion, without taking into account other important characteristics of RCS such as signal peak factor. **The aim of the work** is to develop an algorithm for multi-criteria selection of modulation type to adapt RCS to the effect of structural interference. Multi-criteria approach allows taking into account several quality criteria: resistance to AWGN and structural interference, energy efficiency of generated signal, as well as spectral efficiency. The use of the developed algorithm implements a gain in spectral efficiency of 1.5-2 times compared with static modulation RCS, and a gain in peak factor of 1.2–1.6 times compared with an adaptive system based on a variation in modulation type only in the class of QAM signals.

Keywords: adaptive modulation, noise immunity, structural interference, PAPR, multi-criteria approach.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-13-23

References

1. Galev A.V., Kosolapov A.S. Issledovanie vliyaniya strukturnykh pomekh na pomekhoustojchivost' sistem s shirokopolosnymi shumopodobnymi signalami pri kogerentnom priyome. *Nauka i obrazovanie*. 2012, no. 4, pp. 1-2. (in Russian).
2. Falahati S. et al. Adaptive modulation systems for predicted wireless channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2004, vol. 52, no. 2, pp. 307-316.
3. Petrov A.V., Mikhalev V.V., Reshakh Ya. Sposob pomekhoustojchivogo priyoma signala s kvadraturnoj fazovoj manipulyaciej na fone signalopodobnoj pomekhi. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2023, no.26, pp. 61-76. (in Russian).
4. Babincev V.V., Lyubimov A.L., Repkin D.A., Chastikov A.V. Analiz vliyaniya strukturnykh pomekh na adaptivnoe ustrojstvo bystrogo poiska SHPS. *Tekhnicheskie nauki*. 2017, no. 4, p. 1. (in Russian).
5. Keysight Technologies. The use of adaptive digital modulation in testing regenerative transponders. *Keysight Technologies*. 2014. 11 p. (in Russian).
6. Andrievsky B.R., Fradkov A.L. Adaptivnye metody peredachi informacii modulyaciej generatorov haoticheskikh signalov. *Institut problem mashinovedeniya Rossijskoj akademii nauk, Sankt-Peterburg. Upravlenie bol'shimi sistemami*. 2018, no. 23. (in Russian).
7. Bolint E., Kern R. *Adaptivnaya modulyaciya i drugie rasshireniya fizicheskogo urovnya v sistemah s mnozhestvennym dostupom*. RF Patent 2313196. 2007. Application dated 14.03.2003. Publ. 20.12.2007. (in Russian).
8. Vorontsov G.V. Mnogokriterial'naya optimizaciya uravnenij i nastrojki parametrov adaptacii system. *Tekhnicheskie nauki*. 2004, no.2, pp. 42-45 (in Russian).
9. Lisnichuk A.A. Procedura mnogokriterial'nogo sinteza signalov s pryamym rasshireniem spektra dlya adaptacii kognitivnykh radiosistem peredachi informacii k slozhnoj pomekhovoj obstanovke. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no 66-1. pp. 9-15. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-9-15. (in Russian).
10. Gutkin L.S. Optimizaciya radioelektronnykh ustrojstv po sovokupnosti pokazatelej kachestva (Optimization of radio electronic devices based on a set of quality indicators). Moscow: Sov. Radio. 1975. 368 p. (in Russian).
11. Lisnichuk A.A. Procedura mnogokriterial'nogo sinteza OFDM-radiosignalov dlya snizheniya pikfaktora i povysheniya strukturnoj skrytnosti sistem peredachi informacii. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 77, pp. 17-28. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-77-17-28 (in Russian).
12. Lisnichuk A.A., Batishchev A.V. Dvuhkriterial'nyj sintez OFDM-signalov dlya povysheniya energeticheskoj effektivnosti i pomekhoustojchivosti. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 76, pp. 3-14. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-3-16. (in Russian).
13. Kirillov S.N., Lisnichuk A. A., Pisaka P.S., Gribko K.V. Mnogokriterial'nyj podhod k vyboru procedury kodirovaniya telemetricheskikh radiosignalov slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no.75, pp. 3-14. (in Russian).
14. Meshchaninov P.S. Razrabotka programmno-opredelyaemoj sistemy peredachi informacii pri dejstvii strukturnoj pomekhi. *VNTK «Novye informacionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyah (NIT-2024)»*: Tez. dokl. – Ryazan'. 2024, pp. 147-149. (in Russian).